

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO PARA O USO DE
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM HUMAITÁ,
AMAZONAS**

KAMILA LIRA SIMÕES

PROF.^a DR.^a JULIANE KAYSE ALBUQUERQUE DA SILVA QUERINO

**Humaitá, AM
Julho/2025**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO PARA O USO DE
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM HUMAITÁ,
AMAZONAS**

KAMILA LIRA SIMÕES

*Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais da
Universidade Federal do Amazonas,
como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre
Ciências Ambientais.*

PROF.^a DR.^a JULIANE KAYSE ALBUQUERQUE DA SILVA QUERINO

**Humaitá, AM
Julho/2025**

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S593a Simões, Kamilla Lira

Análise do potencial energético para o uso de energia solar
fotovoltaica em Humaitá, Amazonas / Kamilla Lira Simões. - 2025.
63 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Juliane Kayse Albuquerque Da Silva Querino.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas,
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Humaitá,
2025.

1. Transição Energética. 2. Variáveis Meteorológicas. 3.
Amazônia. 4. Radiação Solar. 5. Sustentabilidade. I. Querino,
Juliane Kayse Albuquerque Da Silva. II. Universidade Federal do
Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.
III. Título

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Análise do potencial energético para o uso de energia solar fotovoltaica em Humaitá, Amazonas (LINHA 1 – Componentes e dinâmicas dos ecossistemas com ênfase no bioma amazônico.)

KAMILLA LIRA SIMÕES

Dissertação defendida e aprovada em 01 de julho de 2025, pela comissão julgadora:

Prof. Dra. Juliane Kayse Albuquerque Da Silva Querino
PPGCA-IEAA/UFAM - Orientadora / Membro Titular Interno

Prof. Dr. Renato Abreu Lima
Membro Suplente Interno

Prof. Dr. Eronildo Braga Bezerra
Membro Titular Externo

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à memória do meu avô, Raimundo Brandão de Lira, que sempre acreditou no poder transformador dos estudos e incentivou cada um de seus netos a seguir pelo caminho do conhecimento. Sua presença, mesmo na ausência, continua sendo inspiração e força em cada conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente a mim mesma, que independente de qualquer empecilho, persistiu.

A Deus, por me conceder forças nos momentos mais desafiadores e por nunca me deixar desistir.

À minha mãe, Josélia Almeida Lira, e ao meu padrasto, Marcos Jacinto de Moura, pelo apoio e incentivo incondicional em todas as etapas da minha vida acadêmica e pessoal.

Aos meus irmãos, Emily Lira Simões e Marcos Vinícius Lira Simões, por sempre torcerem por mim e me motivarem a seguir em frente.

À minha orientadora, Dra. Juliane Kayse Albuquerque da Silva Querino, por toda orientação, dedicação e confiança ao longo desta caminhada.

À minha amiga de longa data, Fabielle do Nascimento Barba, que esteve ao meu lado desde o ensino médio, graduação e agora no mestrado. Sem você, eu realmente não conseguiria.

Às amigas Ana Cristina Oliveira Neves e Karoline Ribeiro Rabelo, pelas trocas de conhecimento, momentos de descontração e pelo apoio nas horas difíceis.

Ao meu namorado, Arthur Sarmento Maia, pelo companheirismo, principalmente nos momentos em que eu me sentia perdida.

Ao meu cunhado, João Pedro Santana da Silva, que, junto com meu irmão, me ajudou nos momentos finais da dissertação, quando achei que não conseguiria.

A todos os docentes do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), agradeço pelos valiosos ensinamentos técnico-científicos transmitidos ao longo do curso.

Aos professores da banca de qualificação e defesa, Prof. Dr. Eronildo Braga Bezerra, Prof. Dr. Benone Otávio Souza de Oliveira e Prof.(a) Dr. Renato Abreu Lima, pelas importantes contribuições e pelo enriquecimento desta dissertação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudos, fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Grupo de Pesquisa em Interação Biosfera Atmosfera na Amazônia (GPIBA), pela oportunidade de aprendizado e crescimento científico.

*“Após a tempestade, vou agradecer
Quando acabar a guerra, vou
agradecer
Enquanto o Sol brilhar, vou agradecer
Porque
Só eu sei
As esquinas por que passei...”*

BK' part. Djavan

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. JUSTIFICATIVA.....	2
3. HIPÓTESES.....	5
4. OBJETIVOS.....	6
4.1. Geral.....	6
4.2. Específicos.....	6
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
5.1. O que é a Energia Solar?.....	6
5.2. Sistemas e Equipamentos Energia Solar.....	9
5.3. Evolução E Histórico Da Energia Solar No Brasil.....	12
5.4. Impactos Do Uso Da Energia Solar: Ambientais, Sociais E Econômicos.....	15
5.5. Uso da Energia Solar no Amazonas.....	18
6. METODOLOGIA DE PESQUISA.....	20
6.1 Área de Pesquisa.....	20
6.2 Coleta e Análise de Dados.....	21
6.2.1 Aquisição e Processamento dos Dados Meteorológicos.....	21
6.2.2 Cálculo do Índice de Transmissividade (Kt).....	22
6.2.3 Cálculo de Energia Gerada Fotovoltaica (Epf).....	23
6.2.4 Teste de Normalidade.....	24
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
7.1 Radiação Solar e Temperatura do Ar.....	25
7.2 Nebulosidade.....	30
7.3 Energia solar e sua correlação com as variáveis meteorológicas.....	33
8. CONCLUSÃO.....	38

9. REFERÊNCIAS.....40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	3
Figura 2 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável que a energia solar está diretamente relacionada.....	4
Figura 3 - Tipos de radiação solar.....	8
Figura 4 - Tipos de sistemas de energia solar.....	10
Figura 5 - Matriz elétrica brasileira no ano de 2025.....	13
Figura 6 - Mapa de localização da área de estudo, Humaitá – Amazonas.....	20
Figura 7 - Média Mensal da radiação global (W/m^2) dos anos de 2019 a 2023.....	25
Figura 8 - Média Mensal Radiação Global (W/m^2) e Temperatura do Ar ($^{\circ}\text{C}$) para cada ano separado: a) 2019; b) 2020; c) 2021; d) 2022; e) 2023.....	28
Figura 9 - Média Mensal das Temperatura Máximas e Mínimas ($^{\circ}\text{C}$) dos anos de 2019 a 2023.....	29
Figura 10 - Classificação Kt segundo Iqbal (1983) para cada ano separado: a) 2019; b) 2020; c) 2021; d) 2022; e) 2023.....	32
Figura 11 - Classificação Kt segundo Iqbal (1983) para médias mensais dos anos 2019 a 2023.....	33
Figura 12 - Variação mensal da energia solar fotovoltaica simulada.....	34
Figura 13 - Heatmap da correlação de pearson para variáveis estudadas.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação Kt segundo Iqbal (1983).....	22
Tabela 2 - Característica do Painel Fotovoltaico.....	23
Tabela 3 - Dados de Radiação Global (W/m ²) obtida no ERA5.....	25
Tabela 4 - Dados de Temperatura do Ar (°C) obtida no ERA5.....	27
Tabela 5 - Dados de Temperatura do Ar: Máxima e Mínima (°C).....	28
Tabela 6 - Valores do Índice de Transmissividade (Kt).....	30
Tabela 7 - Irradiação solar diária média mensal (kWh/m ² .dia) segundo CRESESB.....	33
Tabela 8 - Energia fotovoltaica gerada mensal (kWh/mês) simulada.....	34
Tabela 9 - Teste Shapiro-Wilk.....	35
Tabela 10 - Correlação de Pearson.....	36

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

ACR – Ambiente de Contratação Regulada

ACL – Ambiente de Contratação Livre

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CCST – Centro de Ciência do Sistema Terrestre

CDS – Climate Data Store

CO₂ – Dióxido de Carbono

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

ECMWF – Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ESF – Energia Solar Fotovoltaica

ETP – Evapotranspiração potencial anual

Epf – Energia gerada fotovoltaica diária

FAPEAM – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas

GC – Geração Centralizada

GD – Geração Distribuída

GEE – Gases de Efeito Estufa

GHI – Irradiância Horizontal Global

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente

IEA – Agência Internacional de Energia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Im – Irradiação solar média diária

J – Joule

K - Kelvin

Kt – Índice de Transmissividade

KWh – Kilowatts-hora

MME – Ministério de Minas e Energia

MW – Megawatt

m² - Metro quadrado

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

SIN – Sistema Interligado Nacional

SSRD – “radiação solar superficial para baixo”

W – Watts

°C – Celsius

% – Porcentagem

RESUMO

SIMÕES, K. L. ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO PARA O USO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM HUMAITÁ, AMAZONAS. Humaitá, 2025, 63p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

O município de Humaitá, Amazonas, enfrenta desafios de segurança energética devido à dependência de termelétricas a diesel, gerando apagões frequentes e impactos ambientais. A escassez de estudos sobre energias renováveis na região motivou esta pesquisa, que tem como objetivo avaliar o potencial energético para implementação de sistemas fotovoltaicos em Humaitá, considerando variáveis meteorológicas sazonais. Para isso foram analisados dados horários de radiação solar e temperatura do ar (2019-2023) do banco de reanálise ERA5, como também foi estudada a nebulosidade, estimada pelo Índice de Transmissividade (K_t), e a produção energética que foi simulada para um painel fotovoltaico utilizando dados do SunData. E por fim realizou-se a correlação de Pearson com intuito de analisar a relação entre as variáveis. Os resultados indicaram valores de radiação solar variando entre 326,25 W/m² (fevereiro) e 448,78 W/m² (setembro), com os maiores picos no período seco. Os valores das médias mensais de temperatura do ar variaram de 26,92 °C a 29,84 °C, com média das máximas ultrapassando 33 °C e as mínimas se mantendo acima de 24 °C ao longo de todo o ano. O Índice de Transmissividade (K_t) demonstrou que durante o período chuvoso o município apresenta céu nublado, e no período seco céu parcialmente nublado. A simulação de produção de energia solar fotovoltaica resultou em uma média mensal de 62,21 kWh, com período seco tendo os maiores valores, como 72,02 kWh/mês em agosto. E a correlação entre as variáveis meteorológicas e a energia gerada evidenciou que a radiação se mostrou o fator primário de geração ($r = 0.87$; $p < 0.05$), enquanto a temperatura apresentou associação espúria ($r = 0.91$; $p < 0.05$), mediada pela radiação, e a nebulosidade (K_t) confirmou seu papel limitante ($r = 0.86$; $p < 0.05$). Desta forma, conclui-se que o Humaitá apresenta potencial para implantação de sistemas fotovoltaicos, capaz de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e trazer segurança energética, contribuindo diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na região Amazônica.

Palavras-chave: Transição Energética. Variáveis Meteorológicas. Amazônia. Radiação Solar. Sustentabilidade.

ABSTRACT

SIMÕES, K. L. ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO PARA O USO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM HUMAITÁ, AMAZONAS. Humaitá, 2025, 63p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

The municipality of Humaitá, Amazonas, faces energy security challenges due to its dependence on diesel-powered thermoelectric plants, which generates frequent blackouts and environmental impacts. The scarcity of studies on renewable energy in the region motivated this research, which aims to evaluate the energy potential for the implementation of photovoltaic systems in Humaitá, considering seasonal meteorological variables. For this purpose, hourly data on solar radiation and air temperature (2019-2023) from the ERA5 reanalysis database were analyzed, as well as cloudiness, estimated by the Transmissivity Index (Kt), and energy production, which was simulated for a photovoltaic panel using data from SunData. Finally, Pearson's correlation was performed to analyze the relationship between the variables. The results indicated solar radiation values ranging from 326.25 W/m² (February) to 448.78 W/m² (September), with the highest peaks in the dry season. The monthly average air temperature values ranged from 26.92 °C to 29.84 °C, with average maximum temperatures exceeding 33 °C and minimum temperatures remaining above 24 °C throughout the year. The Transmissivity Index (Kt) showed that during the rainy season the city has cloudy skies, and during the dry season, partly cloudy skies. The simulation of photovoltaic solar energy production resulted in a monthly average of 62.21 kWh, with the dry season having the highest values, such as 72.02 kWh/month in August. And the correlation between the meteorological variables and the energy generated showed that radiation was the primary generation factor ($r = 0.87$; $p < 0.05$), while temperature presented a spurious association ($r = 0.91$; $p < 0.05$), mediated by radiation, and cloudiness (Kt) confirmed its limiting role ($r = 0.86$; $p < 0.05$). Thus, it is concluded that Humaitá has potential for the implementation of photovoltaic systems, capable of reducing dependence on fossil fuels and bringing energy security and directly contributing to the Sustainable Development Goals in the Amazon region.

Keywords: Energy Transition. Meteorological Variables. Amazon. Solar Radiation. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

O homem teve um grande avanço com o uso da eletricidade, porém com o aumento considerável da população mundial a demanda por recursos naturais também cresce de forma significativa ocasionando a preocupação com a escassez de recursos não-renováveis, como os combustíveis fósseis utilizados na geração de energia elétrica, além dos impactos ambientais do uso de recursos para esta atividade. Desta forma começou-se a busca por alternativas para essa problemática visando a sustentabilidade energética.

A sustentabilidade energética refere-se sobre o fornecimento de energia de forma adequada atendendo a demanda da sociedade, sem ocasionar impacto ao ambiente e promovendo a sua preservação. Com o intuito de evitar os desastres ambientais e assegurar que uma parcela significativa da população tenha acesso à energia, levando segurança energética e reduzindo os conflitos geopolíticos resultantes da competição por recursos energéticos (Fapesp, 2007).

Assim, buscar a sustentabilidade energética é promover uma transição para fontes de energia renováveis e sustentáveis, que possam suprir as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias demandas energéticas. Uma das alternativas que vem ganhando grande visibilidade e mostrando grande potencial sustentável ao decorrer dos anos é a energia solar.

O sol é uma fonte de energia com grande potencial, o planeta Terra recebe uma quantidade significativa de energia em forma de luz e calor, capaz de suprir milhares de vezes as necessidades mundiais durante o mesmo intervalo de tempo, onde apenas uma pequena parcela dessa energia é aproveitada (Villalva & Gazoli, 2012).

Desta forma a energia solar pode ser aproveitada diretamente para iluminação, aquecimento de fluidos e ambientes, sendo fonte para energia térmica e elétrica. Os sistemas fotovoltaicos são uma das tecnologias utilizadas, tendo a capacidade de converter radiação solar em energia útil a partir do efeito fotoelétrico em materiais semicondutores contidos em células fotovoltaicas (Silva & Araújo, 2022).

Os impactos benéficos da energia solar vêm sido debatidos cada vez mais, segundo Vieira & Santos (2012), Silva et al. (2019), Aquino & Silva (2019) e Bezerra

(2023) energia solar emerge com um papel de suma importância no combate a intensificação do efeito estufa, consequentemente ao aquecimento global, considerando que sua utilidade elimina a necessidade da queima de combustíveis fósseis não produzindo poluentes, além de que sua instalação não promove nenhum tipo de devastação ou desapropriação de nenhuma espécie da fauna nem da flora, não produzem ruídos, trazendo menor custo da energia elétrica, demanda energética crescente e desenvolvimento sustentável.

Sendo um dos países mais privilegiados no contexto da energia fotovoltaica já que apresenta altos níveis de radiação solar, com irradiação média anual varia entre 1200 e 2500 KWh/m², o Brasil também possui reservas de quartzo e silício para produção de silício grau solar utilizados nas placas fotovoltaicas, ou seja, o país possui fonte e recursos para adoção dessa prática (Machado & Miranda, 2015; Aquino & Silva., 2019; Souza & Oliveira, 2019).

Além disso, Francisco et al. (2019) ressalta o potencial da geração de energia solar fotovoltaica no Brasil, e conclui que a variável mais importante é a quantidade de incidência de radiação solar, porém no estudo da implementação de um sistema fotovoltaico também é necessário levar em consideração o impacto indireto de outras variáveis, como temperatura e umidade, devido as questões de aquecimento e épocas chuvosas.

