



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
BACHARELADO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

GABRIEL HENRIQUE PIMENTEL RAMOS

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA NA CAPTAÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR A PARTIR
DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS NA CIDADE DE SANTARÉM-PA**

**SANTARÉM - PA
2025**

GABRIEL HENRIQUE PIMENTEL RAMOS

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA NA CAPTAÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR A PARTIR
DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS NA CIDADE DE SANTARÉM-PA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido para
obtenção de Grau de Bacharelado em Ciências
Atmosféricas, Universidade Federal do Oeste do Pará,
Instituto de Engenharia e Geociências.
Orientador: Theomar Trindade de Araújo Tiburtino Neves

**SANTARÉM - PA
2025**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

R175a Ramos, Gabriel Henrique Pimentel

Análise da eficiência na captação de radiação solar a partir de painéis solares fotovoltaicos na cidade de Santarém-PA. / Gabriel Henrique Pimentel Ramos. - Santarém, 2025.

43 p. : il.

Inclui bibliografias.

Orientador: Theomar Trindade de Araújo Tiburtino Neves.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências, Bacharelado em Ciências Atmosféricas.

1. Energia renovável. 2. Painéis fotovoltaicos. 3. Irradiância. I. Neves, Theomar Trindade de Araújo Tiburtino, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 621.47098115

GABRIEL HENRIQUE PIMENTEL RAMOS

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA NA CAPTAÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR A PARTIR
DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS NA CIDADE DE SANTARÉM-PA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido para
obtenção de Grau de Bacharelado em Ciências
Atmosféricas, Universidade Federal do Oeste do Pará,
Instituto de Engenharia e Geociências.

Orientador (a):

Prof. Dr. Theomar Trindade de Araújo Tiburtino Neves
(Universidade Federal do Oeste do Pará)



Documento assinado digitalmente
THEOMAR TRINDADE DE ARAUJO TIBURTINO NEVES
Data: 17/03/2025 15:47:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador (a):

Prof. Dr. Antônio Marcos Delfino de Andrade
(Universidade Federal do Oeste do Pará)



Documento assinado digitalmente
ANTONIO MARCOS DELFINO DE ANDRADE
Data: 17/03/2025 11:00:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador (a):

Prof. Dra. Cintya de Azambuja Martins
(Universidade Federal do Oeste do Pará)



Documento assinado digitalmente
CINTYA DE AZAMBUJA MARTINS
Data: 17/03/2025 15:31:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

Ata de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso do Bacharelado em Ciências Atmosféricas

Aos vinte e oito (28) dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e cinco (2025), conduzida na sala 204 bloco B do Núcleo de Sala de Aula (NSA), na unidade Tapajós da Universidade Federal do Oeste do Pará, realizou-se a sessão pública de defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do Bacharelado em Ciências Atmosféricas do Aluno *Gabriel Henrique Pimentel Ramos*, intitulado **ANÁLISE DA EFICIÊNCIA NA CAPTAÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR A PARTIR DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS NA CIDADE DE SANTARÉM-PA**. Compuseram a banca examinadora os professores doutores Theomar Trindade de Araújo Tiburtino Neves (Orientador), Cintya de Azambuja Martins e Antônio Marcos Delfino de Andrade. Após a apresentação oral, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que se reuniram, separadamente, e decidiram pela **APROVAÇÃO**, com nota *oito* (8,0) o TCC. Para tornar válida as informações, segue assinatura da banca examinadora e discente:

Documento assinado digitalmente
gov.br THEOMAR TRINDADE DE ARAUJO TIBURTINO N
Data: 16/03/2025 20:45:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Theomar Trindade de Araújo Tiburtino Neves (Orientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br CINTYA DE AZAMBUJA MARTINS
Data: 13/03/2025 22:36:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Cintya de Azambuja Martins

Documento assinado digitalmente
gov.br ANTONIO MARCOS DELFINO DE ANDRADE
Data: 16/03/2025 20:34:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antônio Marcos Delfino de Andrade

Documento assinado digitalmente
gov.br GABRIEL HENRIQUE PIMENTEL RAMOS
Data: 17/03/2025 21:58:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gabriel Henrique Pimentel Ramos (Discente)

Dedico este trabalho à Universidade Federal do Oeste do Pará, em especial aos meus professores, familiares, amigos e sociedade.

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus, pela minha vida, saúde e por me direcionar nessa caminhada.

Ao meu orientador Dr. Theomar Trindade de Araújo Tiburtino Neves por todas as oportunidades, ele que tem me acompanhado desde o início da minha trajetória acadêmica, obrigada pela paciência, confiança, conselhos e principalmente por todo ensinamento.

À Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA) e ao Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelas bolsas de iniciação científica e pela oportunidade de expansão de conhecimento. Aos professores que tive o privilégio de obter conhecimento ao longo do curso, em especial aos professores Lucas Vaz Peres e Antônio Marcos Delfino de Andrade pelos incentivos e por todas as contribuições positivas ao longo dessa jornada.

Aos meus pais Francisco Elias Ramos da Silva e Ailda Sousa Pimentel Ramos, por todo o amor e apoio, para resistir às adversidades e por sempre me apoiarem em minhas empreitadas, por mais difíceis que venham a ser, este trabalho é tão deles quanto meu. E as minhas tias, Hildeth Sousa Pimentel Prata e Marcela de Sousa Pimentel Bandeira que me propuseram trabalhos informais que me ajudaram a custear minha trajetória na universidade.

A minha namorada, Ieza Farias, minha gratidão eterna. Seu apoio incondicional, paciência e incentivo foram essenciais para que eu pudesse concluir este trabalho. Nos momentos de cansaço e incerteza, suas palavras de motivação me deram força para seguir em frente. Obrigado por estar ao meu lado, acreditando em mim e compartilhando cada etapa dessa jornada.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado durante essa jornada, meus sinceros agradecimentos. Seja com momentos de descontração ou compartilhando desafios, vocês tornaram esse caminho mais leve e motivador. A amizade e o apoio de cada um foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente, enfrentando os obstáculos com mais determinação. Sou grato por ter pessoas tão especiais ao meu lado.

O fracasso quebra as almas pequenas e engrandece as grandes, assim como o vento apaga a vela e atíça o fogo da floresta.

Benjamin Franklin

RESUMO

A energia solar fotovoltaica vem se consolidando como uma alternativa viável e sustentável para a geração de eletricidade, especialmente em regiões com alta incidência de radiação solar, onde o uso dessa fonte renovável tem sido incentivado pelo seu potencial de reduzir impactos ambientais e a dependência de combustíveis fósseis. Com isso, este trabalho tem como objetivo analisar a validação da captação de radiação solar a partir de painéis solares na cidade de Santarém, PA, utilizando medições de sensores e informações meteorológicas, além de realizar a comparação entre o centro urbano e rural (Fazenda Experimental da UFOPA). Para isso, foram realizadas medições em dois pontos ao longo da área de estudo, utilizando painéis fotovoltaicos e três piranômetros sendo dois na área urbana e um na área rural, permitindo a comparação entre os valores de irradiância solar e a produção de energia dos painéis fotovoltaicos. Os dados analisados evidenciaram uma concomitância entre a produção fotovoltaica e a distribuição da chegada de radiação solar. Os resultados apontam uma forte correlação ($r = 0,99$) entre a irradiância solar e a eficiência da geração de energia, evidenciando uma relação direta entre as duas variáveis. A análise também demonstrou que, apesar das variações, a energia solar pode ser altamente produtiva, tendo como valor médio máximo registrado de 5479,15 W às 12:50 HL. A irradiância por sua vez possui diferença entre as áreas analisadas, sendo a urbana com maior incidência com valor médio máximo de 728,19 W m⁻² e a rural de 662,23 W m⁻². A comparação entre os equipamentos SP-LITE e ATMOS 41 mostrou pequenas discrepâncias, evidenciando diferenças nas sensibilidades instrumentais, sendo o SP-LITE mais sensível. Conclui-se que a produção instantânea média diária do sistema fotovoltaico revelou que a geração de energia varia conforme a incidência de radiação solar ao longo do dia, onde demonstrou eficiência significativa (>80%) mesmo em condições de menor irradiância. Apesar das diferenças nas sensibilidades instrumentais, ambos instrumentos mantem a coerência no padrão de variação da radiação medida. Por fim, os resultados confirmam a confiabilidade das medições, reforçando a previsibilidade da irradiância solar com base na produção fotovoltaica.

Palavras chaves: Energia renovável; Painéis fotovoltaicos; Irradiância;

ABSTRACT

Photovoltaic solar energy has been consolidated as a viable and sustainable alternative for generating electricity, especially in regions with a high incidence of solar radiation, where the use of this renewable source has been encouraged by its potential to reduce environmental impacts and dependence on fossil fuels. With this in mind, this work aims to analyze the validation of solar radiation capture from solar panels in the city of Santarém, PA, using sensor measurements and meteorological information, as well as making a comparison between the urban and rural centers (UFOPA Experimental Farm). To this end, measurements were taken at two points along the study area, using photovoltaic panels and three pyranometers, two in the urban area and one in the rural area, enabling a comparison between the solar irradiance values and the energy production of the photovoltaic panels. The data analyzed showed a concomitance between photovoltaic production and the distribution of incoming solar radiation. The results show a strong correlation ($r = 0.99$) between solar irradiance and energy generation efficiency, demonstrating a direct relationship between the two variables. The analysis also showed that, despite the variations, solar energy can be highly productive, with the maximum average value recorded being 5479.15 W at 12:50 HL. In turn, irradiance differed between the areas analyzed, with the urban area having the highest incidence with a maximum average value of 728.19 W m⁻² and the rural area 662.23 W m⁻². The comparative analysis between the SP-LITE and ATMOS 41 equipment showed small discrepancies, highlighting differences in instrumental sensitivities, with SP-LITE being more sensitive. It can be concluded that the average instantaneous daily production of the photovoltaic system revealed that energy generation varies according to the incidence of solar radiation throughout the day, where it showed significant efficiency (>80%) even in conditions of lower irradiance. Despite the differences in instrumental sensitivities, both maintain consistency in the pattern of measured radiation variation. Finally, the results confirm the reliability of the measurements, reinforcing the predictability of solar irradiance based on photovoltaic production.