Portanto, mesmo com seu grande potencial muitas regiões do Brasil ainda são dependentes do uso de sistemas convencionais, como na região Amazônica, especificamente a cidade de Humaitá no interior do Amazonas, onde a população sofre com frequentes apagões no uso da usina termelétrica, dependendo de forma exclusiva deste empreendimento para realizar suas atividades diárias. Além de que há uma escassez de pesquisa sobre essa temática para a região. Portanto, é de suma importância analisar alternativas visando diversificar e trazer segurança energética para a comunidade, como a energia solar.

2. JUSTIFICATIVA

Devido as problemáticas ambientais ocasionada pelo descaso com meio ambiente o setor energético vem sofrendo consideráveis mudanças, impulsionando a busca por meios sustentáveis como forma de frear e mitigar os impactos negativos dessa relação homem e meio. Uma dessas alternativas é a geração de energia

elétrica a partir de fontes renováveis, como a fonte solar, que trazem grandes benefícios à sociedade.

Além disso, o uso dessa fonte tem sua contribuição para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável conhecidos como ODS (Figura 1), metas a serem alcançadas até 2030 visando planejamento para se alcançar um futuro mais sustentável e inclusivo.



Figura 1 - 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Fonte: ONU (2025)

A energia solar está diretamente relacionada com os seguintes ODS's: ODS 7 (Energia Acessível e Limpa); ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis); ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis); ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima). É crucial notar que a utilização dessa alternativa pode ter impactos positivos em outros objetivos de forma indireta (ONU, 2025).



Figura 2 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável que a energia solar está diretamente relacionada.

Fonte: ONU (2025)

O Objetivo 7 visa assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos, sendo a ODS que mais se relaciona com a energia solar. Uma vez que o uso dessa energia também traz benefícios como tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes

e sustentáveis, por meio de padrões de produção e de consumo sustentáveis, e auxiliando a combater a mudança climática e seus impactos, a energia solar também desempenha um papel importante nos Objetivos, 11, 12 e 13 (ONU, 2025).

Conforme destacado por Lube et al. (2024), no contexto do ODS 13 a utilização da energia solar fotovoltaica em substituição às fontes fósseis representa um passo significativo para a descarbonização da matriz energética, reduzindo a pegada de carbono de setores estratégicos. Trata-se de uma alternativa essencial para conter o avanço do aquecimento global, em consonância com as metas internacionais de diminuição das emissões de CO₂.

Nesse sentido, a energia solar assume um papel estratégico na transição para uma economia de baixo carbono. Além de ampliar o acesso a fontes energéticas limpas e modernas, ela se destaca como um instrumento eficaz para a redução dos gases de efeito estufa, impulsionando uma economia mais sustentável e adaptada às demandas climáticas globais.

Como visto, o Brasil tem totais condições de se tornar cada vez mais capacitado na produção de energia solar promovendo a necessária transição energética sustentável. Apesar do seu alto potencial, e de que o país possui participação significativa das hidroelétricas na sua matriz energética, muitas regiões ainda utilizam de termelétricas, como a região Amazônica.

Segundo Shayani, et al. (2006) as termelétricas são empreendimentos que acarretam diversos impactos negativos, tanto na extração dos recursos, quanto no transporte, refinaria, e queima em usinas, emitindo poluentes para atmosfera. Um desses poluentes é o dióxido de carbono (CO₂), estando entre os principais Gases de Efeito Estufa (GEE), acarretando a intensificação desse efeito, como também outras problemáticas como a poluição atmosférica, chuva ácida (Ecycle, 2024).

A matriz elétrica da região norte contrasta significativamente a do país. O estado do Amazonas e Roraima compreendem 85% da demanda total de energia necessária dos Sistemas Isolados, que são os sistemas não conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), utilizando de usinas locais que utilizam combustível fóssil, principalmente, óleo diesel. Além disso, existem habitantes que só tem acesso apenas algumas horas de energia por dia, por meio de geradores a diesel ou a gasolina (Iema, 2020; Climate Policy Initiative, 2023).

Quando analisado a realidade da região amazônica os autores Cavalcante et al.

(2019) afirmam é de suma importância a necessidade da eletrificação mais sustentável da Amazônia, trazendo a energia solar como aliada para a redução da dependência do diesel que minimiza os impactos ambientais associados ao transporte e queima desse combustível, e reduz as emissões de CO₂ e outros poluentes atmosféricos, garantindo maior segurança energética alinhada à sustentabilidade.

Perreira et al. (2024) acrescentam que a necessidade da transição energética na Amazônia é evidente, uma vez que a região ainda tem grande dependência dos combustíveis fósseis, como diesel. Para isso além do uso de tecnologias sustentáveis, é necessário levar em consideração o ponto de vista socioeconômico e ambiental, e incentivos a essas tecnologias.

Reconhecendo a problemática de que apesar da sua grande importância a Amazônia possui acesso limitado à eletricidade impactando diariamente a vida dos seus moradores, Silva et al. (2024) reforçam a importância do planejamento e implementação de políticas públicas visando o acesso à energia elétrica na região amazônica, visando promover soluções para minimizar o impacto ambiental e contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável da região.

Logo, ressalta-se a importância da adesão de alternativas de distribuição de energia na região que dependem exclusivamente de óleo diesel para a produção de eletricidade, como na cidade de Humaitá, Amazonas. Para isso é necessário analisar as condições climáticas do local.

Lohagen & Hawkins (2019) afirmam que são fundamentais os estudos de parâmetros meteorológicos na produção de energia solar em painéis fotovoltaicos, pois eles afetam diretamente o desempenho do sistema, considerando as variáveis de radiação e a temperatura de grande relevância na verificação para instalação de um sistema fotovoltaico. Outro fator que afeta os sistemas é a nebulosidade, pois em períodos nublados haverá um bloqueio da radiação solar direta dificultando a produção de energia (Gambhir et al., 2019; Silva, 2011).

Desta forma é imprescindível analisar as condições meteorológicas sazonalmente e o impacto destas na captação de energia que afetam a produção fotovoltaica, afim de averiguar o potencial energético com objetivo de atender a demanda local, e assim possibilitar a produção de energia elétrica limpa e sustentável.

3. HIPÓTESES

O município de Humaitá possui potencial energético significativo para a implementação de sistemas fotovoltaicos, com base na análise sazonal da radiação solar, temperatura do ar e nebulosidade, que permite prever e otimizar o desempenho dos sistemas solares ao longo do ano.

4. OBJETIVOS

4.1. Geral

- Avaliar o potencial energético do uso de energia solar para a implementação de sistemas fotovoltaicos no município de Humaitá, Amazonas.

4.2. Específicos

- Analisar o comportamento sazonal dos dados de radiação solar entre os anos de 2019 e 2023;
- Analisar o comportamento sazonal dos dados de temperatura do ar entre os anos de 2019 e 2023;
- Estimar o Índice de Transmissividade (K_t) entre os anos de 2019 e 2023;
- Estimar o potencial energético de radiação para o uso de energia solar;
- Correlacionar as variáveis meteorológicas (Radiação, Temperatura e Nebulosidade) com os valores de potencial energético.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. O que é a Energia Solar?

Com a modernização de equipamentos e máquinas advindos da Revolução Industrial, o padrão de vida do homem mudou, passando a utilizar de variadas maneiras a sua energia. Porém, aliada ao desenvolvimento da humanidade com o novo padrão de consumo a degradação do meio ambiente cresceu drasticamente, uma vez que a produção de energia se tornou dependente de recursos não renováveis como os combustíveis fósseis (Fapesp, 2007).

Magalhães (2009) relata que ao longo da história mundial as políticas energéticas se basearam no uso de combustíveis fósseis como fonte principal da matriz energética. Devido a redução das reservas de petróleo e o aumento do preço do barril no mercado internacional, a procura por fontes alternativas foi fomentada com o objetivo de que diminuir a dependência das fontes não renováveis.

Para Lucon e Goldemberg (2009) em uma sociedade onde a uma grande

problemática com a poluição e esgotamento de recursos, as energias renováveis devem serem consideradas como prioritárias, e não modelos de geração energética alternativas. Oliveira & Filho (2021) relatam que dentre essas alternativas ambientalmente sustentáveis para produção de eletricidade, eles destacam a energia solar fotovoltaica, que é obtida pela conversão da luz solar em eletricidade, como uma fonte limpa de energia que possui imenso potencial.

Pinho e Galdino (2014) ressaltam sobre o alto potencial da captação da energia solar para sua utilização como fonte de energia elétrica, quando comparado a outras fontes de energia baseadas em recursos não renováveis e limitados.

Villalva e Gazoli (2012) afirmam que praticamente o Sol é a fonte primária para toda a energia utilizada pela humanidade. A energia proveniente da biomassa, ou matéria orgânica, é derivada da energia solar por meio da fotossíntese. A água dos rios que gera energia por meio das turbinas das usinas hidrelétricas, tem sua origem na evaporação, precipitações e no degelo, todos processos provocados pelo Sol. A energia dos ventos tem como origem as variações de temperatura e pressão na atmosfera, ocasionadas pelo aquecimento solar. Os combustíveis fósseis, como carvão, gás natural e petróleo, possuem sua dependência da energia solar, uma vez que são produtos da decomposição de matéria orgânica formada há milhões de anos sendo alimentados pela luz e calor do Sol. Logo os autores mostram a importância da energia solar como fonte fundamental que impulsiona muitos dos processos energéticos essenciais para a vida na Terra.

O sol transmite energia para o planeta Terra por meio do espaço na forma de radiação eletromagnética, onde essa radiação é constituída de ondas eletromagnéticas possuindo frequências e comprimentos de ondas diferentes, quanto maior a frequência, maior a energia transmitida (Villalva & Gazoli, 2012).

A irradiância solar é a principal fonte de energia da Terra. Essa energia proveniente do sol é transferida para a superfície terrestre através da radiação eletromagnética, tendo um papel crucial em uma variedade de processos. Embora parte da radiação solar seja refletida de volta para o espaço e outra parte absorvida pela atmosfera, apenas cerca de 25% chegam diretamente à superfície sem sofrer interferências atmosféricas. A distribuição da irradiância solar varia em função da latitude e das estações do ano, influenciando no clima e os padrões atmosféricos, afetando desde a pressão atmosférica até as correntes de ar (Almeida, 2016).

Segundo Mariano & Junior (2022) a radiação solar possui três componentes: Radiação Direta; Radiação Difusa; e a Radiação devida ao albedo. A radiação direta corresponde aos raios solares que atingem a superfície terrestre em linha reta, incidindo sobre o plano horizontal. Por outro lado, a radiação difusa é composta pelos raios solares que chegam de forma indireta ao plano, resultado da difração na atmosfera e reflexão da luz em partículas de poeira, nuvens e outros objetos. Já a radiação devida ao albedo corresponde à porção da radiação solar que é refletida pela superfície terrestre e pelos arredores.

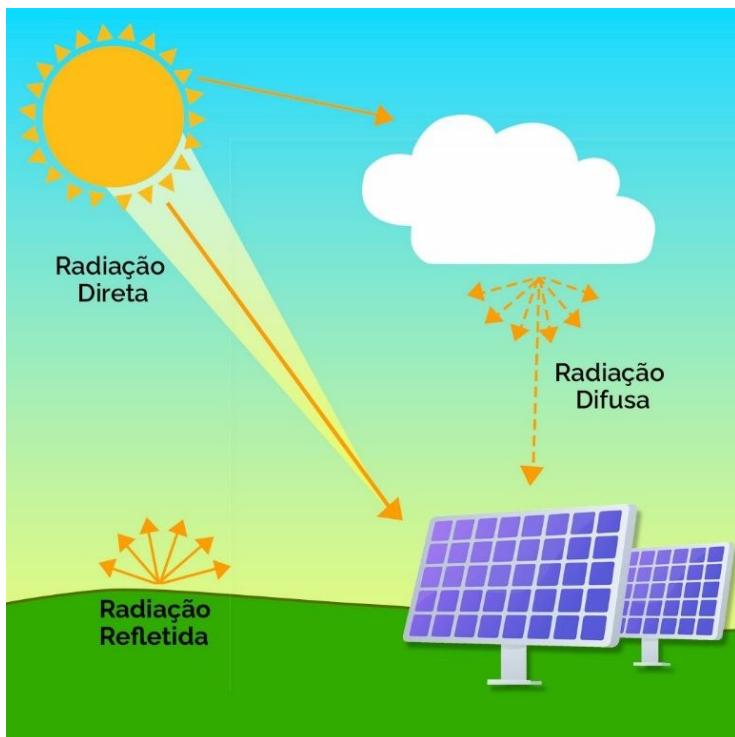


Figura 3 - Tipos de radiação solar.
Fonte: SoloTudo (2023)

Em síntese, em 1839 na França o físico Edmond Becquerel notou que ao expor duas placas de latão mergulhadas em um eletrólito líquido ao sol ocorria a geração de eletricidade, o que foi chamado de efeito fotovoltaico. Em seguida no ano de 1883, o americano Charles Fritts criou uma bateria solar a base de folhas de selênio. Posteriormente em 1954, foi produzida a primeira célula solar feita de silício, e com o passar dos anos essa tecnologia vem se aprimorando cada vez mais (Machado & Miranda, 2015).

Segundo Imhoff (2007) a energia solar fotovoltaica é considerada a energia gerada a partir da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Logo funciona por meio de módulos que captam a luz do sol e a transformam em corrente contínua,

essa corrente passa por um inversor e é transformada em corrente alternada, o excesso de eletricidade produzida pode voltar para a rede, assim a rede faz o uso da energia.

A produção de energia elétrica por meio desse recurso se dá pelos efeitos de radiação sobre materiais semicondutores específicos, seja termoelétrico e fotovoltaico. Aquino & Silva (2019) relatam que os sistemas fotovoltaicos geram energia elétrica por meio de células fotovoltaicas que tem em sua estrutura materiais que transformam de forma direta a radiação solar em energia elétrica, processo chamado de efeito fotovoltaico.

O fenômeno do efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores, como o silício, que se destacam pela presença de bandas de energia, banda de valência onde elétrons podem ser encontrados e banda de condução, onde não há elétrons presentes. O silício tem como característica a formação de uma rede cristalina devido os seus átomos possuírem quatro elétrons que se ligam aos átomos vizinhos. Quando adicionado átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, gera elétrons livres na banda de condução, esses elétrons podem ser utilizados para gerar corrente elétrica. Pode-se então chamar o fósforo de dopante doador de elétrons, sendo denominado dopante n ou impureza n (Cresesb, 2008).

Portanto, em resumo os sistemas fotovoltaicos tem como componentes básicos os painéis fotovoltaicos, os controladores de carga, os inversores e as baterias. E são classificados em dois tipos básicos, os sistemas isolados (Off grid) que normalmente são utilizados em lugares remotos, necessitando de baterias e controladores de carga, e os sistemas conectados à rede (On Grid) que complementam a energia elétrica convencional disponibilizada pela concessionária, operando somente com os painéis e inversores (Neosolar, 2024). No próximo tópico será feito um levantamento mais completo e esclarecedor sobre os tipos de sistemas e equipamentos para geração de energia a partir das placas solares.

5.2. Sistemas e Equipamentos Energia Solar

Os sistemas de energia solar ou sistemas fotovoltaicos, tem a capacidade de gerar energia elétrica a partir da radiação utilizando o princípio do efeito fotoelétrico em células fotovoltaicas ou solares. O conjunto de células é conhecido como painéis ou módulos fotovoltaicos (Silva, 2016; Aquino & Silva, 2019).

Pereira (2019) aborda que as modalidades de geração mais conhecidas são as centralizada e distribuída. A centralizada é normalmente conhecida por meio das usinas fotovoltaicas, onde concentram grandes produções de energia que são distribuídas por redes de transmissão para variados consumidores. A distribuída é caracterizada pela produção de energia local de consumo ou próximo, sendo consideradas unidades produtoras menores, como por exemplo, residências, empreendimentos, universidades, entre outras.

Os Sistemas Fotovoltaicos podem ser classificados também como integralmente autônomos (chamados de Off-Grid) ou conectados à rede elétrica convencional (On-Grid), onde os sistemas autônomos (Off-Grid) operam através da interligação de um conjunto de equipamentos específicos, gerando e armazenando a energia elétrica para uso no período noturno, esse tipo de sistema é mais comum em regiões com carência de distribuição da energia convencional. Nos sistemas conectados à rede elétrica (On-Grid) a energia elétrica produzida não consumida é introduzida na rede de distribuição da concessionária logo a uma economia com os gastos com equipamentos de armazenamento (Spaduto et al.; 2013).

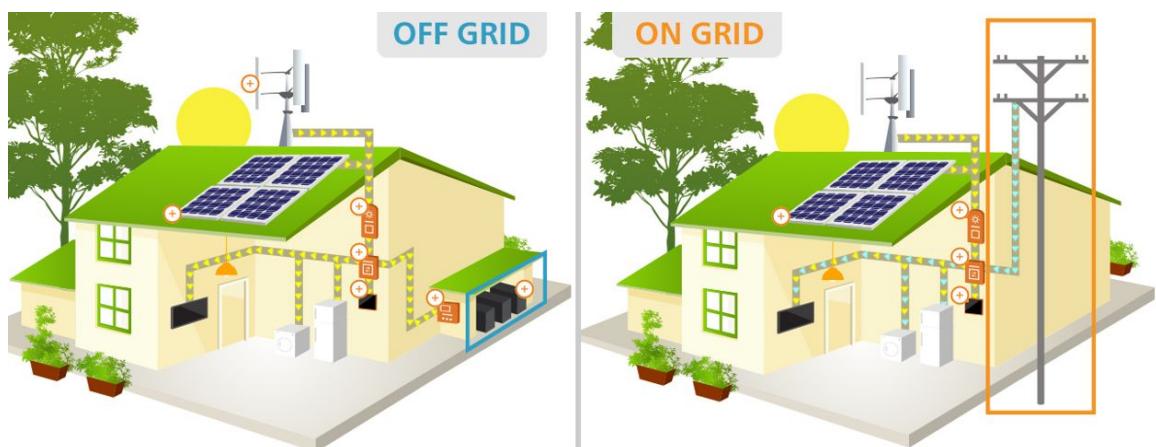


Figura 4 - Tipos de sistemas de energia solar.
Fonte: Confortec (2021)

Segundo Souza (2019) o On-grid tem como finalidade maximizar anualmente a produção de energia elétrica produzida no país. É essencial que o sistema fotovoltaico esteja conectado à rede de distribuição de energia, necessitando de um inversor, que tem como função converter a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), e realizar a sincronização do sistema com a rede pública. Devido não possuir um dispositivo de armazenamento toda energia excedente gerada (não consumida pelo usuário) é distribuída para a rede e é convertida em créditos de energia elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica funcionam em conjunto

com a rede elétrica existente, eliminando a necessidade de armazenamento de energia, com o propósito de gerar eletricidade para consumo interno, reduzindo a dependência da rede pública. Já os sistemas fotovoltaicos autônomos possibilitam o fornecimento de energia em locais sem acesso à rede elétrica, utilizando armazenamento de energia. Equipados com módulos fotovoltaicos, controladores de carga, bancos de baterias e inversores (Zilles et. al 2012; Villava & Gazoli, 2018).

Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABSOLAR (2024), a Geração distribuída (GD) são sistemas solares de pequeno e médio porte, com capacidade instalada de até 5 MW. A GD pode ser aplicada tanto em sistemas solares fotovoltaicos isolados ou remotos (*off-grid*), sendo sistemas que não estão conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Como também nos sistemas conectados à rede elétrica conhecidos como on-grid, possuindo quatro modalidades principais: GD junto à carga; Condomínio com GD/EMUC; Autoconsumo remoto; Geração Compartilhada (*Community Solar*).

A GD junto a carga trata-se do sistema em que a energia é produzida e consumida no próprio local. O Condomínio com GD/EMUC, são os empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras, onde os próprios consumidores dividem em percentuais a energia gerada, sendo dividida entre os condôminos. O Autoconsumo remoto possibilita que quando dentro da mesma área de concessão, o consumidor pode instalar um micro ou minigerador em um local diferente de onde reside e usar os créditos gerados para reduzir sua conta de luz de sua residência. A Geração Compartilhada (*Community Solar*), é um consórcio ou cooperativa, criada por pessoas ou empresas que investem em um sistema de micro ou minigeração distribuída (Absolar, 2024).

A geração distribuída oferece flexibilidade aos consumidores, especialmente em áreas urbanas onde não há a presença de grandes áreas para instalação de painéis solares, estes podem ser integrados ao ambiente construído sem a necessidade de grandes espaços adicionais (Rüther, 2004).

A geração centralizada (GD) são projetos de energia solar fotovoltaica acima de 5 MW, como por exemplo, usinas de grande porte. No contexto da geração de energia pela GC, a comercialização pode ocorrer em dois ambientes de contratação: o Ambiente de Contratação Livre (ACL), onde os diferentes agentes do setor elétrico negociam energia diretamente entre si, estabelecendo preços por meio de acordos

diretos; e o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), em que as geradoras participam de leilões de coordenados pelo Ministério de Minas e Energia (MME), com regras estabelecidas pela a ANEEL e procedimentos conduzidos pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (Absolar, 2024).

Neosolar (2024) afirma que o sistema fotovoltaico possui quatro componentes básicos: Painéis solares; Controladores de carga; Inversores; e Baterias. Os sistemas On-Grid necessitam somente de painéis e inversores uma vez em que não há a necessidade de armazenar energia como nos sistemas Off-Grid. Os sistemas Off-Grid dos painéis e inversores, também necessitam de baterias e controladores de carga.

Em relação a vida útil dos equipamentos, os itens do Sistema Fotovoltaico podem durar mais de 25 anos, com baixíssima ou nenhuma manutenção. As placas solares tem a vida útil de 30 a 40 anos, os inversores do tipo string têm de 10 a 15 anos e microinversores têm de 25 a 30 anos (Neosolar, 2024).

5.3. Evolução E Histórico Da Energia Solar No Brasil

No Brasil o uso de energia solar vem cada vez mais ganhando visibilidade, impulsionada por crises energéticas que afetam diretamente a produção de energia ocasionando aumento dos preços e apagões, sendo necessário a busca por alternativas mais sustentáveis e eficientes.

Segundo Didoné et al. (2014), em 1997 foi implantado no Brasil o primeiro sistema fotovoltaico pelo Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar (FV-UFSC) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), porém a discussão sobre a aplicação da energia solar fotovoltaica no Brasil iniciou-se no início da década passada.

No Brasil, até o início de 2012, um dos mais importantes nichos de aplicação da energia solar fotovoltaica que são as indústrias e mercados voltados para os sistemas de geração de energia em baixa tensão, encontravam uma grande barreira que dificultava a geração de energia solar fotovoltaica de forma distribuída e descentralizada: a falta de regulamentação e de normas técnicas (Villalva & Gazoli, 2012).

Um marco nesse segmento para o Brasil foi a criação da Resolução Normativa nº 482/2012 – ANEEL, que estabelece os critérios gerais para ter microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de transmissão de energia elétrica, e

regulamenta o sistema de compensação da energia elétrica excedente, porém está resolução passou por algumas mudanças, com a Resolução Normativa nº 687/15. Com as revisões que ocorriam nas resoluções, em 2019 a reação do setor solar levou a elaboração de um projeto de lei PL 5829/19 para estabelecer um marco legal da Geração Distribuída e assim garantir segurança jurídica ao mercado, e com devidas alterações, teve como resultado a Lei 13300/22 criada de 6 de janeiro de 2022 que institui o marco legal da microgeração e minigeração, dando suporte para diversificar a matriz energética do país (Porta Solar, 2024).

Silva & Araújo (2022) afirmam que o Brasil apresenta condições extremamente favoráveis para o desenvolvimento da energia solar, devido sua alta incidência de irradiação solar e produção de silício, fazendo com que cada vez mais seja investido na geração fotovoltaica.

A energia solar destaca-se pela capacidade de produção energética diretamente pelos consumidores, conhecida como geração distribuída, principalmente por meio de sistemas fotovoltaicos. Em áreas urbanas esse meio de geração é considerado mais viável devido à flexibilidade de instalação das placas solares nos telhados das construções, aliada a alta irradiação solar no Brasil, torna a mais promissora fonte para o país (Francisco et al., 2019).

A matriz elétrica brasileira produz hoje 249,309 MW (não incluindo os valores de importação), apresentando predominância na produção hídrica com 44,1% (110,040 MW), em seguida solar fotovoltaica com 22,7% (56,573 MW), eólica 13,4% (33,370 MW), biomassa + biogás com 7,2% (17,863 MW), gás natural com 7,1% (17,694 MW), petróleo e outros fósseis 3,3% (8,318 MW), carvão mineral 1,4% (3,461 MW), nuclear 0,8% (1,990 MW), e importação 3,3% (8,170 MW) de acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABSOLAR e Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2025).

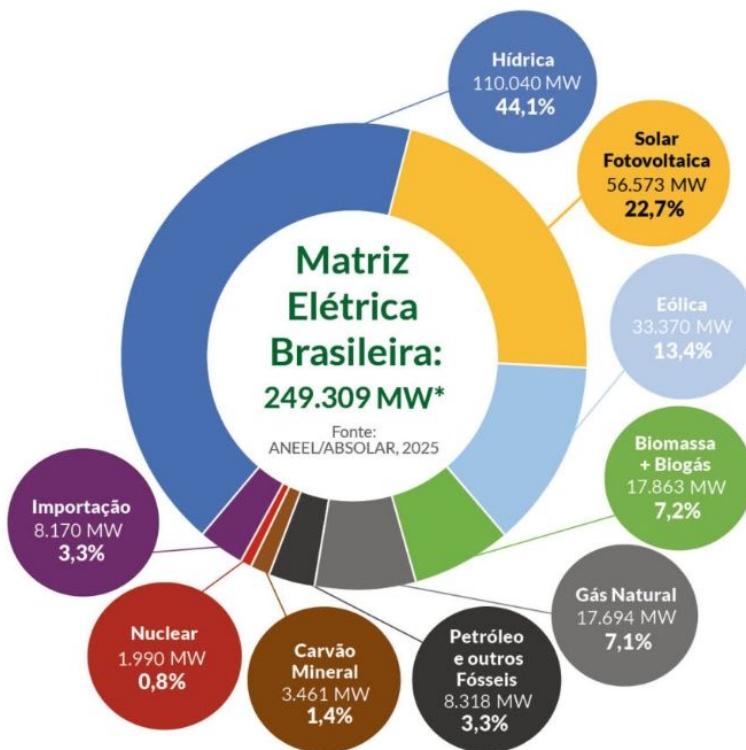


Figura 5 - Matriz elétrica brasileira no ano de 2025
Fonte: Absolar (2025)

O Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2023 realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) traz as principais informações relacionadas ao panorama nacional da cadeia de energia elétrica do Brasil, mostra que o maior destaque em termos de crescimento da capacidade de geração ficou com a geração solar, onde entre os anos de 2021 e 2022 houve o aumento de 79,8 % da geração solar e a redução de 52,9% na geração proveniente de combustíveis fósseis (carvão, gás natural e derivados de petróleo).

Absolar (2024) afirma com base em dados acumulados desde 2012 que a energia solar fotovoltaica no Brasil gerou mais de 1,2 milhão de novos empregos, mais de 61,3 bilhões em arrecadação de tributos, e mais de 47,6 milhões de toneladas de CO₂ evitadas. A associação relata também que desde 2019 a fonte solar está entre as mais competitivas do país nos leilões de energia no mercado regulado, e possui recordes de geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).

O país vem ganhando destaque no mercado da energia solar fotovoltaica, de acordo com o relatório da Agência Internacional de Energia (IEA) em 2020, com 3,1 GW o país ficou em nono lugar no ranking mundial de países com maior capacidade anual instalada tornando-se conhecido como “o mercado mais dinâmico da América Latina”. Brasil vem inserindo opções renováveis em seu abastecimento de energia

primária buscando a descentralizando da geração de energia, a transição para o sistema de energia fotovoltaica ainda se encontra em processo de desenvolvimento, mesmo com obstáculos essa fonte vem crescendo no país impulsionada pelas normas que regulamentam e incentivam a adoção dessa tecnologia.

Segundo Nascimento (2017) o Brasil possui um potencial grandioso para produção de energia elétrica a partir de fonte solar devido os níveis de irradiação solar serem superiores aos de países como Alemanha, França e Espanha onde projetos para aproveitamento de energia solar são amplamente debatidos. Dalfovo et al. (2019), retrata que quando analisado sobre o incentivo para o uso e geração de energia solar há uma ausência de políticas públicas, quando comparada a outros países que lideram o uso de energia solar. Então mesmo com a condição climática promissora existe um baixo desempenho comparada às outras nações.

O Brasil está avançando em sua jornada para explorar plenamente o potencial da energia solar, uma vez que houve uma queda nos preços dos equipamentos fotovoltaicos nos últimos anos, e também devido ao aumento significativo nas contas de energia elétrica. Tais pontos aliados a regulamentação adequada fazem com quem a tendência seja o crescimento em larga escala, impulsionada por sua natureza limpa e renovável (Silva & Araújo, 2022).

5.4. Impactos Do Uso Da Energia Solar: Ambientais, Sociais E Econômicos

É visível que o Brasil ainda sofre com limitações para o atendimento energético devido ao alto custo da geração, transmissão e distribuição de energia de sistemas convencionais, que torna quaisquer iniciativas em pequena escala inviável. Desta forma, energias renováveis, como a solar, se tornam uma solução para a problemática uma vez que contemplam ações que visam a conservação do meio ambiente, a participação social e o desenvolvimento local.

Fapesp (2007) relata sobre os benefícios do uso das fontes renováveis de energia, dando destaque as seguintes questões:

- **Benefícios ambientais e de saúde pública.** Na maioria dos casos, as modernas tecnologias de energia renovável geram emissões muito mais baixas (ou quase nulas) de gases de efeito estufa e de poluentes atmosféricos convencionais, em comparação com as alternativas de combustível fóssil;⁴⁴ outros benefícios podem envolver necessidades menores no uso de água e tratamento de resíduos, bem como impactos evitados de mineração e prospecção.
- **Benefícios de segurança energética.** Recursos renováveis reduzem a

exposição à escassez de oferta e à volatilidade dos preços nos mercados de combustíveis convencionais; também oferecem um meio para muitos países diversificarem os seus suprimentos de combustível e para reduzir a dependência das fontes estrangeiras de energia, incluindo a dependência do petróleo importado.

- **Desenvolvimento e benefícios econômicos.** O fato de muitas tecnologias renováveis poderem ser implantadas gradativamente, em aplicações isoladas de pequena escala, faz com que sejam adequadas para os contextos dos países em desenvolvimento, em que existe uma necessidade urgente de estender o acesso aos serviços de energia nas zonas rurais; além disso, uma maior dependência dos recursos renováveis nacionais pode reduzir a transferência de pagamentos por energia importada e estimular a criação de empregos (Fapesp, 2007, p. 185-186).

Segundo Torres (2012), a busca por fontes de energia alternativas menos poluente e negativas ao meio ambiente para atender a demanda energética da atual sociedade, vieram da necessidade de reduzir a emissão dos gases de efeito estufa (GEE). A ideia é reforçada por Pires et al. (2019), que argumenta sobre a adoção de alternativas, uma vez que é visível os esgotamentos das reservas de combustíveis fósseis e os impactos ambientais adversos ocasionados pelas usinas energéticas convencionais.

Os empreendimentos que utilizam recursos fósseis impactam desde a extração desses recursos, até o seu transporte, refinaria onde ocorre preparação para queima, usinas, além que as máquinas como turbinas e geradores necessitam de manutenção e também a produção de ruídos que acabam por se tornar uma poluição sonora. Enquanto a energia solar não precisa ser extraída, refinada e nem transportada. São utilizadas células solares para geração de energia, e um inversor para transformar a tensão e frequência para os valores nominais dos aparelhos. Acaba por se tornar um processo simples, sem emissão de gases poluentes ou ruídos e mínima de manutenção. Devido à sua simplicidade, esta alternativa renovável de obtenção de eletricidade possui vantagens econômicas e ambientais (Shayani et al., 2006).

A matriz energética brasileira tem predominância no uso de hidrelétricas, que para produção de energia dependem do volume de chuvas, diferente da energia solar que tem como um dos recursos naturais de maior abundância, a radiação solar. Logo as hidrelétricas, com a ausência de chuvas, acabam por se tornar ineficientes e com capacidade reduzida para atender, além de causarem impactos ambientais e sociais, pois alteram em grandes escalas os ecossistemas dos rios, impactando na vida dos animais e as famílias que dependem e vivem próximas a essas áreas (Bursztyn, 2020).