Key words: Renewable energy; Photovoltaic panels; Irradiance;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição do espectro solar. O vermelho X sobre UVC significa que eles são bloqueados pela camada de ozônio.	17
Figura 2- Ilustração dos movimentos de rotação e translação, associados com a inclinação do eixo da Terra.	17
Figura 3 - Ilustração dos componentes da radiação solar global: direta, difusa e refletida.	18
Figura 4- Ilustração do ângulo azimutal e sua relação ao norte geográfico.	19
Figura 5- Perfil da irradiância solar ao longo de um dia.	20
Figura 6 - Matriz Elétrica Brasileira 2023.	21
Figura 7 - Representação de sistema solar off grid.	23
Figura 8 - Representação de sistema solar on grid.	24
Figura 9 - Princípio básico de funcionamento de um painel solar.	25
Figura 10 - Módulo com ângulo de inclinação.	26
Figura 11 - Esquema básico da composição de um painel solar.	27
Figura 12 - Representação dos diferentes tipos de material para produção células e módulos fotovoltaicos.	28
Figura 13 - a) Modelo do painel fotovoltaico. b) Painel fotovoltaico utilizado no trabalho. ...	30
Figura 14 - Instrumento ATMOS 41.	31
Figura 15- Instrumento piranômetro (SP-LITE).	31
Figura 16 – Instrumento Piranômetro (CPM10).	32
Figura 17 – Comportamento médio da variação diária da produção instantânea do sistema (ppv).	34
Figura 18 - Comportamento médio da variação horária da produção instantânea do sistema (ppv).	35
Figura 19 - Comportamento médio diário da incidência de radiação solar (SP-LITE).	36
Figura 20 - Comparação do comportamento entre medidas de irradiância dos instrumentos ST-LITE e ATMOS 41.	37
Figura 21 - Comportamento médio diário entre produção fotovoltaica, area urbana e área rural.	38
Figura 22 - Gráfico de correlação entre o Piranômetro ST-LITE e produção instântanea do sistema (ppv).	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Representação do ângulo de inclinação em relação á latitude geográfica.	26
Tabela 2 - Representação do indice de coificiencia r e sua correlação.	33

LISTA DE SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EMA	Estação Meteorológica Automática
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EVA	<i>Ethylene Vinyl Acetat</i>
HS	Hemisfério Sul
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IR	Infravermelho
MME	Ministério de Minas e Energia
PVF	Fluoreto de Polivinila
REC	Crédito de Energia Renovável
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
UV	Ultravioleta
VIS	Luz Visível

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivo Específico	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1 Radiação Solar	16
3.2 Energia Solar	20
3.3 Funcionamento do sistema de energia solar.....	22
3.3.1 Sistemas autônomos ou isolado (OFF GRID)	22
3.3.2 Sistemas ligados à rede (ON GRID)	23
3.4 Paineis Solares Fotovoltáicos.....	24
3.4.1 Composição do painel solar	26
3.4.2 Silício.....	27
4 METODOLOGIA.....	29
4.1 Área de Estudo.....	29
4.2 Medidas Fotovoltáicas.....	30
4.3 Medidas Irradiância	31
4.4 Análise estatística.....	32
4.5 Cálculo da Eficiência	33
5. RESULTADOS	34
5.1 Paineis fotovoltaicos	34
5.2 Medidas radiométricas.....	36
5.3 Comparação entre, produção fotovoltaica, área urbana e área rural.....	38

5.4 Correlação	39
6. CONCLUSÃO.....	40
6.1 Projetos Futuros	40
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

O Sol emite luz e calor que percorrem pelo espaço por meio de ondas eletromagnéticas até a superfície da Terra, energia vital para a vida e os sistemas climáticos do planeta. A radiação solar é um elemento meteorológico que influencia processos desde a escala micrometeorológica, até a grande escala, além de impulsiona processos como a fotossíntese e a temperatura global. No atual contexto de desenvolvimento sustentável, a humanidade busca fontes alternativas de energia, sendo a energia solar uma destas fontes (BELÚCIO et al., 2014).

A radiação solar ao se propagar na atmosfera é submetida a transformações complexas até chegara superfície terrestre. Da camada exterior à atmosfera até incidir na superfície da Terra, a radiação é absorvida e espalhada. Devido a este espalhamento observamos, no nível do solo, não somente radiação solar direta, na forma de feixe de raios solares paralelos, mas também a radiação difusa. A soma destas componentes denominamos de radiação solar global (RICIERI, 2002). Ademais, essa componente, determina a variação climática média do planeta resultante do equilíbrio térmico do sistema Terra-atmosfera e estabelece os padrões de circulação atmosférica e oceânica. Vale destacar que a quantidade de energia solar que atinge uma determinada área influencia diretamente as condições meteorológicas, como temperatura, umidade e pressão atmosférica, além de afetar padrões de precipitação, formação de nuvens, e a intensidade e frequência de eventos climáticos extremos (SILVA, 2011).

Devido a evolução e o consumo em massa de outros tipos de energia, como petróleo e gás, acaba sendo uma das fontes de energia elétrica renovável mais utilizadas da atualidade. O uso dessa fonte de energia tem mais foco na região equatorial, devido a maior incidência de radiação solar pela sua posição em relação ao Sol (GREENPRO, 2004).

De acordo com Souza e Aristone (2017), a população mundial tem crescido rapidamente nas últimas décadas e uma das principais consequências é o aumento da demanda por energia, necessária para impulsionar os princípios da vida em sociedade, econômica e social.

Os sistemas solares fotovoltaicos tiveram seu início para gerar eletricidade em locais remotos e no meio rural devido aos altos investimentos decorrentes da expansão da rede de distribuição. Essa tecnologia se tornou mais popular e passou a ser usado no setor residencial e comercial devido à redução do custo dos painéis e interligação à rede elétrica, além de ser uma energia limpa (CAMPOS et al., 2008).

O estudo de sistemas concentradores da radiação solar em painéis fotovoltaicos está cada vez mais avançado, chamados de sistemas fotovoltaicos concentradores. Os sistemas

desse tipo precisam ser mais eficientes e baratos que os tradicionais, em que pesquisas são realizadas com o intuito de buscar formas mais eficazes de conversão elétrica usando essa tecnologia denominada fotovoltaica (MATTOS, 2016).

Portanto, o conhecimento da variabilidade local da radiação solar é a base de qualquer estudo climático e sua aplicação à meteorologia, indústria, agricultura, engenharia, arquitetura, recursos hídricos, etc. (SOUZA et al. 2005).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar a eficiência do uso do painel solar para obtenção da variável de radiação solar incidente como ponto de medida contínuo na cidade de Santarém, PA.

2.2 Objetivo Específico

- Validar dados de radiação solar por captação pelos painéis solares utilizando dois sensores piranômetro profissionais;
- Comparar dois piranômetro profissionais de alto desempenho;
- Verificar a intensidade da radiação solar do centro urbano e rural (Fazenda Experimental da UFOPA) em Santarém-PA.

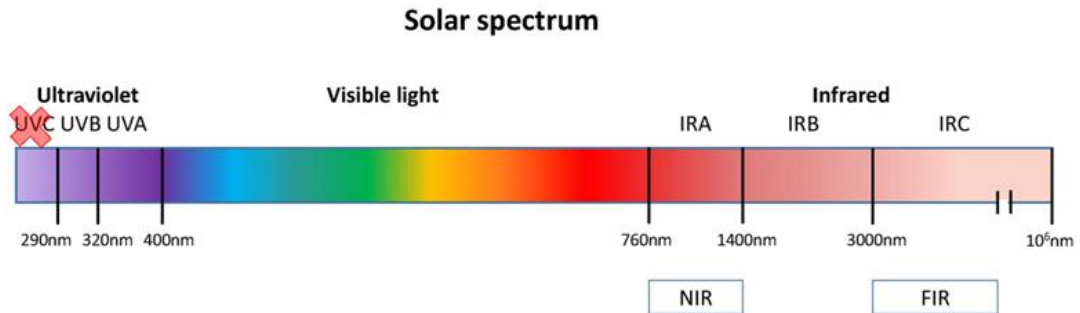
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Radiação Solar

A radiação solar é a energia emitida pelo Sol em forma de luz e calor, a qual se propaga pelo espaço e chega à Terra. Essa radiação é fundamental para a vida no planeta, pois fornece a energia necessária para processos biológicos, como a fotossíntese, e influencia diretamente o clima e as temperatura global. Compreender a radiação solar é essencial tanto para o estudo dos sistemas climáticos da Terra quanto para o aproveitamento sustentável dessa energia natural.

Essa radiação, é composta por um conjunto de ondas eletromagnéticas denominado espectro eletromagnético solar, Figura 1, no qual é dividido em intervalos de comprimento de onda (λ), nos quais se destacam as faixas do ultravioleta (UV), 0 - 400 nm, da luz visível (VIS), 400 - 760 nm, e do infravermelho (IR), 760 - 10⁶ nm (ALVES et al., 2021).

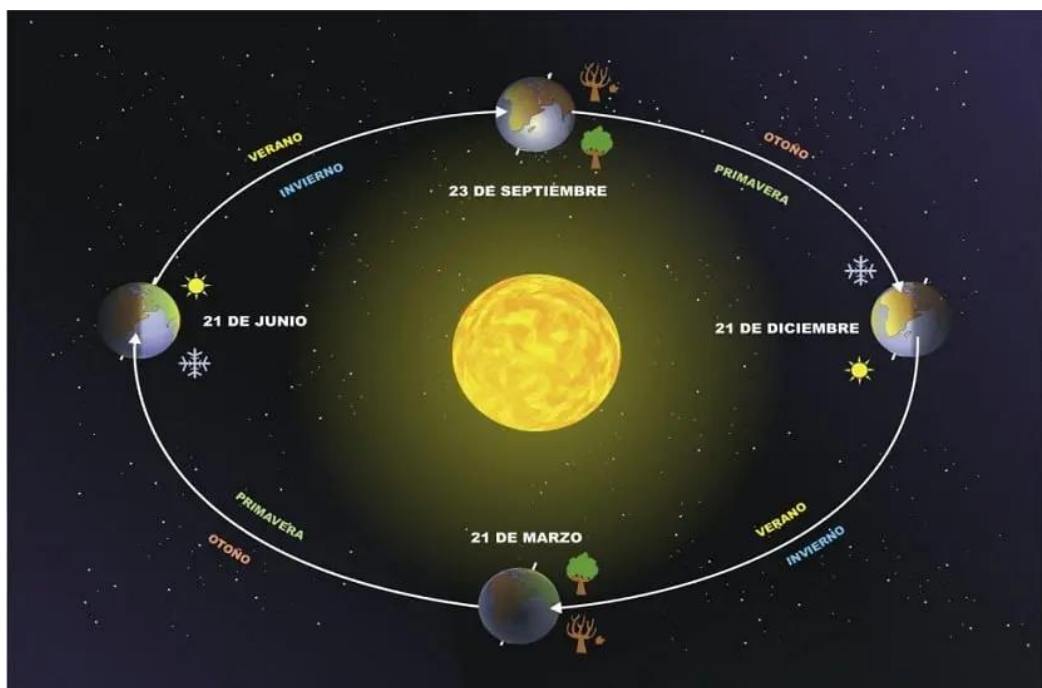
Figura 1 - Composição do espectro solar. O vermelho X sobre UVC significa que eles são bloqueados pela camada de ozônio.