Já as usinas solares fotovoltaicas podem gerar diversos impactos positivos nos

locais implantados, tanto no âmbito econômico, como também no social e ambiental. Tais impactos acontecem ao longo de sua vida útil, englobando as fases de planejamento, instalação, operação e desativação (Hernandez et al.,2014). Entre os impactos sociais podem-se destacar a geração de empregos e consequentemente melhoria do desempenho econômico da região, o que aumenta o bem-estar da população (Costa, 2022).

Esposito & Fuchs (2013) ressaltam que os benefícios do uso de energia fotovoltaica são transversais, pois incentiva à geração de empregos, permite a redução de emissões de gases de efeito estufa, aumenta o desenvolvimento tecnológico, incentivando a sustentabilidade ambiental, social e econômica.

Os autores Aquino & Silva (2019, p.372) ditam que "... a energia fotovoltaica se configura como um caminho promissor, tendo diversas vantagens na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, trazendo de forma clara, melhor custo-benefício, confiabilidade técnica, baixos impactos ambientais, chegando o mais próximo possível de um denominador comum entre; custo da energia elétrica, demanda energética crescente e desenvolvimento sustentável."

Para Gastli & Armendáriz (2013) a evolução da energia solar é considerada uma grande oportunidade em vários setores como, no financeiro, energético, tecnológico e ambiental. O levantamento feito pelos autores é mostrado também por Silva & Araújo (2022):

As principais vantagens da utilização deste sistema é o fato de não consumir combustível, não poluir ou contaminar o meio ambiente, não gerar ruído, ter uma vida útil estimada em mais de 20 anos, ser resistente às adversidades climáticas, não possuir peças móveis resultando em uma baixa necessidade de manutenção além da limpeza e a possibilidade de se aumentar a potência de geração de energia através da implementação de mais módulos (SILVA & ARAÚJO, 2022, p.868).

Portanto, vários autores ao longo dos anos debatem sobre os benefícios ambientais, sociais e econômicos. Como já falado na sessão anterior a Absolar (2024) afirma com base em dados acumulados desde 2012 que a energia solar fotovoltaica no Brasil gerou mais de 1,2 milhão de novos empregos, mais de 61,3 bilhões em arrecadação de tributos, e mais de 47,6 milhões de toneladas de CO₂ evitadas. Sendo perceptível a contribuição dessa alternativa na matriz energética aumentando a segurança na distribuição, auxiliando na redução de gases do efeito estufa e da emissão de materiais particulados, podendo também contribuir com produção de empregos e desenvolvimento local.

Um questionamento que pode ser levantado do uso dessa fonte de energia seria custo da aplicação das ferramentas necessárias para sua captação, porém, atualmente existe uma queda nos custos dos equipamentos, onde o preço do kit solar deve diminuir, devido ao aumento da demanda e os investimentos no setor fotovoltaico, “Quanto maior o investimento, maior a produção de inversores, que são os principais elementos de um sistema solar, para abastecer a demanda de novas instalações.” (Absolar, 2024).

5.5.Uso da Energia Solar no Amazonas

Como debatido nos tópicos anteriores devido à localização geográfica do Brasil, que resulta em uma grande exposição à radiação solar durante a maior parte do ano, a energia solar fotovoltaica no país mostra grande potencial. Essa forma de energia destaca-se pela sua produção de energia eficiente e lucrativa, aliada com o baixo impacto ambiental, viabilidade econômica, entre outros benefícios.

O Amazonas é considerado uma das regiões que mostram potencial em energia solar, possuindo um dos maiores índices de desenvolvimento em capacidade energética fotovoltaica do norte do país, possuindo a “matéria-prima” que é a radiação solar, em abundância e presente mesmo nos meses de período chuvoso (Portal Solar; Absolar, 2021).

O estado possui um fotoperíodo médio na ordem de 12 horas/dia e algo como 4,5 horas de insolação por dia, localizado predominantemente na faixa equatorial, segundo o Atlas brasileiro de energia solar (Pereira et al., 2017), assegurando estabilidade anual no suprimento da ESF.

Existem usinas de painéis solares no estado que vem ajudando a diversificação da matriz energética regional. “A maior usina solar da região Norte ocupa uma área de 20 mil metros quadrados na BR-174, no ramal da Fazenda da Esperança, e possui 2,55 MWp de potência instalada. Oito inversores e 4.960 placas solares formam o complexo energético.” (Moreira et. al., 2024, p. 12).

Bezerra (2023) afirma que a principal fonte de energia sustentável no Amazonas é a energia solar fotovoltaica (ESF), devido a localização geográfica e a limitação da energia eólica e hidráulica. A região possui vento com velocidade média na faixa de 1 m/s e direção aleatória, limitando alternativa eólica. E a energia hidráulica, mesmo que sendo considerada uma energia de matriz limpa, tem sido debatido o grande impacto

ambiental da construção desse empreendimento, onde em regiões com topografia predominante de planícies, como o Amazonas, provoca inundações de grandes áreas como por exemplo Balbina, que inundou 236 mil hectares para instalar uma usina com 250 MW de potência instalada.

Logo quando comparadas a outros tipos de energias sustentáveis, a energia solar mostrasse como a alternativa mais viável para região, Bezerra (2023) em seu trabalho “Edifício solar fotovoltaico da Universidade Federal do Amazonas: O pioneirismo na produção de energia sustentável na Amazônia” compara a geração de energia por hidrelétrica e sistemas fotovoltaicos, realizando os seguintes apontamentos:

“1. Tomando o lago da UHE Balbina como referência e considerando 4,5 horas de insolação diária, seriam necessários apenas 485 ha (0,21% do lago), cobertos com painéis de 550 W de potência para produzir a mesma quantidade de energia que, em tese, a hidrelétrica produziria se gerasse os 250 MW de potência instalada nos 236 mil hectares inundados.

2. E com 4.083 hectares (1,73% do lago), igualmente cobertos com painéis de 550 W e insolação de 4,5 horas/dia, é possível produzir toda a energia necessária para suprir a demanda do Amazonas, da ordem de 2.105 MW de potência instalada, segundo a ANEEL (BRASIL, 2023 a), evidenciando a primazia da ESF.” (Bezerra, 2023, p.211)

Ao perceber o potencial da região empresas começaram investir no segmento de energia solar, Moreira et. al. (2024) afirma que as empresas conseguiram se desenvolver de uma forma promissora, porém encontram algumas dificuldades em manter os seus índices elevados ocasionando uma queda na procura do serviço, como por exemplo, fatores vinculados a alta dos juros nos financiamentos dos bancos e a “taxação do sol”, um termo que ganhou grande destaque no último ano, que trata-se da implementação de uma taxa de cobrança para custear a manutenção do sistema de fios em sistemas on-grid (sistemas conectados à rede).

O estudo feito por Moreira et. al. (2024) intitulado “Desafios e perspectivas da energia solar em Manaus”, levanta alguns pontos sobre as vantagens e desafios do uso de energia solar na cidade de Manaus, os autores relatam que:

“Gerar energia solar em Manaus já é uma ótima opção para os milhões de consumidores residenciais, comerciais e, principalmente, industriais da região, que podem aproveitar a grande disponibilidade de irradiação solar local e os incentivos oferecidos pelo estado para se tornarem energeticamente independentes e economizarem na conta de luz. Outro fator que torna a aquisição de um sistema gerador solar a opção mais vantajosa para os consumidores manauenses é o custo da energia elétrica na região. Todavia, o que ainda pode inviabilizar esse negócio é o valor deste serviço, devido o alto valor da placa solar e seus equipamentos conforme sua potência, mas como o cenário está crescente muitas empresas estão se adaptando e facilitando a aquisição deste serviço.” (Moreira et. al., 2024, p. 12).

Esses desafios encontrados devem servir como catalisadores para o estudo e implementação de novas tecnologias visando tornar a energia solar, que é uma energia sustentável e limpa, mais acessível.

Portal Solar, cita alguns projetos voltados para ampliação desse mercado, como a “Célula de Perovskita” que converte luz em eletricidade por meio de chumbo híbrido orgânico-inorgânico ou matéria à base de haleto, tendo um custo mais reduzido quando comparado às tecnologias já existentes. Outro estudo realizado por Michael Grätzel com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) é a produção de energia elétrica a partir de células solares que utilizam pigmentos vegetais extraídos de plantas amazônicas, como açaí, bujuju, jenipapo, urucum, murtinha e crajiru, outra tecnologia sustentável e com baixo custo para produção de energia.

6. METODOLOGIA DE PESQUISA

6.1 Área de Pesquisa

O estudo será realizado no município de Humaitá ($7^{\circ} 30' 21'' S$; $63^{\circ} 1' 14'' O$; 59 m) localizado na Mesorregião Sul do Estado do Amazonas, no entroncamento das Rodovias BR 319 (Porto Velho – Manaus) e BR 230 (Transamazônica), com área territorial de 33.111,129 km², e com população de 57.473 habitantes segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2022).

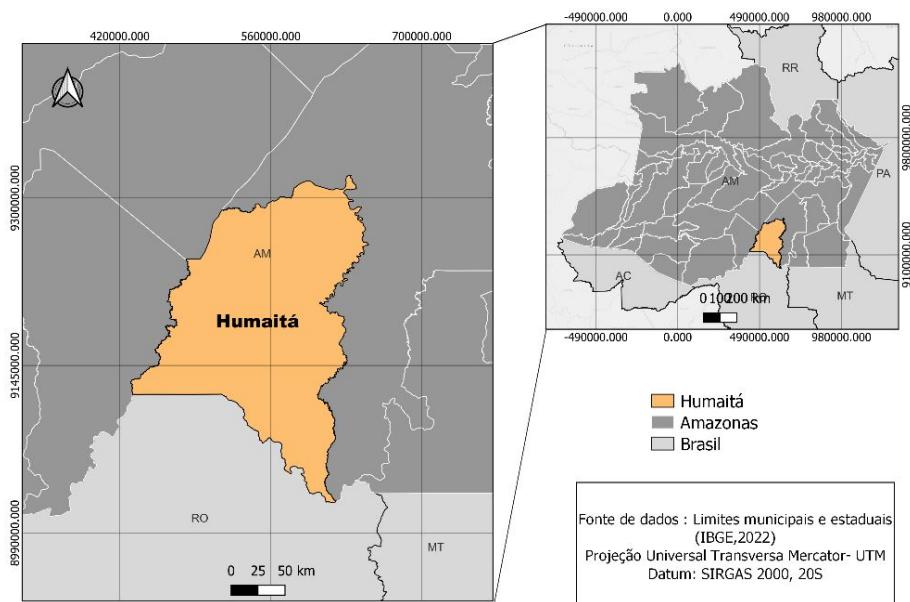


Figura 6 - Mapa de localização da área de estudo, Humaitá – Amazonas.

Fonte: Autora (2023)

Segundo Martins et al. (2023) a classificação climática atribuída a Humaitá, conforme definida por Thornthwaite e Mather (1955), é B4 W A' a', isso significa que a cidade possui um clima úmido, com um índice de umidade que varia de 80% a 100%, com deficiência hídrica moderada durante o inverno e evapotranspiração potencial anual (ETP) de 1140 mm característico do clima amazônico, caracterizado por dois períodos distintos: um seco e um chuvoso. A época seca compreende os meses de junho a agosto, enquanto a chuvosa ocorre entre outubro e abril, onde o mês maio é considerado um mês de transição, marcando a mudança da época chuvosa para a seca, enquanto setembro representa a transição da seca para a chuvosa.

6.2 Coleta e Análise de Dados

6.2.1 Aquisição e Processamento dos Dados Meteorológicos

Neste estudo serão utilizados os dados horários de radiação solar e de temperatura fornecidos pelo ERA5 no período de cinco anos (2019–2023), visando analisar a variação sazonal dessas variáveis para o uso da energia solar.

O ERA5 trata-se de uma ferramenta de reanálise meteorológica de quinta geração do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF) nomeadamente o maior grupo global de produtos de reanálise, combinando grandes quantidades de observações históricas, utilizando modelos avançados e sistemas de assimilação de dados (Vázquez et al., 2024; Wilczak et al., 2024).

Os produtos de reanálise oferecem estimativas de energia solar dinamicamente consistentes e, entre os vários dados de reanálise global disponíveis, o ERA5 vem sendo considerado preciso para irradiância solar, apresentando alto desempenho e permitindo uma análise global da estabilidade da energia solar (Yang & Bright, 2020; Kies et al., 2021; Jiang et al., 2023).

O ERA5 pode ser acessado no Climate Data Store (CDS), e a Irradiância Horizontal Global (GHI) pertence ao cluster denominado “Dados horários do ERA5 em níveis únicos de 1979 até o presente”. Em específico, a variável “radiação solar superficial para baixo” (SSRD) que representam a quantidade de radiação de ondas curtas (radiação solar direta e difusa na superfície) em J/m^2 , podendo converter tal unidade para W/m^2 dividindo os valores por 3600. Já os dados de temperatura, foi considerada a variável denominada “temperatura de 2m” medida em kelvin (K)

podendo ser convertida em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) subtraindo-se 273,15, descartando os períodos noturnos, nos quais não ocorre irradiação solar, impossibilitando a geração de energia fotovoltaica.

Para o processamento desses dados será utilizado a linguagem Python na versão 3.7, com auxílio de pacotes, como o Pandas (análise e manipulação de dados), o Matplotlib (confecção de gráficos), o Xarray (manipulação de dados n-dimensionais), e o Numerical Python (NumPy).

6.2.2 Cálculo do Índice de Transmissividade (Kt)

A nebulosidade é o conjunto de nuvens de um determinado local, sendo estas partículas atmosféricas de água em suspensão responsáveis por cobrir mais da metade da superfície terrestre afetando diretamente a radiação que chega à terra e a distribuição da temperatura (Ferreira, 2006; Burnett et al., 2014; Ohunakin et al., 2015; Pyrina et al., 2015).

Para a análise da nebulosidade será utilizado o Índice de Transmitância (Kt), que varia conforme a quantidade de nuvens e aerossóis na atmosfera, sendo definido como a razão entre a radiação solar global (R_g) e a radiação solar que chega ao topo da atmosfera (R_o) (Rensheng et al., 2004; Querino et al., 2011; Martins et al., 2014).

$$K_t = \frac{R_g}{R_o} \quad (1)$$

Para estimativa da radiação solar no topo da atmosfera (R_o), utilizou-se a expressão definida por Iqbal (1983) que é calculada em função da constante solar ($S_0=1367 \text{ W.m}^{-2}$), raio vetor da órbita terrestre (E_o), latitude local (φ), declinação solar (δ) e ângulo zenital (Z) conforme a Equação 2.

$$R_o = S_0 * E_o * \cos Z \quad (2)$$

Onde:

$$E_o = 1 + 0,0033 \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \quad (3)$$

Sendo d_n o dia do ano correspondente ao calendário Juliano. Para o ângulo zenital solar (Z), que consiste no ângulo entre o vetor que liga os centros da Terra e do Sol e o zênite local, usa-se a seguinte Equação:

$$\cos Z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H \quad (4)$$

Tendo que δ é a declinação solar considerada a latitude (celeste) em que se encontra o Sol, podendo variar de 0° a $\pm 23^{\circ}$ ao longo do ano, obtém-se a partir da

seguinte Equação 5.

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} i \quad (5)$$

O ângulo horário (H), trata-se de um indicador da posição do astro no sistema equatorial horário de coordenadas, adotando valores entre $\pm 90^\circ$, $H = 0^\circ$ é atribuído ao meio-dia solar, enquanto valores negativos referem-se ao período anterior ao meio-dia solar e os positivos ao período posterior (Fattori & Ceballos, 2005). H é definido pela Equação 6.

$$H = (Hora - 12) * 15 \quad (6)$$

O índice de claridade (Kt) proposto por Iqbal (1983) permite a classificação do céu de determinada região quanto a sua turbidez conforme a Tabela 1, por meio dos dados obtidos da Equação 1.

Tabela 1 - Classificação Kt segundo Iqbal (1983).

$Kt \leq 0,3$	Nublado (N)
$0,3 < Kt < 0,7$	Parcialmente Nublado (PN)
$Kt \geq 0,7$	Céu Limpo (CL)

Fonte: Autora (2024)

6.2.3 Cálculo de Energia Gerada Fotovoltaica (Epf)

Um dos objetivos do trabalho é entender a influência das variáveis meteorológicas na energia solar, logo com a ausência de um sistema fotovoltaico real será realizado uma estimativa por meio da Equação 7, para isso é necessário realizar algumas assunções.

Foi considerado um painel em específico com as seguintes características mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Característica do Painel Fotovoltaico.

Dimensões (mm)	2012 x 1040 x 35
Área (m ²)	2,18
Pm (W)	465
n (%)	21,3

Fonte: Autora (2024)

Sendo pressuposto que não houve perdas por sombreamento ou deposição de poeira, perdas associadas ao inversor e cabos, portanto as estimativas têm tendência a superestimar a produção real de energia.

Os dados de irradiação solar (I_m) seram obtidos por meio do programa SunData fornecido pelo Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito – CRESESB, que tem como objetivo fornece ferramentas de apoio ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos (Cresesb, 2018).

O SunData tem como banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2^a Edição, criado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por meio do seu Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN) (CCST/LABREN/INPE, 2017).

O programa realiza a conversão de valores de irradiação solar do plano horizontal para planos inclinados segundo o método de Liu & Jordan (1962) isotrópico estendido por Klein (1977). No geral, a inclinação do módulo fotovoltaico é igual o valor da latitude local, para esse estudo utilizou-se o ângulo com a maior média diária anual de irradiação solar, para a localidade é de 8º, visando a maior geração anual de energia.

A partir dessas assunções é possível realizar o cálculo de energia gerada por um painel fotovoltaico (E_{pf}) por meio da Equação 7, esse método também é conhecido como Método da insolação (Delgado, 2015). Três variáveis são levadas em consideração para o cálculo, sendo elas: Irradiação Solar Média (I_m), Área do Painel (A), e Eficiência do Painel (n).

$$E_{pf} = \mathfrak{I} * A * n \quad (7)$$

E_{pf} = Energia produzida diariamente pelo painel (kWh)

\mathfrak{I} = Irradiação Solar Média (kWh/m²/dia)

A = Área do Painel (m²)

n = Eficiência do Painel

Tal cálculo permite encontrar a energia fotovoltaica produzida diariamente, logo para encontrar o valor mensal multiplica-se o E_{pf} por 30.

6.2.4 Teste de Normalidade

A fim de se determinar o método estatístico a ser utilizado para correlação das variáveis com a energia solar, empregou-se o teste de Shapiro-Wilk, sendo considerado um dos melhores testes de aderência à normalidade (Leotti et al., 2005; Fávero e Belfiore, 2017).

O teste de Shapiro-Wilk fornece o parâmetro valor de prova (p-valor) que indica

o quanto os dados estão de acordo com a hipótese nula (H_0), sendo H_0 correspondente à distribuição Normal. O p-valor baixo indica que os dados não são compatíveis com a distribuição Normal. Logo para decidir se os dados são ou não normais, é comparado o p-valor com um valor de referência chamado nível de significância (α), que normalmente é 0,05 (ou 5%). Portanto, se $p\text{-valor} \leq \alpha$, rejeita-se H_0 , ou seja, não se pode admitir que o conjunto de dados em questão tenha distribuição Normal; se $p\text{-valor} > \alpha$, não se rejeita H_0 , ou seja, a distribuição é Normal (Lopes; Branco e Soares, 2013).

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Radiação Solar e Temperatura do Ar

A análise dos dados médios mensais de Radiação Global (Tabela 3) para o município de Humaitá, no período de 2019 a 2023, revela uma variação sazonal marcada. Os valores médios mensais oscilaram entre 326,25 W/m² (fevereiro) e 448,78 W/m² (setembro).

Tabela 3 - Dados de Radiação Global (W/m²) obtida no ERA5.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2019	303,81	329,53	352,71	330,59	334,41	355,19	391,38	425,53	430,83	383,64	345,02	322,05
2020	353,52	321,26	312,60	311,93	318,15	360,85	386,94	438,89	451,06	441,69	410,46	363,96
2021	336,39	321,46	308,62	345,11	356,26	368,65	413,35	435,01	437,93	428,37	323,28	323,98
2022	366,99	317,15	343,62	349,64	365,70	352,08	404,85	411,99	467,99	397,13	404,12	375,94
2023	309,26	341,83	330,22	325,90	336,30	345,98	419,56	418,04	456,08	482,74	428,18	391,11
MÉDIA	333,99	326,25	329,56	332,63	342,16	356,55	403,21	425,89	448,78	426,71	382,21	355,41

Fonte: Autora (2025)

Tal padrão corrobora com estudo de Souza (2016) que notou para capital do Amazonas, cidade de Manaus, que a incidência de radiação solar não apresentou variações extremas ao longo dos meses. Sendo os maiores valores entre os meses de junho e setembro, como os índices de radiação alcançando 450 w/m², e para o período chuvoso em média de 300 w/m².

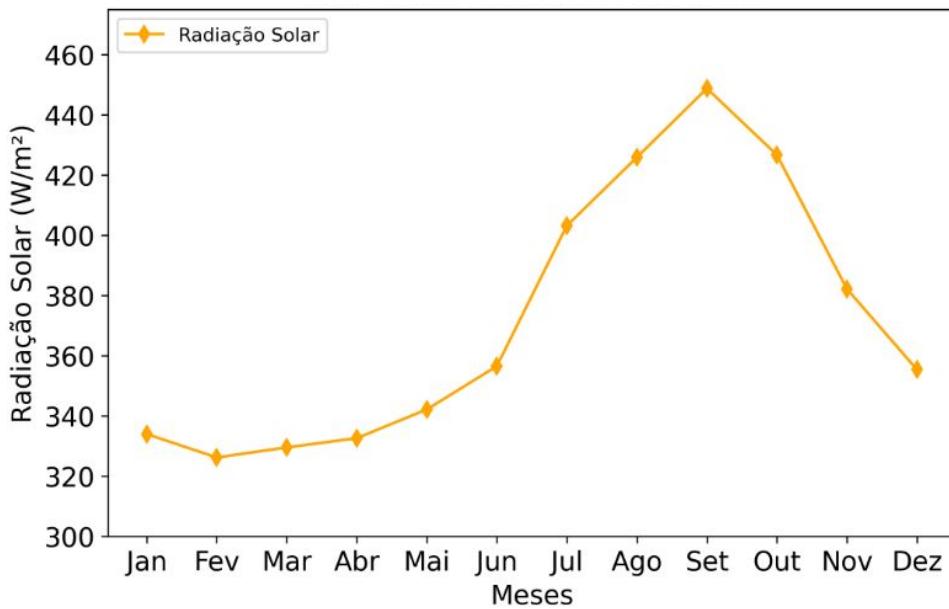


Figura 7 - Média Mensal da radiação global (W/m^2) dos anos de 2019 a 2023.

Fonte: Autora (2025)

Observa-se que os maiores valores de radiação ocorrem no período seco, com destaque para o mês de setembro ($448,78 \text{ W}/\text{m}^2$), seguido de agosto ($425,89 \text{ W}/\text{m}^2$), se estendo para o mês de outubro que apresenta valores elevados de radiação ($426,71 \text{ W}/\text{m}^2$).

Em contraste, os menores valores de radiação são registrados durante o período chuvoso, especialmente entre janeiro e março, com médias próximas a $330 \text{ W}/\text{m}^2$. Essa tendência é coerente com o regime climático da região, onde o aumento da nebulosidade durante a estação chuvosa reduz a incidência direta da radiação solar, enquanto na estação seca, a menor cobertura de nuvens favorece uma maior disponibilidade de energia solar (Martins et al., 2014).

É característico da região Amazônica o clima com período de seca reduzido quando comparado ao período chuvoso. Os resultados desta pesquisa mostram que mesmo com o período de chuvas estendido ao longo do ano, não houve alterações significativas nos índices de radiação solar, pois mesmo que a nebulosidade afete a radiação direta, têm-se a presença da radiação difusa.

As regiões norte, central e nordeste do Brasil, apresentam menor variabilidade anual no nível de irradiação global. A região norte apresenta os maiores índices do país em relação à componente difusa da energia solar, devido alta nebulosidade tanto no período chuvoso quanto no seco (Martins et al., 2008).

Os resultados corroboram com o estudo de Galvão et. al. (2024), que

constataram para o município de Humaitá que a radiação global apresenta um comportamento médio horário consistente em ambos os períodos, seco e chuvoso. Durante o período seco, onde tem-se menor cobertura de nuvens ocorre os meses com maiores valores de radiação sendo eles: agosto e setembro. Já em consequência do aumento de nebulosidade e dispersão da radiação devido a estação chuvosa, os meses de dezembro a fevereiro apresentam valores mais reduzidos.

De forma semelhante aos resultados para Humaitá, o estudo de Alves et al. (2021) observou que a cidade Santarém — que também possui um clima tropical úmido com sua sazonalidade bem definida entre o período de inverno e verão amazônico — os meses de setembro e outubro concentram os maiores índices de radiação solar, e os meses de fevereiro e maio, possuem os menores índices de radiação solar.

Quando comparado a produção de energia solar dos meses de chuva com os meses secos, a perda é de no mínimo 22%, revelando o forte potencial da radiação solar na Amazônia mesmo durante o “inverno amazônico” com radiação solar bem distribuída durante todos os meses do ano para geração de energia solar (Alves et al., 2021).

Alvez, Reis e Gois (2018) determinaram que é a cidade de Humaitá tem grande potencial utilizando a radiação com fonte de energia, os resultados do estudo corroboram com o presente trabalho uma vez que os dados de radiação global tendem a baixar no período chuvoso e aumentar no período seco, onde as flutuações quando analisado mês a mês no período estudado são pequenas.

A análise dos dados médios mensais de Temperatura do Ar (Tabela 4) para o município de Humaitá, entre 2019 e 2023, também evidencia uma variação sazonal ao longo dos anos analisados. As temperaturas médias mensais variaram de 26,92 °C (janeiro) a 29,84 °C (setembro).

Tabela 4 - Dados de Temperatura do Ar (°C) obtida no ERA5.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2019	26,89	27,08	27,77	27,59	28,08	28,61	28,64	28,85	29,89	27,63	27,80	27,32
2020	27,89	27,42	27,48	27,52	27,32	28,26	28,57	29,20	29,64	29,00	28,32	27,36
2021	26,81	26,95	26,63	27,32	27,65	27,49	28,12	29,39	29,06	29,08	27,28	27,18
2022	26,89	26,49	27,01	27,47	27,54	27,38	29,18	28,36	29,97	28,66	27,74	27,38
2023	26,14	26,69	26,96	27,46	28,12	27,29	29,66	29,94	30,66	31,12	29,65	28,76
MÉDIA	26,92	26,93	27,17	27,47	27,74	27,81	28,83	29,15	29,84	29,10	28,16	27,60

Fonte: Autora (2025)

Durante o período de seca (junho a agosto), observam-se temperaturas mais elevadas, culminando em setembro, mês de transição do período seco para o chuvoso. Este comportamento é esperado, uma vez que a redução da nebulosidade durante a seca favorece o aumento da temperatura do ar devido à maior incidência de radiação solar.

Já nos meses mais chuvosos (outubro a abril), as temperaturas tendem a ser ligeiramente mais baixas, apesar de ainda elevadas, refletindo o clima predominantemente quente e úmido da região amazônica.

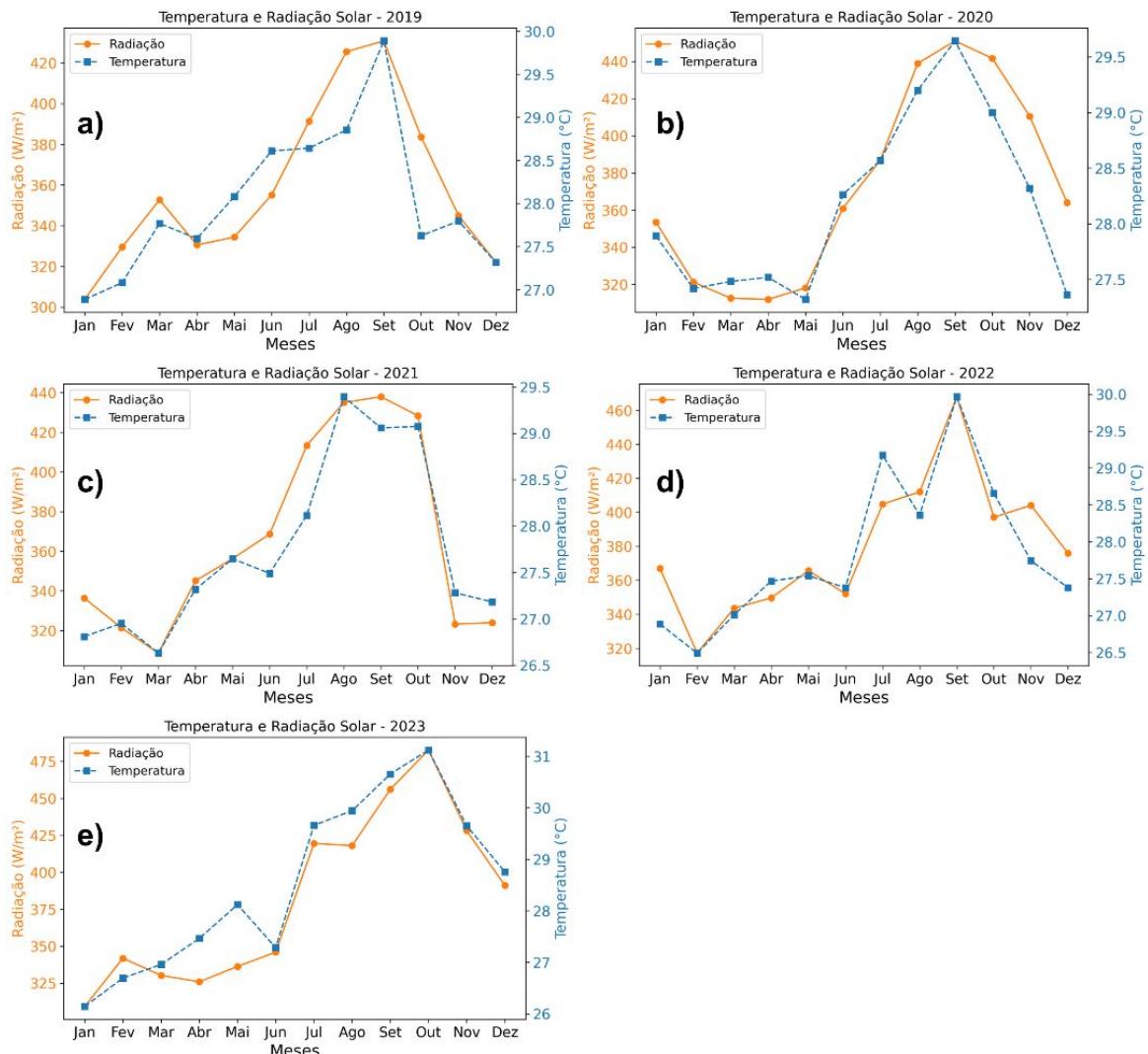


Figura 8 - Média Mensal Radiação Global (W/m^2) e Temperatura do Ar ($^\circ\text{C}$) para cada ano separado: a) 2019; b) 2020; c) 2021; d) 2022; e) 2023.