Fonte: BAROLETE et al., (2016).

A distribuição da radiação solar na superfície terrestre é influenciada diretamente pelos movimentos de rotação e translação da Terra. Na Figura 2, é mostrado os dois movimentos, a rotação, o qual consiste no giro do planeta em torno de seu próprio eixo, responsável pela alternância entre dia e noite, com duração de aproximadamente 24 horas. Já a translação, movimento elíptico da Terra ao redor do Sol com duração de cerca de 365 dias, combinada à inclinação do eixo terrestre, determina a variação da incidência solar ao longo do ano, originando assim as estações do ano (verão, primavera, outono e inverno). Esses movimentos, moldam a quantidade e a intensidade da radiação recebida em diferentes regiões e períodos, exercendo um papel crucial no equilíbrio térmico do planeta.

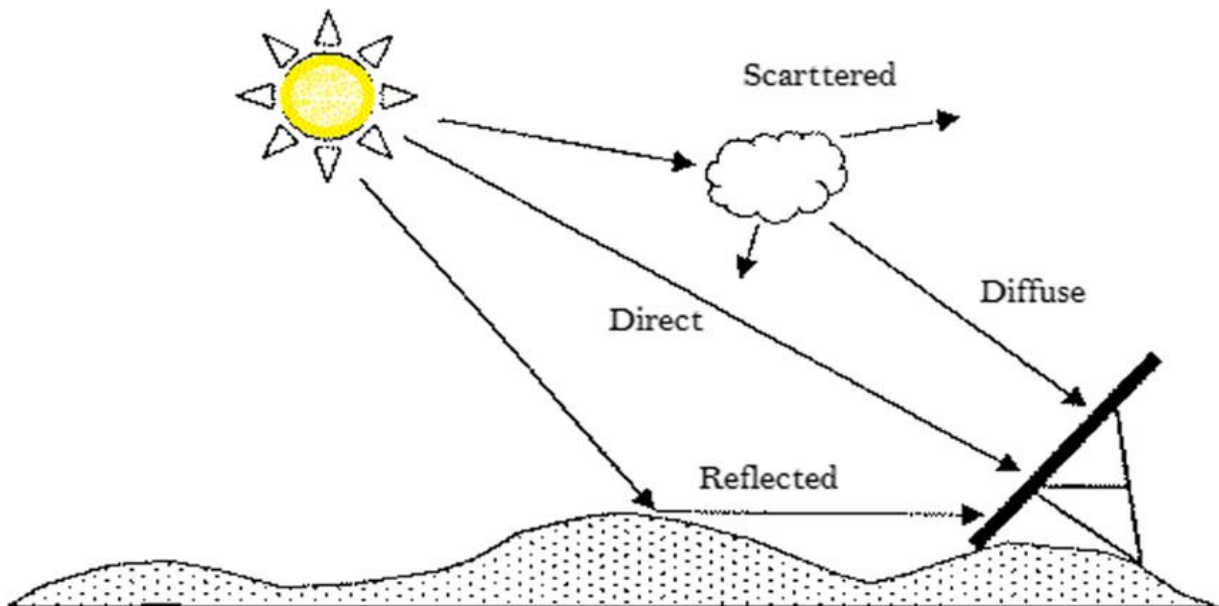
Figura 2- Ilustração dos movimentos de rotação e translação, associados com a inclinação do eixo da Terra.



Fonte: Meteorologiaenred (2023).

Além disso, a radiação solar pode também ser dividida segundo a forma de chegada a superfície da Terra (Figura 3). A radiação solar direta passa através da atmosfera e alcança a superfície da Terra sem apresentar qualquer dispersão em sua trajetória, ou seja, corresponde aos raios solares que chegam diretamente do Sol em linha reta e incidem sobre o plano horizontal com uma inclinação que depende do ângulo zenital solar. A radiação solar difusa, por sua vez atinge a superfície da Terra após passar por vários desvios em sua trajetória, por exemplo, interação com os gases atmosféricos, partículas de poeira, nuvens e outros elementos. Por fim, a radiação solar refletida, a qual é refletida pela própria superfície terrestre, tratando-se do fenômeno conhecido como efeito albedo.

Figura 3 - Ilustração dos componentes da radiação solar global: direta, difusa e refletida.



Fonte: MGHOUCHI (2022).

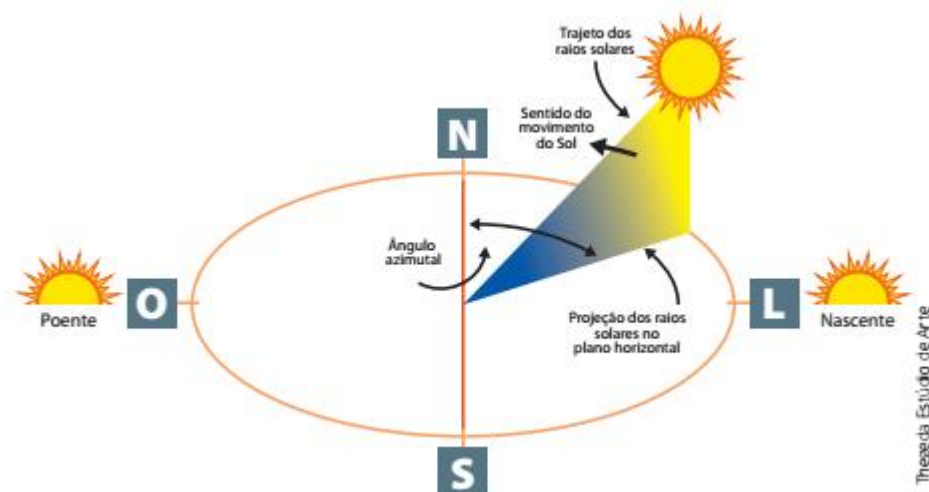
A radiação solar, além de ser responsável pela manutenção de vida na terra como conhecemos, é indiretamente responsável pelas demais fontes de energia (hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis), constituindo-se em uma inesgotável fonte energética, podendo ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica ou ser convertida em energia elétrica (NIEDZIALKOSKI, 2013).

A radiação solar é a energia total incidente sobre a superfície terrestre, cuja intensidade varia ao longo do tempo devido aos movimentos de rotação e translação da Terra. Essa variação depende da latitude, sendo mais intensa nas regiões próximas ao Equador, onde os raios solares incidem mais perpendicularmente ao longo do ano. Com esses fatores há uma

variação de duração solar do dia em períodos do ano e regiões, sendo uma inesgotável fonte de energia, com um potencial enorme de utilização na captação e conversão em outras formas de energia (BARBOSA et al., 2021).

Um conceito importante para este tópico é o ângulo azimutal, o qual vem ser orientação dos raios solares com relação ao norte geográfico, como mostrado na Figura 4. Isto significa que um observador localizado no Hemisfério Sul (HS), abaixo da linha do equador, quando estiver olhando para o Norte, verá posicionamento aparente do Sol com ângulos variáveis do seu lado direito no período da manhã e do lado esquerdo no período da tarde. Ao meio-dia solar o observador verá o sol exatamente à sua frente, o que representa o ângulo azimutal nulo.

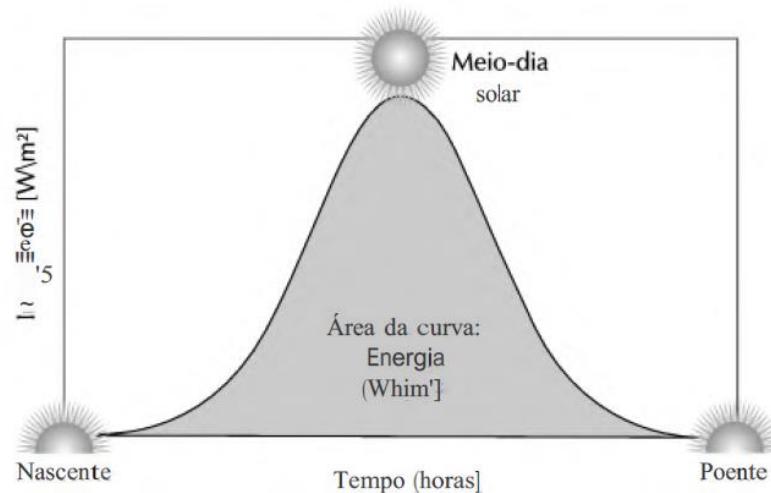
Figura 4- Ilustração do ângulo azimutal e sua relação ao norte geográfico.



Fonte: Instituto Solar (2020).

Uma grandeza empregada para quantificar a radiação solar é a irradiância, geralmente chamada também de irradiação, expressa na unidade de $W m^{-2}$ (watt por metro quadrado). Trata-se de uma unidade de potência por área. Como se sabe, a potência é uma grandeza física que expressa a energia transportada durante um certo intervalo de tempo, ou a taxa de variação da energia com o tempo. Quanto maior a potência, mais energia ela transporta em um determinado intervalo de tempo, como mostrado na Figura 5 (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

Figura 5- Perfil da irradiância solar ao longo de um dia.



Fonte: VILLALVA & GAZOLI (2012).

3.2 Energia Solar

As fontes fósseis de energia predominam até hoje na matriz energética mundial e de todos os países individualmente. Em 2001, o mundo consumiu quase 80% de energias fósseis em um total de 10,2 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo. A principal delas é o petróleo (35% do total), mas as parcelas de carvão (23%) e gás natural (22%) também são bastante significativas (GOLDENBERG & LUCON, 2007).

A energia solar é a utilização da radiação solar como uma fonte de energia renovável, captada e convertida em eletricidade através de tecnologias específicas, usada como escape do uso de fontes fósseis. Ao contrário das fontes convencionais, a energia solar é limpa, inesgotável e oferece vantagens ecológicas significativas. Ela representa uma alternativa sustentável em um cenário global de crescente demanda energética, além de ser essencial para a transição rumo a uma indústria energética ambientalmente responsável e segura.

Desde a crise energética, em 1973, o mundo percebeu sua dependência por combustíveis fósseis e a partir de então que aumentou o número de estudos direcionados para o aproveitamento de outras fontes de energia, mais limpas, sustentáveis e renováveis. Foi nesta época que iniciou, de fato, o desenvolvimento de sistemas de energia solar fotovoltaica para o uso residencial e comercial, em aplicações autônomas e conectadas à rede elétrica (NIEDZIALKOSKI, 2013).

Algumas questões podem ser levantadas com relação ao uso de fontes de energias renováveis, como por exemplo a magnitude do recurso a ser utilizado, e principalmente o custo da mão de obra e dos mecanismos necessários para sua captação. Ainda assim, a

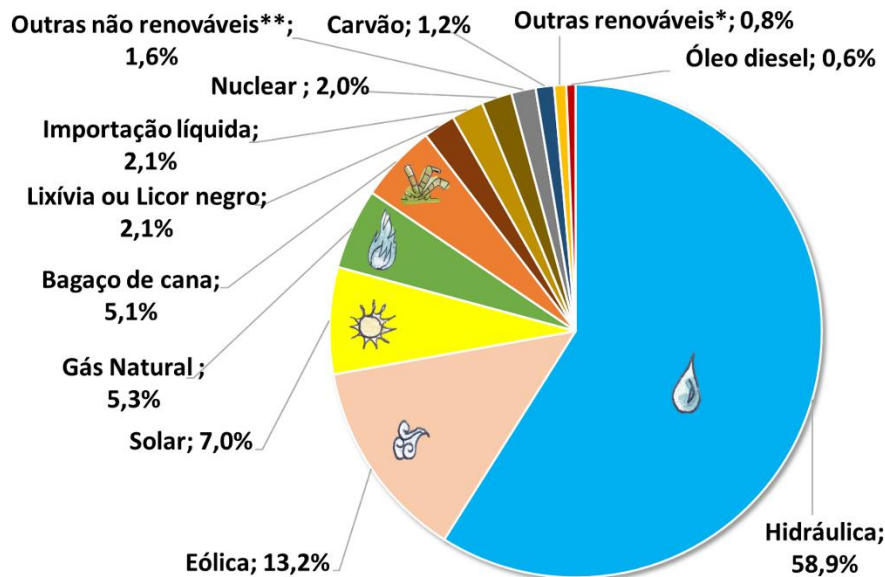
instalação de painéis solares e uso da energia solar é considerada como promissora (FAPESP, 2007).

No Brasil, a energia solar vem ganhando cada vez mais força na matriz elétrica, pois possuem mais vantagens que outras fontes tradicionais de energia elétrica, como carvão e gás. A redução dos custos de implantação em projetos solares faz com que essa matriz se torne a forma menos custosa na produção de eletricidade, além de ser considerada inesgotável do ponto de vista humano, trazendo um potencial extraordinário comparado com outras fontes de energia (SILVA et al., 2001).

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), em 2022 a energia solar representou cerca de 5% da matriz, tendo crescido 63% nos últimos doze meses. No ano de 2020, o crescimento foi de 66% no país.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz elétrica brasileira possui avanços sendo cada vez mais renovável. Na Figura 6, é possível notar que grande parte da energia elétrica gerada no Brasil no ano de 2023 vem de usinas hidrelétricas, cerca de 58,9%. A energia eólica (13,2%) e solar (7%) também vem crescendo bastante, contribuindo para que a matriz elétrica continue sendo, em sua maior parte, renovável.

Figura 6 - Matriz Elétrica Brasileira 2023.



Fonte: EPE (2024).

No ano de 2024, a matriz elétrica brasileira foi de 84% renovável, e a matriz energética (a qual inclui os combustíveis) de 45% renovável. Nos últimos cinco anos, o país aumentou

significativamente a geração das energia eólica e solar, as quais superam a geração de energia elétrica a partir de gás natural, que são térmicas ou termoelétrica (PETROBRAS, 2024).

De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2024, a capacidade instalada de geração de eletricidade no Brasil foi expandida em 9,4% no período de 2022 a 2023, com a maior contribuição de usinas de geração hidráulica (45,7%). Porém, a maior expansão proporcional ocorreu na geração solar, que fechou o ano de 2023 com um aumento na potência instalada de 54,8% em relação ao ano anterior, ressaltando ainda a queda da geração térmica proveniente de gás natural (-7,9%) e de derivados de petróleo (-19,3%), ocorrida em função da estabilidade do regime hídrico e do aumento da geração solar (+68,1%) e eólica (+17,4%).

A energia solar é fundamental para um futuro sustentável, representando uma fonte de energia limpa e renovável, reduzindo nossa dependência de combustíveis fósseis os quais tem suas fontes limitadas. Sua abundância e acessibilidade, especialmente nas regiões Equatorial do globo, devido a maior incidência de radiação solar, a tornam uma alternativa viável e economicamente atrativa a longo prazo. Além disso, a energia solar contribui para a segurança energética, diversificando as fontes de produção e estimulando a inovação tecnológica e a geração de empregos, impulsionando o crescimento econômico.

3.3 Funcionamento do sistema de energia solar

O funcionamento do sistema de energia solar, também conhecido como energia fotovoltaica, é um sistema que realiza a produção de energia elétrica através da radiação solar. Esse sistema consegue fazer com que o consumidor produza sua própria energia, e isso ocorre através da capacidade de captação de energia solar obtida através da conversão da radiação solar em energia elétrica, por intervenção de placas feita com materiais semicondutores, como por exemplo o silício.

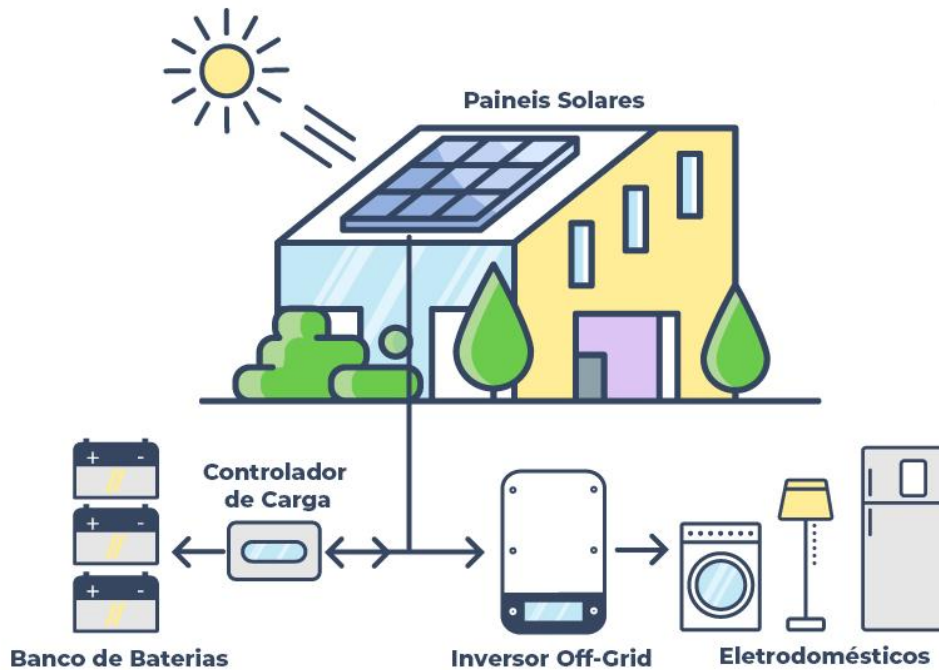
3.3.1 Sistemas autônomos ou isolado (*OFF GRID*)

Os sistemas fotovoltaicos autônomos ou isolados, são empregados em locais não atendidos por uma rede elétrica. Podem ser usados para fornecer eletricidade para residências em zonas rurais, pois muitos lugares do Brasil não são atendidos por rede elétrica, onde nesses locais um sistema fotovoltaico autônomo pode ser empregado para substituir geradores movidos a diesel, com a vantagem da redução de ruídos e poluição (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

É um sistema não conectado à rede elétrica, como mostrado na Figura 7, o qual

armazena a energia solar excedente em baterias para ser utilizada quando não houver produção, abastecendo os aparelhos domésticos e eletrônicos que utilizarão a energia de forma direta.

Figura 7 - Representação de sistema solar *off grid*.



Fonte: Minha Casa Solar (2025).

O sistema *off grid* tem seu funcionamento igual ao sistema on grid, sendo aproveitado em atividades do dia a dia como bombeamento de água, iluminação e eletrificação de cercas onde a energia solar, por ser armazenada em baterias, pode ser utilizada em dias chuvosos, nublados e durante a noite.

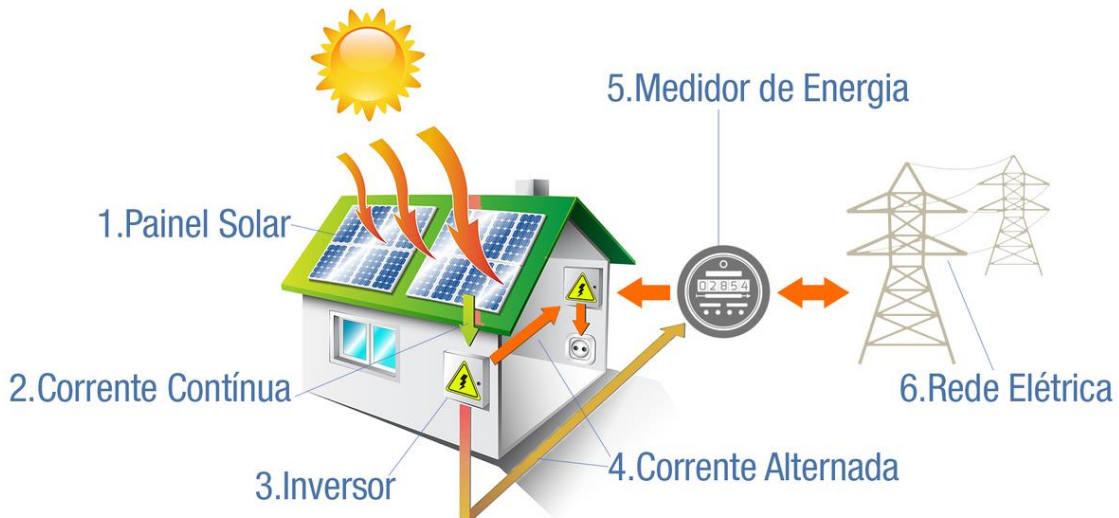
3.3.2 Sistemas ligados à rede (*ON GRID*)

O sistema fotovoltaico (*ON GRID*), está conectado à rede elétrica e opera em paralelismo com a rede de eletricidade. Diferentemente do sistema autônomo, o sistema conectado é empregado em locais já atendidos por energia elétrica. O objetivo deste sistema é gerar eletricidade para o consumo local, podendo reduzir ou eliminar o consumo da rede pública ou mesmo gerar excedente de energia (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

O sistema fotovoltaico *on-grid* é formado por equipamentos com a função de converter a energia solar em eletricidade e, por serem ligados à rede, também podem inseri-la

diretamente na rede elétrica, transferindo o excesso de energia gerada para a distribuidora. Na Figura 8, é mostrado o funcionamento desse sistema, operando a partir da captação da luz solar por meio dos painéis solares, gerando eletricidade em corrente contínua (CC), que passa pelo inversor solar e é convertida em corrente alternada (CA) e é distribuída para o imóvel.