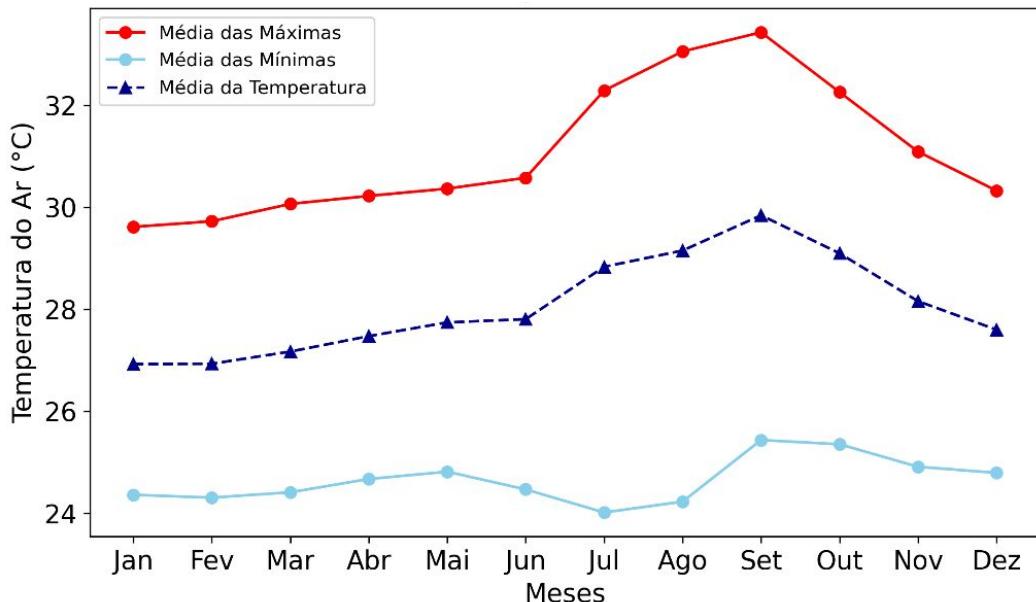
Fonte: Autora (2025)

A análise das temperaturas médias das máximas e mínimas (Tabela 5) reforça esta tendência, com as máximas ultrapassando 33 °C em setembro (33,43 °C) e as mínimas se mantendo acima de 24 °C ao longo de todo o ano.

Tabela 5 - Dados de Temperatura do Ar: Máxima e Mínima (°C).

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
MÁX	29,61	29,7 2	30,06	30,22	30,3 6	30,58	32,2 9	33,06	33,43	32,2 6	31,09	30,33
MÍN	24,36	24,3 1	24,41	24,67	24,8 1	24,47	24,0 2	24,23	25,44	25,3 5	24,91	24,79

Fonte: Autora (2025)

**Figura 9** - Média Mensal das Temperatura Máximas e Mínimas (°C) dos anos de 2019 a 2023.

Fonte: Autora (2025)

Beserra & Lemos (2019) reforçam que, mesmo com alta radiação, a eficiência dos módulos pode ser reduzida com temperaturas elevadas, onde o aumento da temperatura ocasiona a redução da tensão de saída da célula fotovoltaica, o que é um malefício para o sistema.

A temperatura elevada gera excesso de energia térmica nos elétrons livres e nas lacunas, dificultando a movimentação e resultando na diminuição da tensão, impactando negativamente na eficiência dos módulos (Fouada, Shihatab e Morgan, 2017; Piotrowski, Vaz e Farret, 2021).

Os autores Margarido et al. (2021) corroboram sobre a influência da temperatura nos módulos fotovoltaicos, confirmado que o calor excessivo pode limitar o rendimento dos sistemas, mesmo em condições de alta radiação solar.

Logo a combinação entre alta irradiação solar e baixas temperaturas constitui a condição ideal de operação sistemas fotovoltaicos, o que torna a região norte a frente quando comparadas a regiões com altos índices de radiação, porém com elevadas

temperaturas.

Dependendo do tipo do material da placa solar, a potência máxima pode diminuir entre 0,4% e 0,5% para cada aumento de 1 °C na temperatura de operação, conforme apesentado na NBR 16690 (ABNT, 2019).

A soma das perdas mensais relativas à temperatura durante a operação em um ano são consideravelmente altas segundo Margarido et al. (2021), podendo representar até um mês de geração perdido ao longo do ano. O que reforça a importância do levantamento de dados de temperaturas para análises estratégicas de localidades para implantação de sistemas fotovoltaicas.

Uma solução para mitigar o impacto térmico na geração solar é o arrefecimento dos módulos fotovoltaicos, que consiste em um jato de água sobre a superfície do módulo, que além de aumentar a eficiência na geração elétrica, pode também aquecer a água para aproveitamento, entre outras tecnologias (Piotrowski, Vaz e Farret, 2021; Mello, 2021).

O autor Simioni (2017) retrata também sobre a escolha da tecnologia adequada para condições da região, uma vez que mesmo regiões com altos índices de irradiação podem apresentar um potencial solar real reduzido devido à alta temperatura ambiente, logo as perdas térmicas é fator crítico no planejamento energético.

7.2 Nebulosidade

Sendo uma das principais variáveis meteorológicas responsáveis pela atenuação da radiação solar incidente na superfície terrestre, a nebulosidade tem um papel fundamental para o planejamento energético do uso de energia solar (Simioni, 2017).

Logo utilizou-se o Índice de Transmissividade (Kt) como parâmetro para estimar a esta variável para a cidade de Humaitá - Amazonas, onde valores de Kt tendem a ser mais baixos durante os meses com maior nebulosidade segundo a classificação Iqbal (1983).

A avaliação do Índice de Transmissividade (Kt) demonstra variações sazonais que refletem o comportamento da nebulosidade em Humaitá ao longo dos anos de 2019 a 2023. Os valores médios mensais de Kt variaram entre 0,23 (fevereiro) e 0,35 (julho).

Tabela 6 - Valores do Índice de Transmissividade (Kt).

JAN	FEV	MA	ABR	MAI	JUN	JUL	AG	SET	OUT	NOV	DEZ
-----	-----	----	-----	-----	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----

	R						O					
2019	0,22	0,24	0,26	0,26	0,28	0,31	0,34	0,34	0,32	0,28	0,25	0,24
2020	0,26	0,23	0,23	0,24	0,27	0,32	0,33	0,35	0,34	0,32	0,30	0,27
2021	0,25	0,23	0,23	0,27	0,30	0,32	0,36	0,35	0,33	0,31	0,24	0,24
2022	0,27	0,23	0,25	0,27	0,31	0,31	0,35	0,33	0,35	0,29	0,30	0,28
2023	0,23	0,25	0,24	0,25	0,28	0,30	0,36	0,34	0,34	0,35	0,31	0,29
MÉDIA	0,24	0,23	0,24	0,26	0,29	0,31	0,35	0,34	0,34	0,31	0,28	0,26

Fonte: Autora (2025)

Os menores valores de Kt, inferiores a 0,30, são observados durante o período chuvoso, particularmente entre janeiro e abril. Esses valores indicam uma maior cobertura de nuvens, que reduz a quantidade de radiação solar direta atingindo a superfície terrestre, o que diminui a geração de energia solar (Martins et al., 2014).

Em contraste, os maiores valores de Kt ocorrem entre junho e setembro, coincidentes com a estação seca. O pico é registrado nos meses de julho (0,35), agosto (0,34) e setembro (0,34), caracterizando condições atmosféricas de menor turbidez e maior incidência direta de radiação solar. Estes resultados são consistentes com a sazonalidade climática da região, e reforçam o potencial para a geração de energia solar fotovoltaica.

Portanto, conforme a Classificação Kt segundo Iqbal (1983) na Tabela 1 — valores de $Kt \leq 0,3$ caracterizam condições de céu nublado (N), valores entre $0,3 < Kt < 0,7$ correspondem a céu parcialmente nublado (PN), e valores de $Kt \geq 0,7$ indicam céu limpo (CL) —, o município de Humaitá não possui nenhum mês considerado como “Céu Limpo” (Figura 5).

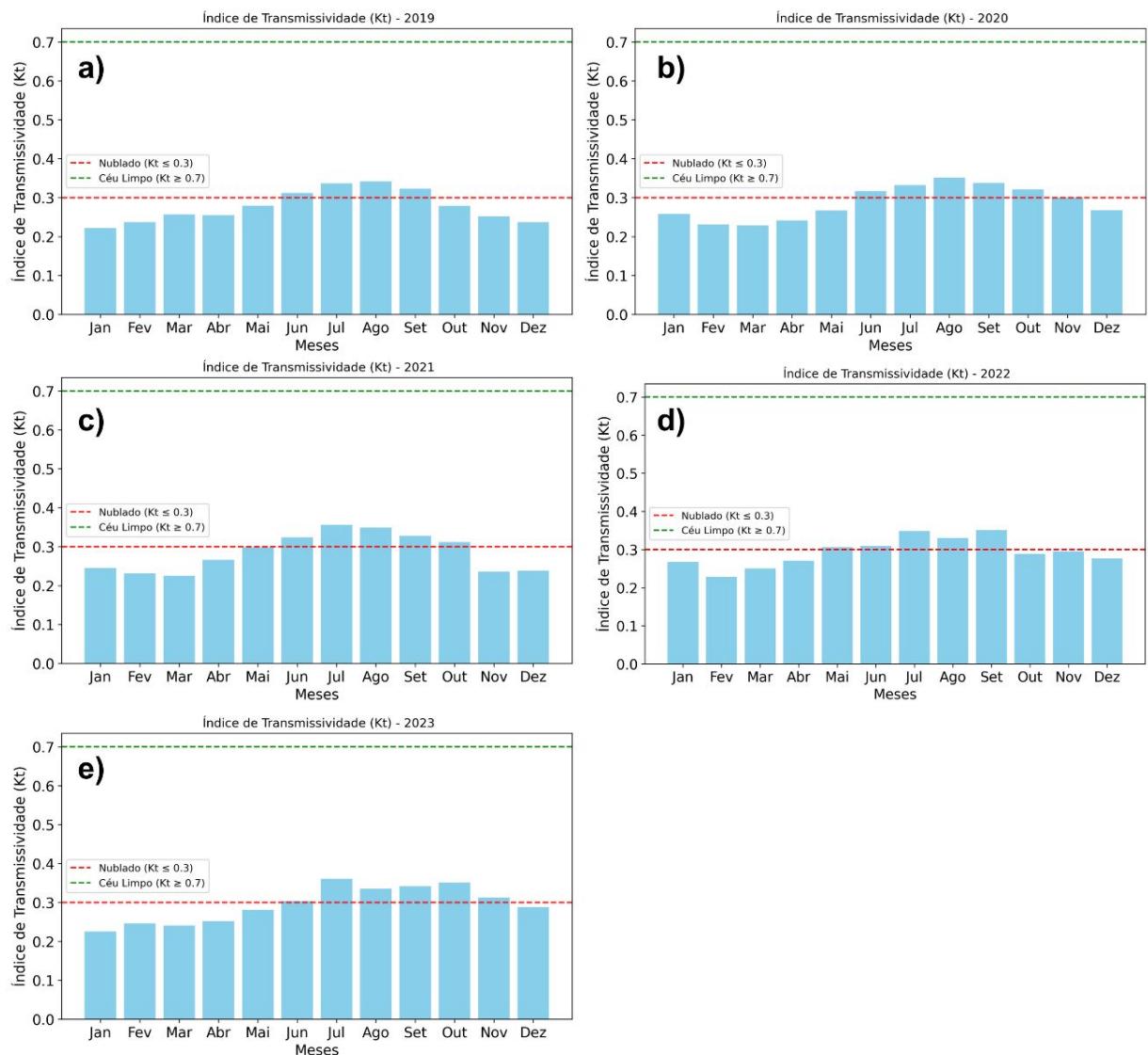


Figura 10 - Classificação Kt segundo Iqbal (1983) para cada ano separado: a) 2019; b) 2020; c) 2021; d) 2022; e) 2023.

Fonte: Autora (2025)

Com base nessa classificação, observa-se na média dos anos estudado (Figura 10) que durante o período chuvoso os índices de transmissividade se mantêm, em sua maioria, abaixo de 0,30, caracterizando predominância de céu nublado. Durante a estação seca e o mês de outubro, os valores de Kt aumentam, situando-se entre 0,31 e 0,35, indicando predominantemente condições de céu parcialmente nublado.

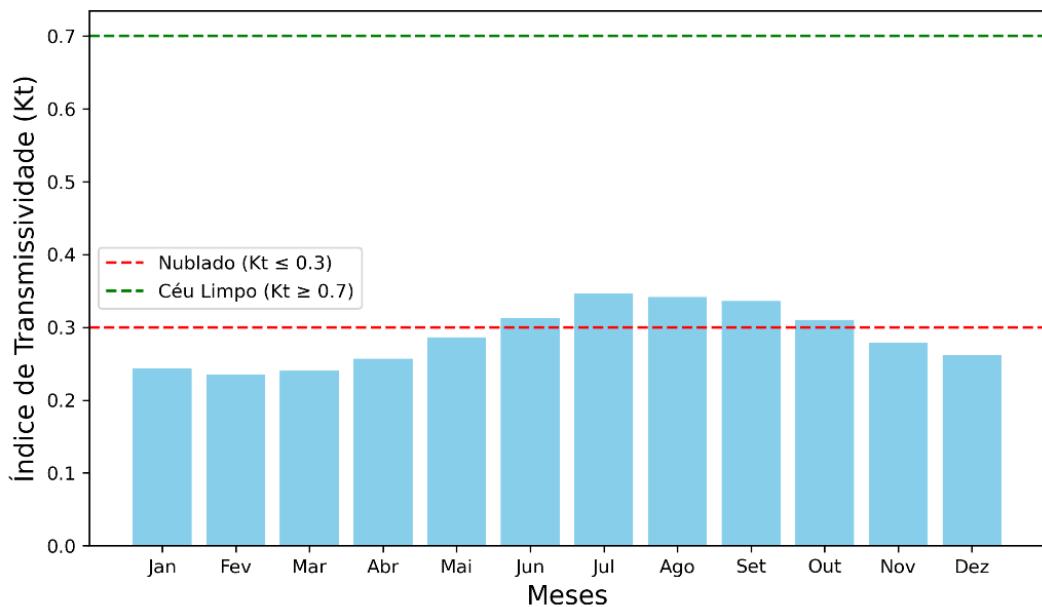


Figura 11 - Classificação Kt segundo Iqbal (1983) para médias mensais dos anos 2019 a 2023.

Fonte: Autora (2025)

Portanto é possível observar que os meses pertencentes ao período seco apresentam maior Índice de Transmissividade (Kt), enquanto os do período chuvoso registram os menores índices, corroborando com Martins et al. (2014), que também observou que considerando todo o ano, as manhãs, em geral, foram classificadas como Parcialmente Nublado.

7.3 Energia solar e sua correlação com as variáveis meteorológicas

Neste tópico serão apresentados os resultados sobre a simulação de energia solar e sua correlação com as variáveis meteorológicas: radiação solar, temperatura e nebulosidade.

Com base nos dados de irradiação solar diária média mensal obtidos do programa SunData (Tabela 7) e considerando as características do painel fotovoltaico especificado (Tabela 2), foi realizada a estimativa da energia fotovoltaica mensal gerada em Humaitá.

Tabela 7 - Irradiação solar diária média mensal ($\text{kWh/m}^2.\text{dia}$) segundo CRESESB.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
Im	4,01	4,24	4,26	4,27	4,01	4,63	4,79	5,17	4,93	4,77	4,38	4,13	4,46

Fonte: Autora (2025)

A Tabela 8 apresenta os valores de energia fotovoltaica mensal gerada para um único módulo, considerando uma área de $2,18 \text{ m}^2$, uma eficiência de 21,3%, e uma inclinação do painel de 8° , que representa a melhor condição média anual de captação

de radiação solar para a localidade.

Souza (2016) ressalta a importância de avaliar radiação solar por um período mínimo de um ano para iniciar qualquer projeto de energia solar. Sendo que quanto menor a variabilidade dos valores de radiação, melhor é para o dimensionamento do sistema fotovoltaico para estabilidade de geração de eletricidade.

Tabela 8 - Energia fotovoltaica gerada mensal (kWh/mês) simulada.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
ENERGIA						64,5					61,0		
	55,86	59,06	59,34	59,48	55,86	0	66,73	72,02	68,68	66,45	1	57,53	62,21

Fonte: Autora (2025)

Observa-se que os valores de energia gerada variam entre 55,86 kWh/mês (janeiro e maio) e 72,02 kWh/mês (agosto). A maior produção é registrada nos meses correspondentes ao período de seca, entre junho e setembro, estendendo para o mês de outubro, refletindo a maior disponibilidade de radiação solar observada neste período.