Figura 8 - Representação de sistema solar *on grid*.



Fonte: MELO (2018).

Além disso, o artigo 14 do Decreto-lei nº 5.163, de 2004, estabelece os Créditos de Energia Renovável (REC), os quais podem ser gerados por sistemas de geração renovável, como painéis fotovoltaicos (solares), onde esses créditos, que não são consumidos imediatamente, podendo assim, serem usados para reduzir o valor da conta de luz.

3.4 Painéis Solares Fotovoltaicos

A conversão direta da luz em eletricidade é possível através de um processo conhecido por Efeito Fotovoltaico, inicialmente relatado pelo físico francês Edmond Becquerel, em 1839, o qual se trata do aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. Nas últimas três décadas, avanços significativos no desenvolvimento de materiais permitiram o aumento da eficiência dos painéis fotovoltaicos, com a diminuição de custos, tornando a tecnologia acessível a uma maior parcela da população (ALVES, 2008).

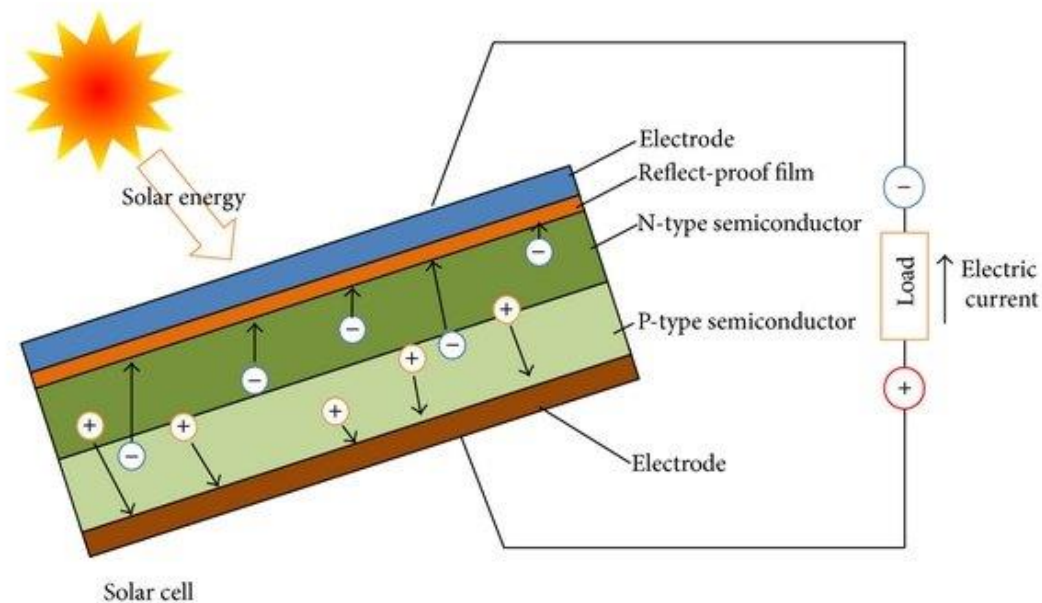
De acordo com Severino (2008), a geração de energia elétrica a partir da energia solar pode ocorrer de duas formas: (a) indiretamente, por meio do uso do calor para gerar vapor que, expandindo-se em turbina a vapor, aciona um gerador elétrico em uma usina termelétrica

o qual constitui os sistemas termossolares; (b) diretamente, por meio do uso de painéis fotovoltaicos constituindo assim os sistemas fotovoltaicos. Com isso, é importante ressaltar que, no caso da energia solar, a mesma fonte de energia pode suprir duas diferentes formas de geração elétrica.

Os painéis solares são dispositivos projetados para captar a luz solar e convertê-la em eletricidade por meio de células fotovoltaicas. Esses sistemas são amplamente utilizados em aplicações residenciais, comerciais e industriais, sendo uma das soluções mais acessíveis e populares para geração de energia limpa. Além de serem uma alternativa sustentável, os painéis solares têm impacto direto na redução de emissões de carbono, tornando-se essenciais para o desenvolvimento de uma infraestrutura energética econômica e sustentável.

O funcionamento de um painel solar (Figura 9) é de certa forma simples, o Efeito Fotovoltaico permite que a luz do sol seja convertida em eletricidade utilizável. Quando a luz do sol, composta por fótons, atinge as células fotovoltaicas dos painéis solares, ocorre uma reação. Esses fótons têm energia suficiente para “chocar” com os elétrons presentes nas células, fazendo com que eles se movam. Esse movimento cria uma corrente elétrica.

Figura 9 - Princípio básico de funcionamento de um painel solar.

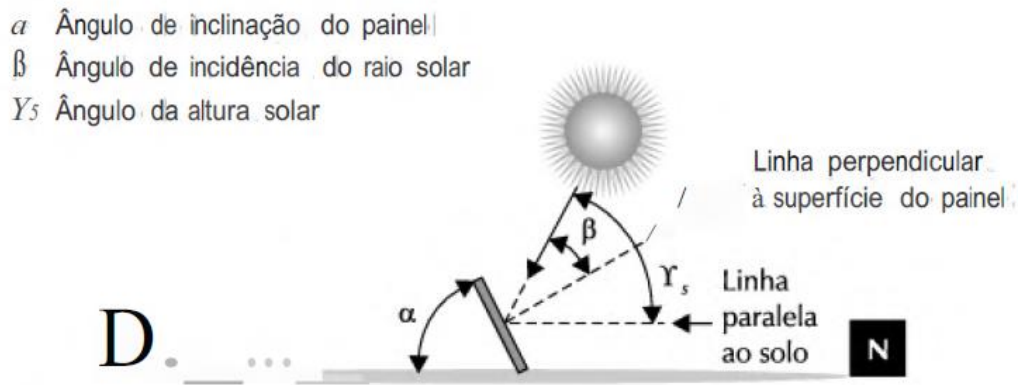


Fonte: ZHANG et al., (2014).

De acordo Barbosa et. al. (2021), para se obter um rendimento de máxima eficiência de painéis fotovoltaico, devem-se observar as variáveis presentes no processo de captação da energia solar, entre elas, a irradiação no local ao decorrer do tempo, o

posicionamento correto em relação ao Sol com a sua face voltada ao norte, o ângulo de instalação (Figura 10) onde varia de acordo com a latitude local, e a escolha do material do módulo que age diretamente para determinação da eficiência desejada.

Figura 10 - Módulo com ângulo de inclinação.



Fonte: VILLALVA&GAZOLI (2012).

Desse modo, ainda é possível determinar para uma latitude geográfica um ângulo de inclinação que possibilite um maior rendimento produção média de energia ao longo do ano. A Tabela 1 mostra o ângulo de inclinação recomendado para diversas faixas de latitude geográfica, onde não se recomenda a instalação com ângulos de inclinação inferiores a 10° para evitar o acúmulo de poeira sobre as placas (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

Tabela 1 - Representação do ângulo de inclinação em relação á latitude geográfica.

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

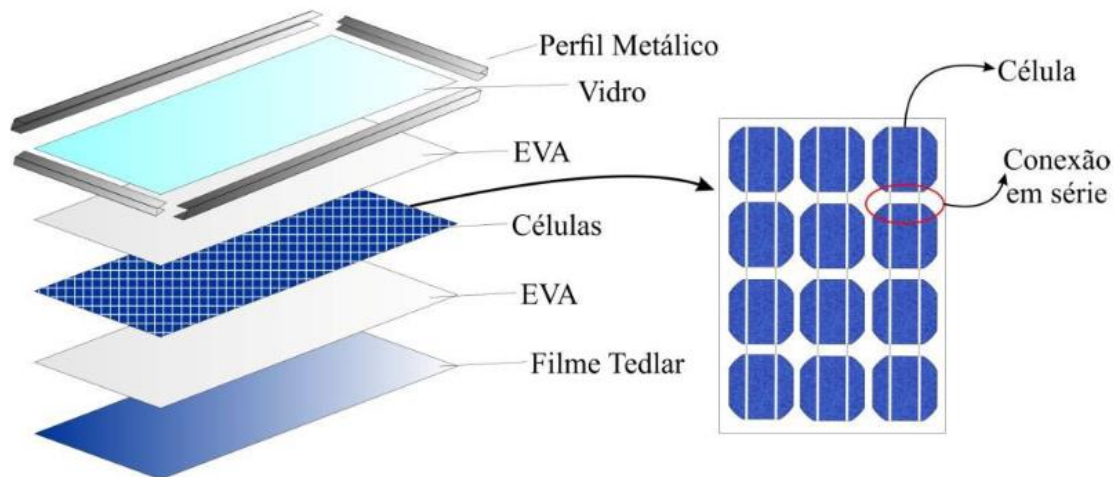
Fonte: Adaptado de VILLALVA & GAZOLI (2012).

3.4.1 Composição do painel solar

A composição de um painel fotovoltaico, apresentada na Figura 11, é formada por diversos componentes essenciais que desempenham um papel fundamental no seu funcionamento e eficiência. Cada um desses elementos contribui para a captação da radiação

solar, a conversão da energia luminosa em energia elétrica e a proteção do sistema contra danos ambientais.

Figura 11 - Esquema básico da composição de um painel solar.



Fonte: Macado & Miranda (2014).

O vidro é temperado, com espessura entre 3,2 à 4mm, ultra puro com baixo teor de ferro, desenvolvido especialmente para refletir menos e deixar o máximo de luz passar através dele, além de serem resistentes resistindo a fortes chuvas e granizo.

O EVA (*Ethylene Vinyl Acetat*), é um material selante de cura rápida, projetado para proteger as células fotovoltaicas contra o envelhecimento causado por raios UV, temperaturas extremas e umidade, assegurando que o máximo luz visível atinja as células solares.

Ainda na Figura 11, a célula fotovoltaica (lado direito é a parte fundamental do painel solar, é onde ocorre a reação físico-química que transforma a luz do sol em energia elétrica, a qual é composta por cristal de silício ultra puro, com aproximadamente 185 μm de espessura.