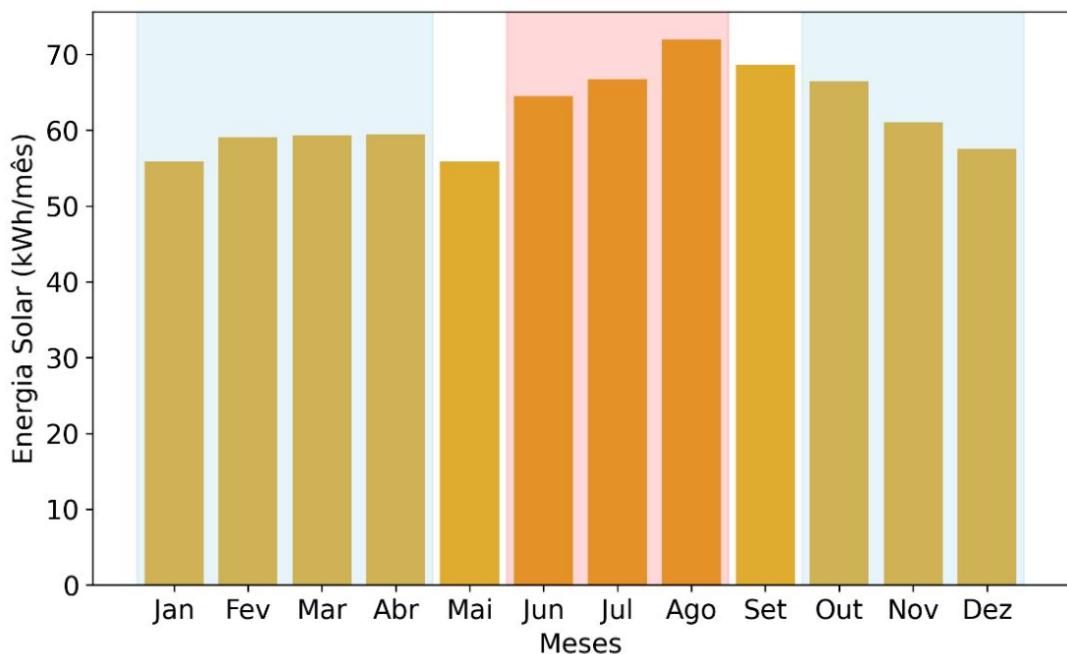


Figura 12 - Variação mensal da energia solar fotovoltaica simulada.

Fonte: Autora (2025)

Agosto destaca-se como o mês com maior geração fotovoltaica, seguido de setembro (68,68 kWh/mês) e julho (66,73 kWh/mês), em consonância com os maiores valores médios de irradiação solar (Tabela 7). Já os menores valores são observados nos meses de janeiro e maio, que fazem parte ou estão próximos do período chuvoso, marcado por maior nebulosidade e menor incidência de radiação solar.

De modo geral, a média anual estimada de geração fotovoltaica é de aproximadamente 62,21 kWh/mês para o painel considerado, indicando um bom

potencial para a implementação de sistemas fotovoltaicos no município, especialmente durante a estação seca, quando as condições atmosféricas são mais favoráveis.

É importante destacar que os valores estimados não consideram perdas adicionais, como as associadas ao sistema de inversores, cabeamento ou acúmulo de sujeira nos painéis, podendo, portanto, superestimar ligeiramente a produção real de energia.

Os resultados obtidos reforçam que Humaitá compartilha das condições climáticas observadas para a Região Norte como um todo, com a incidência de radiação solar estável ao longo do ano o que expressa um grande potencial para geração solar fotovoltaica, como também destacado por autores que apontam esta tecnologia como estratégica para a diversificação energética e o desenvolvimento sustentável na região (Souza, 2016; Alves, 2024).

O teste de Shapiro-Wilk, para verificar a distribuição dos dados, indicou estatística de teste próximas de 1, onde todas as variáveis apresentaram p-valor > 0,05 (Tabela 9), ou seja, não há evidência estatística de que elas violem a normalidade. Portanto, para este estudo foi aplicada a correlação de Pearson, que pressupõe normalidade dos dados.

Tabela 9 - Teste Shapiro-Wilk

VARIÁVEL	ESTATÍSTICA	P-VALOR	DISTRIBUIÇÃO
ENERGIA	0,9244	0,3248	Normal
RADIAÇÃO	0,8740	0,0734	Normal
TEMP. MÁX.	0,8762	0,0784	Normal
KT	0,9139	0,2396	Normal

Fonte: Autora (2025)

O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida de associação linear entre variáveis, variando de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis (Kozak, 2009).

Uma correlação é considerada perfeita quando atinge valores -1 ou 1, onde correlação perfeita positiva demonstra que as duas variáveis aumentam juntas, e uma correlação perfeita negativa demonstra que uma variável aumenta enquanto a outra diminui. Já uma correlação de valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis (Figueiredo Filho e Silva Júnior, 2009).

Dancey e Reidy (2006) classificaram da seguinte forma: $r = 0,10$ até $0,30$ (fraco); $r = 0,40$ até $0,6$ (moderado); $r = 0,70$ até 1 (forte).

A análise dos resultados da correlação de Pearson entre a energia solar fotovoltaica estimada e as variáveis meteorológicas (Tabela 10) revelou que todas as variáveis apresentaram relações fortes e estatisticamente significativas, uma vez que os valores de r estão mais próximos a 1 e o p-valor indica $p < 0.05$.

Tabela 10 - Correlação de Pearson

PAR DE VARIÁVEIS	CORRELAÇÃO (R)	P-VALOR
ENERGIA × RADIAÇÃO	0,8697	0,0002
ENERGIA × TEMP.MAX	0,9117	0,0000
ENERGIA × Kt	0,8610	0,0003
RADIAÇÃO × TEMP.MAX	0,9770	0,0000
RADIAÇÃO × Kt	0,8585	0,0004
TEMP.MAX × Kt	0,8958	0,0001

Fonte: Autora (2025)

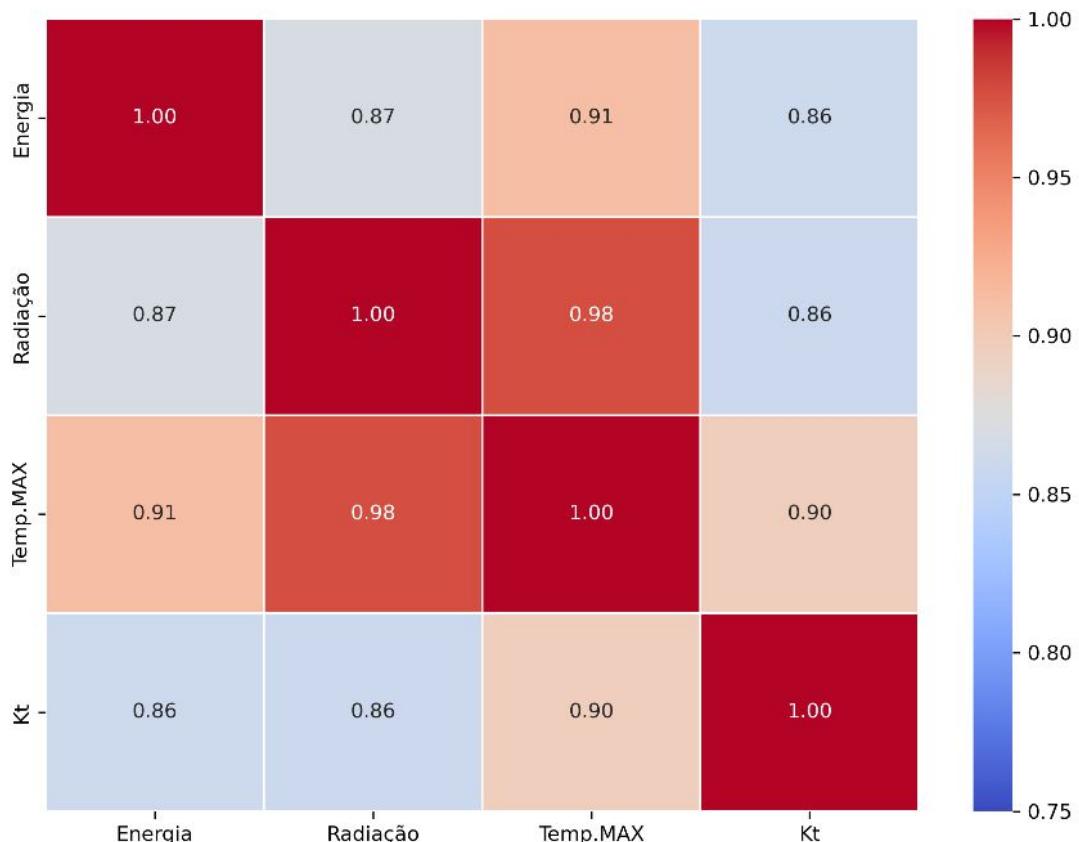


Figura 13 - Heatmap da correlação de pearson para variáveis estudadas.
Fonte: Autora (2025)

Observa-se que a variável Temperatura Máxima apresentou a maior correlação com a energia gerada ($r = 0,91$), indicando que meses com temperaturas máximas mais elevadas tendem a estar associados a uma maior produção de energia solar.

Apesar de a literatura demonstrar que o aumento da temperatura reduz a eficiência dos módulos fotovoltaicos (Simioni, 2017; Costa, Hirashima e Ferreira, 2021; Piotrowski, Vaz e Farret, 2021), os dados do presente estudo indicam uma forte correlação positiva entre a temperatura máxima e a energia gerada, isso ocorre porque a temperatura máxima não atua de forma isolada sobre os módulos, mas sim como um indicador indireto da radiação solar, que é o principal fator responsável pela geração de energia.

Este resultado poderia ser interpretado como uma correlação espúria caso outras variáveis meteorológicas não estivessem sendo consideradas na análise. Por exemplo, na ausência da variável radiação solar, esta atuaria como uma *lurking variable* (variável oculta), influenciando simultaneamente tanto a temperatura máxima quanto a energia gerada. Tal omissão poderia induzir a uma interpretação equivocada, sugerindo que a temperatura máxima seria a responsável direta pela variação na produção de energia, quando, na realidade, seria a radiação solar a verdadeira responsável por essa associação aparente (Figueiredo Filho; Silva Júnior, 2009).

Essa constatação ressalta a relevância de se incluir mais variáveis na análise, permitindo uma compreensão mais precisa das interações envolvidas no estudo.

Tal ideia é confirmada quando se observa que a radiação e a temperatura apresentam forte correlação ($r = 0,98$), o aumento da temperatura é observado nos meses em que há maior incidência solar — como nos meses secos — resultando em um aumento na produção total de energia, mesmo com perdas térmicas relativas.

De acordo com Skoplaki e Palyvos (2009), a temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos é fortemente influenciada pela radiação solar incidente, enquanto a temperatura do ar possui impacto mais limitado.

Embora o aumento da temperatura reduza a eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos, esse efeito pode ser parcialmente compensado por dias com maior irradiância solar. Huld et al. (2010) destacam que a temperatura do módulo é fortemente influenciada pela irradiância, e que existe correlação positiva entre radiação solar e temperatura do ar durante o dia.

A radiação e energia também possuem uma forte correlação ($r=0,87$), o que confirma que quanto maior a radiação solar, maior é a geração de energia fotovoltaica. Tal resultado também é observado no estudo de Alves et al., (2021), onde a radiação solar e a geração de energia fotovoltaica apresentaram uma correlação

estatisticamente significativa ($R = 0,70$).

O Índice de Transmissividade (Kt), também demonstrou uma correlação moderadamente forte com a energia ($r = 0,86$), reforçando a influência das condições de nebulosidade sobre a geração fotovoltaica. A correlação da radiação e Kt ($r=0,86$) reforça que quanto menor o kt menor é radiação que chega a superfície terrestre, uma vez valores de Kt baixos representam céu nublado ou parcialmente nublado (Iqbal, 1983).

8. CONCLUSÃO

Conclui-se que o município de Humaitá, Amazonas, apresenta condições meteorológicas favoráveis para a implantação de sistemas de energia solar fotovoltaica, evidenciando que a geração de energia solar fotovoltaica para o município é fortemente influenciada não apenas pela radiação solar disponível, mas também por outras variáveis meteorológicas, que devem ser levadas em consideração para maximizar a produção de energia durante o ano.

A análise da radiação solar revelou uma média anual estável, com os maiores valores registrados durante o período seco e menores índices no período chuvoso. Quanto a temperatura do ar, as médias mostraram-se elevadas durante todo o ano, com picos no período seco. Embora esses valores induzam a perda de eficiência dos módulos fotovoltaicos, o ganho associado à alta irradiação no período seco supera tais perdas.

Já nebulosidade, quantificada pelo Índice de Transmissividade (Kt), confirmou a sua influência na atenuação da radiação solar. Apesar de ser um fator limitante, a disponibilidade de radiação difusa mantém a viabilidade da geração de energia ao longo de todo o ano.

Enquanto a simulação da energia fotovoltaica gerada para um painel, apresentou variações sazonais que refletem o comportamento da radiação solar. Esses resultados indicam condições favoráveis para a adoção de sistemas fotovoltaicos, contribuindo para a diversificação da matriz energética local e reduzindo a dependência de fontes convencionais, contribuindo diretamente com os Objetivos de desenvolvimento sustentável.

Por fim, a correlação entre as variáveis meteorológicas e a energia gerada evidenciou que a radiação solar é o fator determinante para a produção fotovoltaica,

enquanto a temperatura e a nebulosidade atuam como variáveis secundárias, mas ainda relevantes para o dimensionamento dos sistemas.

Portanto o município de Humaitá apresenta um potencial energético solar significativo, validando a hipótese central do estudo. A energia solar fotovoltaica emerge como uma alternativa viável e promissora para a Amazônia, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7, 11 e 13) ao promover a segurança energética e a preservação ambiental. Recomenda-se a realização de estudos complementares que considerem aspectos técnicos, econômicos e sociais para a viabilização de projetos fotovoltaicos, bem como a elaboração de políticas públicas que incentivem a transição energética na região.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Infográfico.** Associação Brasileira de Energia Solar. 2025. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/>. Acesso em: 07 maio 2025.

ABSOLAR. **Entenda como funciona a energia solar fotovoltaica.** Associação Brasileira de Energia Solar. 2024. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/o-que-e-energia-solar-fotovoltaica/#:~:text=ABSOLAR%20-%20Associa%C3%A7%C3%A3o%20Brasileira%20de%20Energia%20Solar%20Fotovoltaica,de%20eletricidade%20produzido%20pode%20voltar%20para%20a%20rede>. Acesso em: 10 maio 2024.

ABSOLAR. **Evolução da energia solar causa impacto positivo na economia e no meio ambiente.** Associação Brasileira de Energia Solar. 2024. Disponível: <https://www.absolar.org.br/noticia/https-batatais24h-com-br-noticia-2518-evolucao-da-energia-solar-causa-impacto-positivo-na-economia-e-no-meio-ambiente/>. Acesso: 28 maio 2024.

ABSOLAR. **Manaus já é a 10ª cidade do Brasil que mais instalou painéis de energia solar em 2021.** Associação Brasileira de Energia Solar. 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/manaus-ja-e-a-10a-cidade-do-brasil-que-mais-instalou-paineis-de-energia-solar-em-2021/>. Acesso em: 22 abril 2024.

ALMEIDA, H. A. de. **Climatologia Aplicada à Geografia.** Campina Grande: EDUEPB, p. 317, 2016.

ALVES, A. R. C.; FRANCO, J. R.; MOURA, E. R.; NAGATA, K. M, R.; SANTOS, I. I.; OLIVEIRA, L. L. A radiação solar é efetiva o ano inteiro para geração de energia solar fotovoltaica em Santarém-PA, Amazônia, Brasil? **Conjecturas**, v. 21, n. 5, p. 510–522, 2021. DOI: 10.53660/CONJ-275-211.

ALVES, P. V; REIS, L. H. S.; GOIS, D. A. ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR EM HUMAITÁ-AM, BASEADO EM DADOS DE RADIAÇÃO DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA DO INMET. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar.** 2018, Gramado- RS.

ALVES, S. T. POTENCIAL DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM RESIDÊNCIAS NA REGIÃO NORTE DO BRASIL. **Revista Sesest**, v. 6, n. 1, 2024. Disponível em: <https://revistasesest.com.br/potencial-da-energia-solar-fotovoltaica-para-geracao-distribuida-em-residencias-na-regiao-norte-do-brasil/>. Acesso em: 12 abr. 2025.