Por fim, recebem uma proteção na parte posterior, de um filme de fluoreto de polivinila (PVF), conhecido como Tedlar®. Esse conjunto laminado é montado em um perfil metálico, geralmente alumínio.

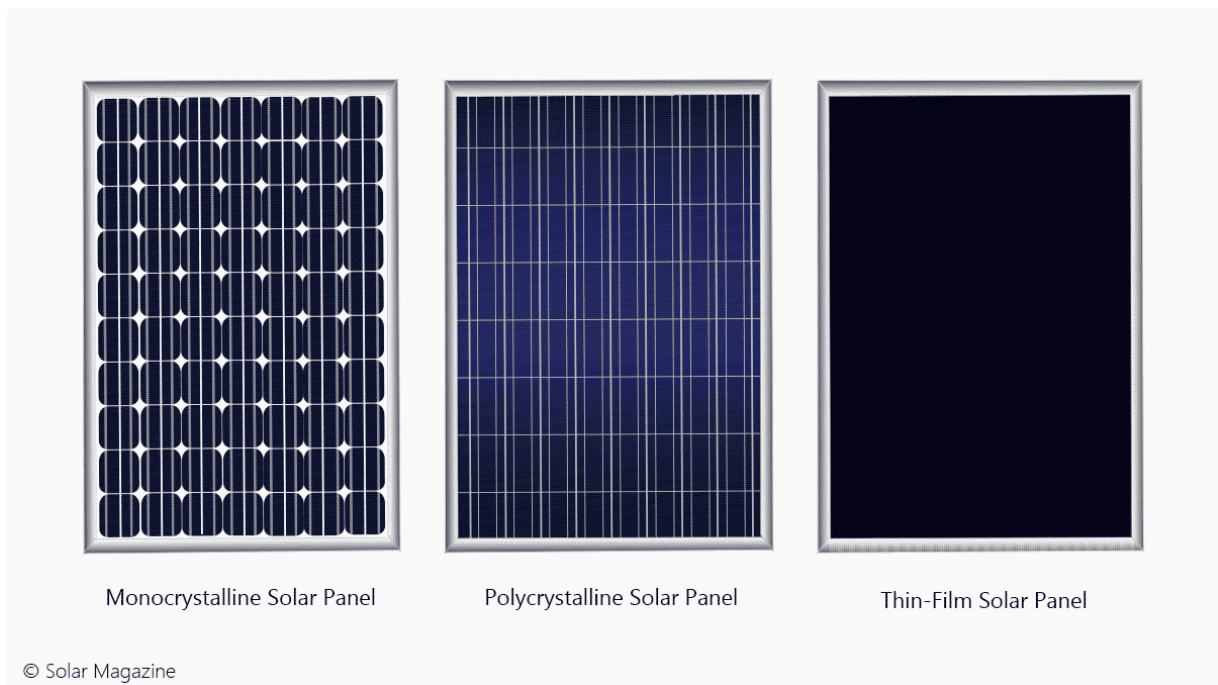
3.4.2 Silício

O silício (representado na tabela periódica pelo símbolo Si, de número atômico 14 e massa atômica 28,09 u), é empregado na fabricação de células fotovoltaicas, uma das partes fundamentais na composição do painel fotovoltaico, é extraído do mineral quartzo. O Brasil é um dos principais produtores mundiais desse minério, mas a purificação do silício não é feita

em nosso País, assim como a fabricação de células (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

Atualmente, há uma ampla variedade de tecnologias empregadas na fabricação de células e módulos fotovoltaicos (Figura 12), cada uma com características específicas que influenciam sua eficiência e aplicação. As três principais tecnologias presentes no mercado são as células de silício monocristalino, conhecidas por sua alta eficiência e uniformidade estrutural; as de silício policristalino, que oferecem um custo de produção mais acessível com desempenho satisfatório; e as de filme fino de silício, que se destacam pela flexibilidade e menor consumo de material, tornando-se uma alternativa viável para determinadas aplicações.

Figura 12 - Representação dos diferentes tipos de material para produção células e módulos fotovoltaicos.



Fonte: Solar Magazine (2023).

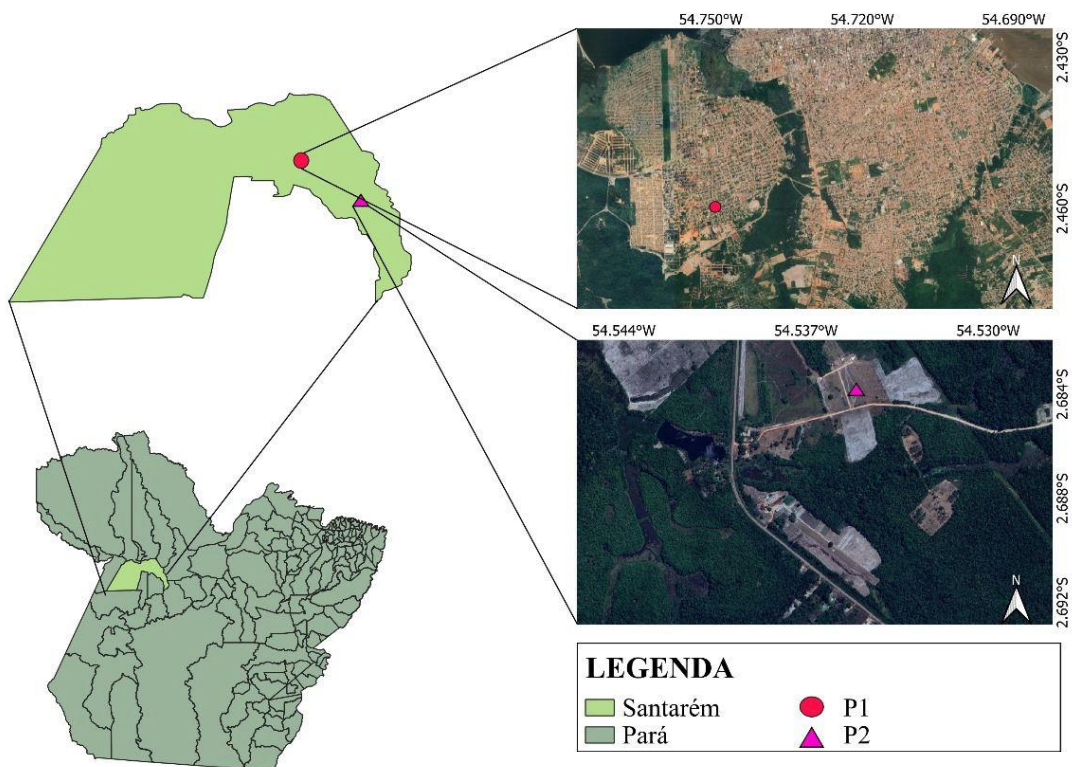
De acordo com Villalva & Gazoli (2012), as células de silício monocristalino são as mais eficientes produzidas em larga escala e disponíveis comercialmente, alcançando um eficiência de 15 a 18%, tendo um custo de produção mais elevado do que outros tipos de células. Por outro lado as células de silício policristalino têm eficiências comerciais entre 13 e 15%, ligeiramente inferiores às das células monocristalinas, entretanto seu custo de fabricação é menor do que o das células monocristalinas, compensando a redução de eficiência. Apesar de terem custo relativamente baixo, os dispositivos de filmes finos têm baixa eficiência e necessitam de maior área de módulos para produzir a mesma energia que produzem as tecnologias cristalinas, são sendo tão utilizada na produção energética.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de Estudo

Para este trabalho, a área de estudo compreende dois pontos: sendo P1 a região metropolitana do município de Santarém (-2,46°S e -54,75°W) e P2 a área rural do município, na Fazenda Experimental da UFOPA (-2,68°S e -54,53°W), ambas na região oeste do Estado do Pará (Mapa 1). O município ocupa uma área territorial de 17.899,238 km², com população total de 357.311 habitantes (IBGE, 2024).

Mapa 1 - Localização da área de estudo, com o ponto de coleta P1 e P2 em destaque.



Fonte: Autor (2025).

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima dominante na região é quente e úmido, com temperatura média anual variando entre 24° e 32°C, na qual enquadra-se no tipo climático Am, ou seja, é caracterizado com clima equatorial úmido (ALVARES et al., 2013). Devido a temperatura do ar apresentar pequena variabilidade, a caracterização climática é feita basicamente em função da distribuição de sua precipitação. A precipitação pluvial é o elemento meteorológico que apresenta maior variabilidade anual, onde seus valores médios anuais oscilam em torno de 1920 mm, sendo esta região caracterizada por apresentar dois

períodos bem distintos: um mais chuvoso, que vai de dezembro a maio (inverno amazônico); e outro menos chuvoso, que se estende de julho a novembro (verão amazônico) (JACINTO et al., 2006).

4.2 Medidas Fotovoltaicas

Para a captação dos dados das saídas fotovoltaicas, foi utilizado um painel de módulo monofacial (modelo RS6-560N-E3 da Renesola®), mostrado na Figura 13, projetado para alta eficiência e desempenho otimizado. O módulo é composto por células Mono N-Type, que apresentam maior durabilidade. Suas dimensões são de 2278x1134 mm, e a configuração conta com 144 células organizadas em uma matriz de 6x24, garantindo uma conversão com eficiência de 21,68% da energia solar em eletricidade.

Figura 13 - a) Modelo do painel fotovoltaico.



Fonte: a) Renesola (2025).

b) Painel fotovoltaico utilizado no trabalho.



b) Autor (2025).

Estão instalados 17 painéis, abrangendo uma área de 43,92 m², possuindo inclinação de 8° e voltados para o Norte. Para verificar a variação da produção fotovoltaica, ocorreu a obtenção da produção instantânea do sistema (ppv), durante o período de 03 de dezembro de 2024 a 03 de janeiro de 2025, com medidas possuindo frequência de 5 minutos, e realizando a média, padronizando para a cada 10 minutos.

4.3 Medidas Irradiância

Os dados de irradiância ($W m^{-2}$) utilizados neste estudo (com período de 03 de dezembro de 2024 a 03 de janeiro de 2025) foram obtidos por meio de três instrumentos, uma Estação Meteorológica Multifuncional, denominada ATMOS 41, (Figura 14), a qual foi medida por um piranômetro na parte superior do instrumento, que é constituído por um sensor de célula de silício para medir a radiação solar total recebida (direta e difusa).

Figura 14 - Instrumento ATMOS 41.



Fonte: METER (2025)

Outro instrumento utilizado para a captação da irradiância, ocorreu por meio de outro piranômetro (modelo SP-LITE) possuindo uma sensibilidade de $10 \mu V/(W m^{-2})$, da Campbell Scientific ©, instalado junto ao instrumento ATMOS 41 (Figura 15).