Elétricas de Arranjos Fotovoltaicos - Requisitos de Projeto. Rio de Janeiro, p. 65. 2019.

AQUINO, P. S. A.; SILVA, J. D. C. Geração solar. **Brazilian Applied Science Review**, v.3, n.1, p.370-378, 2019.

BESERRA, A. S.; LEMOS, H. T. Q. **Simulação e análise da influência da radiação e temperatura no desempenho de módulos fotovoltaicos**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, 2019.

BEZERRA, E. EDIFÍCIO SOLAR FOTOVOLTAICO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS: O PIONEIRISMO NA PRODUÇÃO DE ENERGIA SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA. **REVISTA GEONORTE**. v.14, n.43, p. 199-217, 2023.

BURNETT, D.; BARBOUR, E.; HARRISON, G.P. The UK solar energy resource and the impact of climate change. **Renewable Energy**, v. 71, p. 333-343, 2014.

BURSZTYN, M. Energia solar e desenvolvimento sustentável no Semiárido: o desafio da integração de políticas públicas1. **Estudos Avançados**, v. 34, n. 98, p. 167-186, 2020.

CAVALCANTE, R. L.; COSTA, T. O.; ALMEIDA, M. P.; WILLIAMSON, S.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. Photovoltaic penetration in isolated thermoelectric power plants in Brazil: Power regulation and specific consumption aspects. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 129, p. 1-17, fev. 2021.

CLIMATE POLICY INITIATIVE. **A transição energética na Amazônia Legal**. 2023. Disponível em: <https://www.climatepolicyinitiative.org/pt-br/publication/a-transicaoenergetica-na-amazonia-legal/>. Acesso em: 11 nov. 2023.

CONFORTEC. On-Grid X Off-Grid: Qual Escolher?. 2021. Disponível: <https://confortec.com.br/on-grid-off-grid-recomendado/>. Acesso: 06 de maio 2025

COSTA, A. L. C.; HIRASHIMA, S. Q. da S.; FERREIRA, R. V. Operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos FV. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 201–220, out./dez. 2021.

COSTA, H. C. **O uso da gestão de projetos na implementação de energia fotovoltaica em órgãos públicos: uma revisão sistemática**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus Centro, Manaus, p.81, 2022.

CRESESB/CEPEL. **Energia Solar Fotovoltaica**. 2008. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321. Acesso em: 08 abril 2024.

CRESESB/CEPEL. Potencial Solar – SunData v 3.0. 2018. Disponível em: <https://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 08 abril 2024.

DALFOVO, W.; ZILIO, P. C.; SORNBERGER, G; REDIVO, A. A Viabilidade Econômica da implantação de Energia Solar Fotovoltaica para a redução dos custos com energia elétrica das famílias com diferentes níveis de renda: uma análise para a região norte de Mato Grosso. **Sociedade, Contabilidade e Gestão**, v. 14, n. 3, p. 118-143, 2019.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. Porto Alegre, Artmed. 2006.

DELGADO, D. B. M. **OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA DE POLIGERAÇÃO INCLUINDO ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E BIOMASSA: Estudo de caso em um hospital paraibano**. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) - Universidade Federal de Paraíba, João Pessoa - PB, 177 p, 2015.

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A.; PEREIRA, F. O. R. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV TT - Strategies towards Net Zero Energy Office Buildings in Brazil with emphasis on BIPV. **Ambiente Construído**, v.14, n.3, p.27-42, 2014.

ECYCLE. **O que é o aquecimento global e suas consequências**. 2024. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/aquecimento-global/>. Acesso em: 15 maio 2024.

ESPOSITO, A.; FUCHS, P. Desenvolvimento Tecnológico e Inserção da Energia Solar no Brasil. **Revista do BNDES**, n. 40, dez. 2013.

EPE (Empresa Planejamento Energético). **ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA 2023**. Disponível: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso: 22 jan. 2024.

FAPESP. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo: FAPESP, InterAcademy Council, 2007.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados: Estatística e Modelagem Multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017

FERREIRA, A. G. **Meteorologia prática**. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115–146, 2009.

FRANCISCO, A. C. C., VIEIRA, H. E. M., ROMANO, R. R.; ROVEDA, S. R. M. M.

Influência de parâmetros meteorológicos na geração de energia em painéis fotovoltaicos: um caso de estudo do Smart Campus Facens, SP. urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, 2019.

FATTORI, P.A.; CEBALLOS, J. C. **Glossário de termos técnicos em radiação atmosférica**, 2005.

FOUADA, M. M.; SHIHATAB, L. A.; MORGAN, E. I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 80, pp. 1499–1511, 2017.

GALVÃO, W. F.; SOUZA, A. L.; QUERINO, C. A. S.; QUERINO, J. K. A. S.; MOURA, M. A. L.; ALVES, L. S.; GOMES, B. S. Validação da radiação solar global do era5-Land para o município de Humaitá-Amazonas. ES - **Engineering and Science**, vol 13, n 4 – Edição Especial. 2024.

GAMBHIR, Ajay et al. Energy system changes in 1.5 C, well below 2 C and 2 C scenarios. **Energy Strategy Reviews**, v. 23, p. 69-80, 2019.

GASTLI, A.; ARMENDÁRIZ, J. S. M. Challenges facing grid integration of renewable energy in the GCC region. EU-GCR Renew. **Energy Policy Expert**. Work. 2013.

HERNANDEZ, R. R. et al. Environmental impacts of utility-scale solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p.766-779, jan. 2014.

HULD, T.; GOTTSCHALG, R.; BEYER, H. G.; TOPIC, M. Mapping the performance of PV modules, effects of module type and data averaging. **Solar Energy**, v. 84, n. 2, p. 324–338, 2010.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Portal do IBGE**. 2023. Disponível: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/am/humaita.html>. Acesso: 01 maio 2024

IEMA (Instituto de Energia e Meio Ambiente). **EXCLUSÃO ELÉTRICA NA AMAZÔNIA LEGAL: QUEM AINDA ESTÁ SEM ACESSO À ENERGIA ELÉTRICA?**. São Paulo, 2020. Disponível: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2021/02/IEMA_amazonia_energiaelétrica.pdf. Acesso: 01 dez. 2023.

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de Conversores Estáticos Para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 146p, 2007.

IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**. Academic Press. Toronto, 1983.

JIANG H.; LU, N.; YAO, L.; QIN, J.; LIU, T. Impact of climate changes on the stability of

solar energy: Evidence from observations and reanalysis. **Renewable Energy**. Vol 208, p. 726-736, 2023.

KIES, A.; SCHYSKA, B.U.; BILOUSOVA, M.; EL SAYED, O.; JURASZ, J.; STOECKER, H. Critical review of renewable generation datasets and their implications for European power system models. **Renew. Sustain. Energy Rev.** 2021.

KOZAK, M. **What is strong correlation?**. Teaching Statistics, 31: 85-86, 2009.

LOFHAGEN, J.; HAWKINS, C. Influência de parâmetros meteorológicos na geração de energia em painéis fotovoltaicos. Revista Brasileira de Gestão Urbana, ed. 20190027, p. 1/15, 2019.

LOPES, M. D. M.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. **TRANSPORTES**, v. 21, n. 1, p. 59, 2013.

LUBE, P.; WINTER, E.; MORAES, S. M. M.; MONSORES, K. G. C.; DUSEK, P. M. A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO CONTEXTO DOS ODS 7 E 13. **Epitaya E-books**, v. 1, n. 92, p. 61-70, 2024.

LUCON, O.; GOLDEMBERG, J. Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 23, n. 65, p. 121-130, 2009.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 7, n. 1, p.126-143, 2015.

MAGALHÃES, M. V. **ESTUDO DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA COMO FONTE GERADORA DE ENERGIA NO BRASIL**. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

MARGARIDO, G. N.; TRIGOSO, F. B. M.; FRAJUCA, C. Avaliação do impacto da temperatura no rendimento da produção de energia fotovoltaica: estudo de caso. Geoambiente On-line, Jataí-GO, n. 39, p. 1–14, jan./abr. 2021.

MARIANO, J. A.; JUNIOR, J. U. Energia solar fotovoltaica: Princípios fundamentais. Ponta Grossa, PR: Atena, p. 224, 2022.

MARTINS, P. A. S; QUERINO, C. A. S.; QUERINO, J. K. A. S et al. Updating of the Köppen and Thornthwaite and Mather (1955) climate classification system for the Southern Amazonas. **REVISTA DO DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**, São Paulo, v. 43, p. 01–13, 2023.

MARTINS, P. A. S.; QUERINO, C. A. S.; PAVÃO, V. M.; QUERINO, J. K. A. S; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. VERIFICAÇÃO DA TURBIDEZ ATMOSFÉRICA EM HUMAITÁ-AM. **Revista EDUCAmazônia – Educação Sociedade e Meio Ambiente**.

Vol XII, n 1, p. 86-98, 2014.

MARTINS, F. R.; E.B. PEREIRA, S.A.B. SILVA, S.L. ABREU. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment. **Energy Policy**, v. 36, n. 8, p. 2853-2864, 2008.

MELLO, G. O. L. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA GERADA POR PLACAS FOTOVOLTAICAS**. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Ciência dos Materiais), FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL - UFMS, 2017, p. 53.

MOREIRA, B. L. M.; JUNIOR, J. C. L.; MACHADO, A. L. S. DESAFIOS E PERSPECTIVAS DA ENERGIA SOLAR EM MANAUS. **Revista Foco**, Curitiba (PR), v.17, p.01-18, 2024.

NASCIMENTO, R. L. ENERGIA SOLAR NO BRASIL: SITUAÇÃO E PERSPECTIVAS. **Consultoria Legislativa: Estudo Técnico**. 2017.

NEOSOLAR. **Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes**. 2024. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>. Acesso em: 10 fev. 2024.

OHUNAKIN, O.S.; ADARAMOLA, M.S.; OYEWOLA, O.M.; MATTHEW, O.J.; FAGBENLE, R.O. The effect of climate change on solar radiation in Nigeria. **Solar Energy**, v. 116, p. 272-286, 2015

OLIVEIRA, E. A. F; FILHO, J. G. A. Perspectivas da geração e aplicação da energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão da literatura (2015-2019). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**. v.12 - n.5, 2021.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - As Nações Unidas no Brasil**. 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 06 de maio de 2025.

PEREIRA, N. X. **Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual Paulista, Sorocaba (SP), 2019.

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, p. 80, 2017.

PERREIRA, O. S.; REIS, T. M.; RÜTHER, R. Amazon energy transition: The need to accelerate emission reduction by the extensive adoption of solar photovoltaics and storage in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 80, p. 1-13, jun. 2024.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**.

Rio de Janeiro: CEPEL, 2014.

PIRES, P. V. L.; LIMA, T. C.; OLIVEIRA, G. V. Estudo da conexão de módulos solares fotovoltaicos à rede elétrica de distribuição. **ANALECTA**: Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora, v.5, n.5, p.1-18, 2019.

PYRINA, M.; HATZIANASTASSIOU, N.; MATSOUKAS, C.; FOTIADI, A. Cloud effects on the solar and thermal radiation budgets of the Mediterranean basin. **Atmospheric Research**, v. 152, p. 14-28, 2015.

PIOTROWSKI, L. J.; VAZ, É. F.; FARRET, F. A. **Otimização da geração de energia elétrica fotovoltaica pelo controle da temperatura**. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, 2021.

PORTAL SOLAR. **Energia Solar em Amazonas**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-em-amazonas>. Acesso em: 22 abril 2024.

PORTAL SOLAR. **Novidades de tecnologia em energia solar**. Disponível em <https://www.portalsolar.com.br/novidades-de-tecnologia-em-energia-solar>. Acesso em 10 abril 2024.

PORTA SOLAR. **Lei 14300: mudanças com o Marco Legal da Geração Distribuída. 2024**. Disponível: <https://www.portalsolar.com.br/lei-14300>. Acesso: 20 jan. 2024

QUERINO, C.A.S.; Moura, M.A.L.; Querino, J.K.A. da S.; VON RADOW, MARQUES FILHO, A. de O. Estudo da radiação solar global e do índice de transmissividade (KT), externo e interno, em uma floresta de mangue em AlagoasBrasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.2, p.204-294, 2011.

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

SHAYANI, R. A.; OLIVEIRA, M. A. G.; CARMAGO, I. M. T. **Comparação do Custo entre Energia Solar Fotovoltaica e Fontes Convencionais. Congresso: Políticas públicas para a Energia: Desafios para o próximo quadriênio**. Brasília -DF, 2006.

SILVA, F. A. **Estimativa da redução de custos com a implantação de sistema solar de geração de energia elétrica na ETA Tauá**. Dissertação (Especialização em Elaboração e Gerenciamento de Projetos Para A Gestão Municipal de Recursos Hídricos) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2016.

SILVA, H. M. F; ARAÚJO, F. J. C. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Revista Ibero-Americana de Humanidades**,

Ciências e Educação. 8. 859-869. 10.51891/rease.v8i3.4654, 2022.

SILVA, V. O.; SANTOS, F. G.; DINIZ, I. N.; BAITELLO, R. L.; FERREIRA, A. L. Photovoltaic systems, costs, and electrical and electronic waste in the Legal Amazon: An evaluation of the Luz para Todos Program. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 203, p. 1-16, jul. 2024.

SILVA, F. R.; SILVA, O. R.; LIMA, F. L.; BASTOS, W. F. Difusão da inovação tecnológica: um estudo sobre a difusão da energia elétrica fotovoltaica no Brasil. **Revista Tecnologia**, v. 40, n.2, p.1-12, 2019.

SILVA, V. A. M. **Influência da cobertura do céu na estimativa da Radiação Solar utilizando modelo digital de elevação.** Dissertação de Mestrado em Física Ambiental, UFMG, Cuiabá. 2011.

SIMIONI, T. **O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil.** 204 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J.A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. **Renewable Energy**, n. 34, p. 23–29, 2009.

SOLOTUDO. **Entenda o que é irradiação solar e como produzir energia fotovoltaica até em dias nublados.** 2023. Disponível: <https://www.solutudo.com.br/rj/cb-frio/noticias/sollagos-energia-sustentavel/17972631/detalhes/entenda-o-que-e-irradiacao-solar-e-como-produzir-energia-fotovoltaica-ate-em-dias-nublados/73534>. Acesso em: 06 de maio 2025.

SOUZA, M. P. **ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR COMO FONTE ALTERNATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA CIDADE DE MANAUS – AM.** 33 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

SOUZA, R. A. **Estudo de caso de implantação de um sistema de energia solar fotovoltaica em uma instituição pública de educação superior.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

SOUZA, A. B.; OLIVEIRA, A. L. Benefícios ambientais da energia fotovoltaica. **Revista Interface Tecnológica**, v.16, n. 2, p.287-298, 2019.

SPADUTO, R. R.; MELO, F. C.; CARVALHO, R. A. S.; FREITAS, L. C. G. Projeto de Um Sistema Fotovoltaico de 2,16 Kwp Conectado à Rede Elétrica. In: **Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL)**, Uberlândia. Anais eletrônicos. Uberlândia: UFU, p. 1 – 6, 2013.

TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

VÁZQUEZ, R.; CABOS, W.; NIETO-BORGE; J. C.; GUTIERREZ, C. Complementarity of offshore energy resources on the Spanish coasts: Wind, wave, and photovoltaic energy. *Renewable Energy*, Vol. 224, 2024.

VIEIRA, Magno; SANTOS, Aislan. O Meio Ambiente Sustentável e a Energia Solar. **Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas**. Sergipe, v.1, n.15, p. 131-139, out, 2012.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Érica, p. 224, 2012.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica** (2. ed.) Tatuapé: Érica Ltda, 2018.

WILCZAK, J. M.; AKISH, E.; CAPOTONDI, A; GILBERT P. C. Evaluation and Bias Correction of the ERA5 Reanalysis over the United States for Wind and Solar Energy Applications. *Energies*, 17, 2024.

YANG, D.; BRIGHT, J. M. Worldwide validation of 8 satellite-derived and reanalysis solar radiation products: A preliminary evaluation and overall metrics for hourly data over 27 years. *Solar Energy*. Vol. 210, p. 3-19, 2020.

ZILLES, R., MACÊDO, W. N., GALHARDO, M. A. B., DE OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** (1^a ed). São Paulo, Oficina de textos. 2012