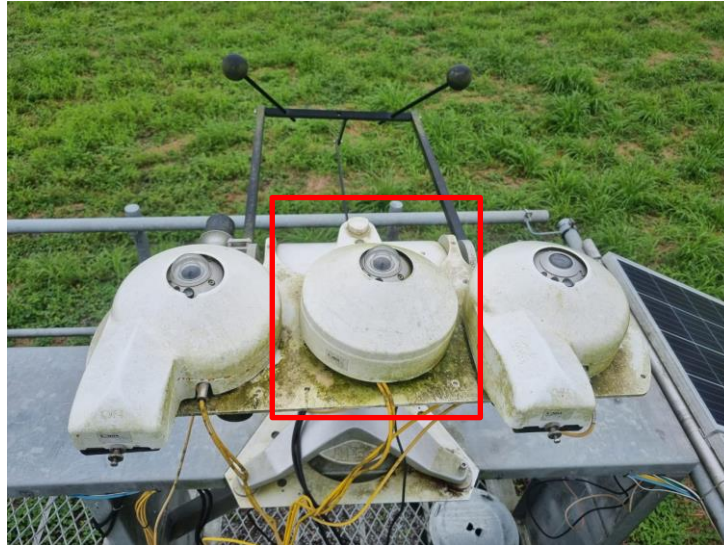
Figura 15- Instrumento piranômetro (SP-LITE).



Fonte: Campbell Scientific (2025).

Por fim, se fez o uso do Piranômetro modelo CPM10 (Figura 16),o qual pertence a rede de Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) pertecente ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizado na Fazenda Experimental da UFOPA (P2).

Figura 16 – Instrumento Piranômetro (CPM10).



Fonte: Autor (2025).

4.4 Análise estatística

Para uma melhor análise estatística, utilizou -se a Correlação de Pearson (r), Equação 1, a qual mede a tendência de associação linear de duas variáveis quantitativas, sendo o valor de r variável entre -1 e 1, portanto pode ser positiva ou negativa (GRACIO & OLIVEIRA, 2015).

$$r = \frac{\Sigma(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\Sigma(x_i - \bar{x})^2)(\Sigma(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (1)$$

Sendo x_i e y_i os valores das variáveis X e Y, onde \bar{x} e \bar{y} são respectivamente as médias dos valores x_i e y_i .

As correlações podem variar também quanto à sua força (Tabela 2) seja desde ausência (igual a zero) até uma correlação muito forte ou até perfeita, valor de r igual a -1 ou 1.

Tabela 2 - Representação do índice de coeficiência r e sua correlação.

Coeficiente de Correlação	Correlação
$r = 1$	Perfeita positiva
$0,8 < r < 1$	Forte positiva
$0,5 < r < 0,8$	Moderada positiva
$0,1 < r < 0,5$	Fraca positiva
0	Nulo (Sem correlação)
$- 0,5 < r < - 0,1$	Fraca negativa
$- 0,8 < r < - 0,5$	Moderada negativa
$- 1 < r < - 0,8$	Forte negativa
$r = -1$	Perfeita negativa

Fonte: Adaptado de Santos (2007).

4.5 Cálculo da Eficiência

Para determinar a Eficiência (η), representada pela relação entre a potência elétrica gerada pela célula/modulo e a potência de energia solar incidente (Equação 2), mostra o quanto efetivo é a conversão de energia solar em energia elétrica, dada por:

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (2)$$

sendo P_{mpp} (W) a máxima potência gerada, A (m^2) a área do modulo e G ($W m^{-2}$) a irradiância solar incidente.

Por fim foi calculado eficiência real (η_r), Equação 3, em relação à eficiência informada no manual (21,68%), dada por:

$$\eta_r = \left(\frac{er}{ep} \right) \cdot 100\% \quad (3)$$

sendo er (%) a eficiência real e ep (%) a eficiência do painel informada no manual.

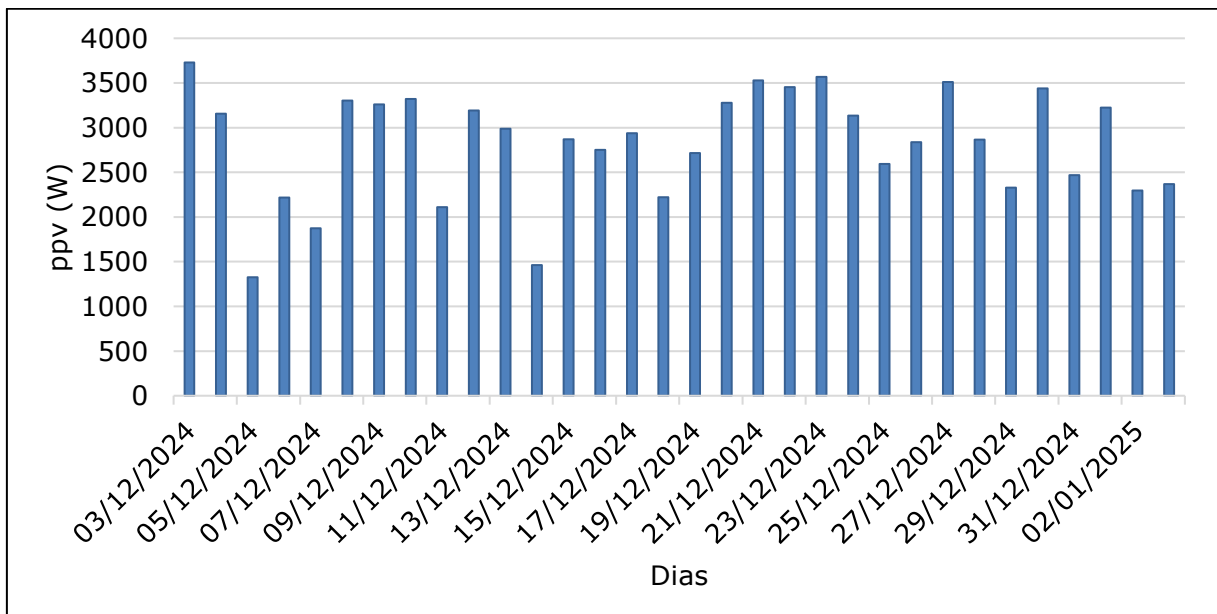
5. RESULTADOS

Os resultados obtidos neste trabalho apontam uma visão mais clara sobre o comportamento da radiação solar no município de Santarém-PA. A partir da análise da produção de energia por meio de painéis fotovoltaicos e dos sensores instalados, foi possível identificar padrões e assim entender melhor o seu comportamento diário. Esses achados não apenas reforçam a relevância do estudo sobre o tema, mas também fornecem subsídios para futuras pesquisas voltadas à área de energias renováveis.

5.1 Painéis fotovoltaicos

A produção instantânea média diária do sistema fotovoltaico (ppv), Figura 17, observa-se que a produção varia durante o período em análise, refletindo as mudanças nas condições na incidência de radiação solar. As medidas variam significativamente, com valores médios máximos de 3728,10 W para o dia 03/12/2024, apresentando uma eficiência de 69,07%, e valores mínimos de 1327,13 W para o dia 05/12/2024, com eficiência de 80,61%, onde essa diminuição pode ser atribuída a fatores como cobertura de nuvens, onde o painel se mostrou eficiente em situações de baixa irradiância.

Figura 17 – Comportamento médio da variação diária da produção instantânea do sistema (ppv).

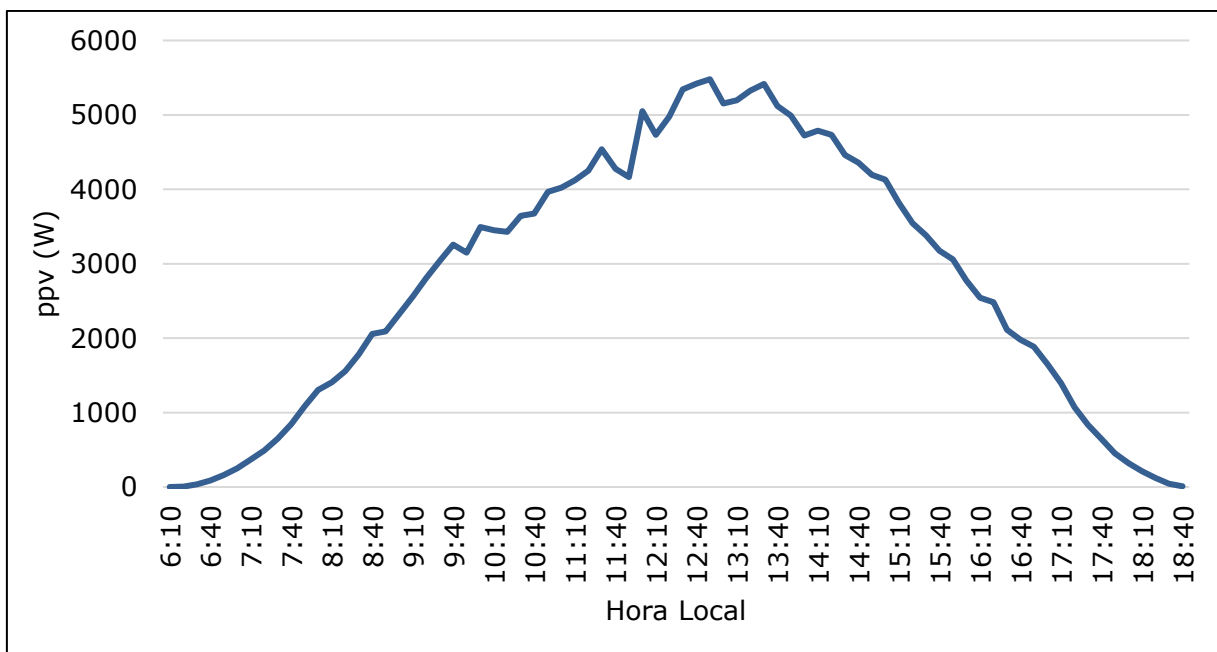


Fonte: Autor (2025).

Na Figura 18, observa-se a variação diária da produção instantânea do sistema (ppv), variando em função da hora local, percebeu-se que a distribuição se assemelha ao

comportamento da irradiância solar, que expressa a energia transportada durante um certo intervalo de tempo, de modo que quanto maior a potência da radiação solar, observado ao meio dia solar, haverá uma maior intensidade na chegada da radiação (VILLALVA & GAZOLI, 2012). Ainda na Figura 18, pode-se notar o início do aumento a partir das 06:40 HL, tendo aumento até os valores máximos de produção, ocorrendo após as 12:00 HL, alcançando como valor médio 5479,15 W às 12:50 HL, após esse há um decréscimo até 18:40 HL, indicando o termino da incidência da radiação solar.

Figura 18 - Comportamento médio da variação horária da produção instantânea do sistema (ppv).

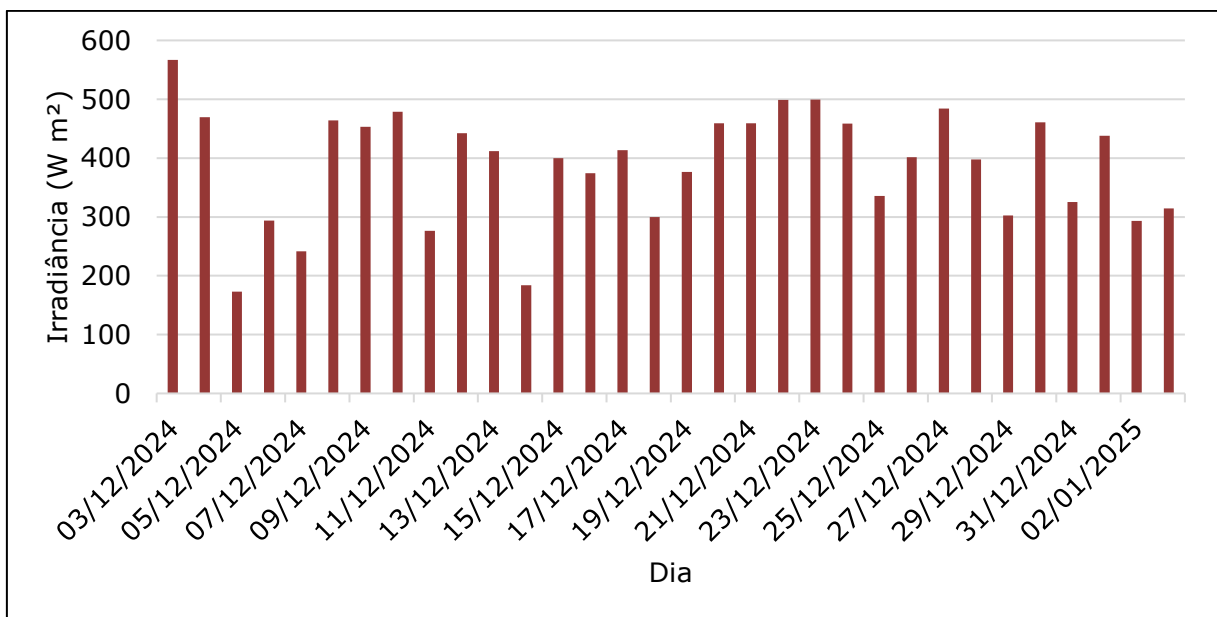


Fonte: Autor (2025).

5.2 Medidas radiométricas

Na Figura 19, observa-se o comportamento médio diário da incidência de radiação solar ao longo do período analisado, evidenciando variações significativas. Essas oscilações incluem reduções expressivas em determinados momentos. Os valores médios máximos registrados atingiram $566,92 \text{ W/m}^2$ no dia 03/12/2024, enquanto os valores médios mínimos, abaixo de 200 W/m^2 , foram de $172,93$ e $183,76 \text{ W m}^{-2}$ para o dia 05/12 e 14/12/2024, respectivamente, destacando a variabilidade durante o intervalo considerado.

Figura 19 - Comportamento médio diário da incidência de radiação solar (SP-LITE).



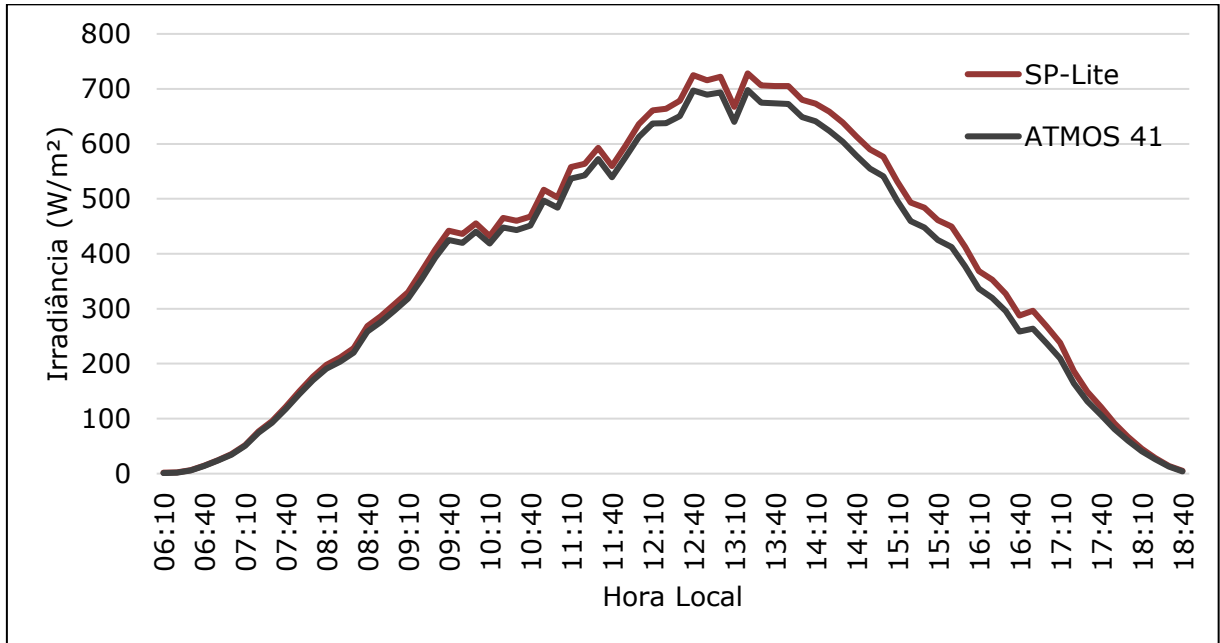
Fonte: Autor (2025).

A variação horária da radiação solar global também foi analisado pelos instrumentos SP-LITE e ATMOS 41 (Figura 20) instalados na área urbana (P1), tem seu início aproximadamente às 06:10 HL e término aproximadamente às 18:50 HL, demonstrando assim, o início e término da incidência da incidência de radiação solar, respectivamente. Pode-se notar também um crescimento acentuado às 09:20 HL, seguida de crescente até o pico máximo. Os valores máximos da incidência radiação solar ocorrem às 12:40 e 13:20 HL, alcançando o valores $724,75$ de $728,19 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente.

Entre os dois equipamentos profissionais de medição radiométrica (SP-LITE e ATMOS 41), constatou-se uma perda de captação média de $19,32 \text{ W m}^{-2}$. Essa diferença se dá pois o SP-Lite tem uma sensibilidade bem maior, tornando suas medidas mais precisas. Cabe ressaltar que a comparação entre os dois instrumentos também foi analisada, mostrando pouca variação, onde a dinâmica da distribuição medida pelos instrumentos concatenam com o

mesmo comportamento da produção instantânea do sistema (ppv).

Figura 20 - Comparação do comportamento entre medidas de irradiância dos instrumentos ST-LITE e ATMOS 41.

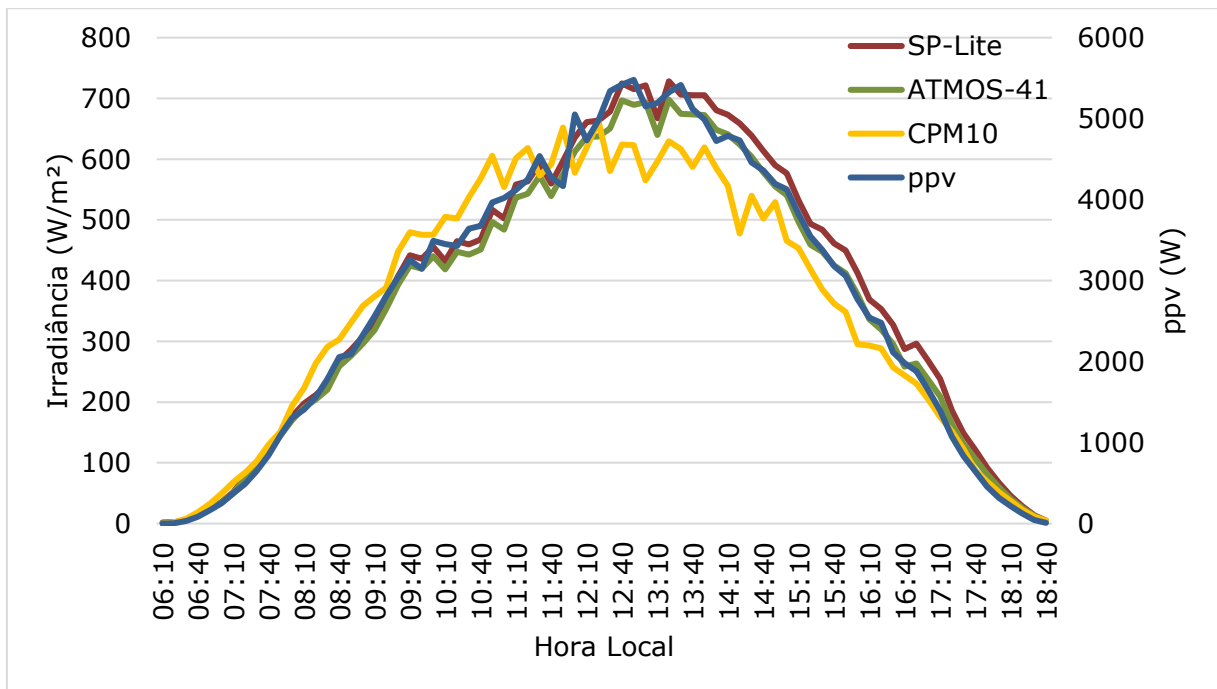


Fonte: Autor (2025).

5.3 Comparação entre, produção fotovoltaica, área urbana e área rural

Com o intuito de melhor comparação entre a variação diária da incidência de radiação solar, foi realizado a comparação entre a produção instantânea do sistema (ppv), os instrumentos SP-LITE e ATMOS 41, e também dados do projeto SONDA, Figura 21, com a intenção de verificar a diferença entre a zona urbana e rural, com a finalidade de identificar a variação da incidência de radiação solar.

Figura 21 - Comportamento médio diário entre produção fotovoltaica, area urbana e área rural.



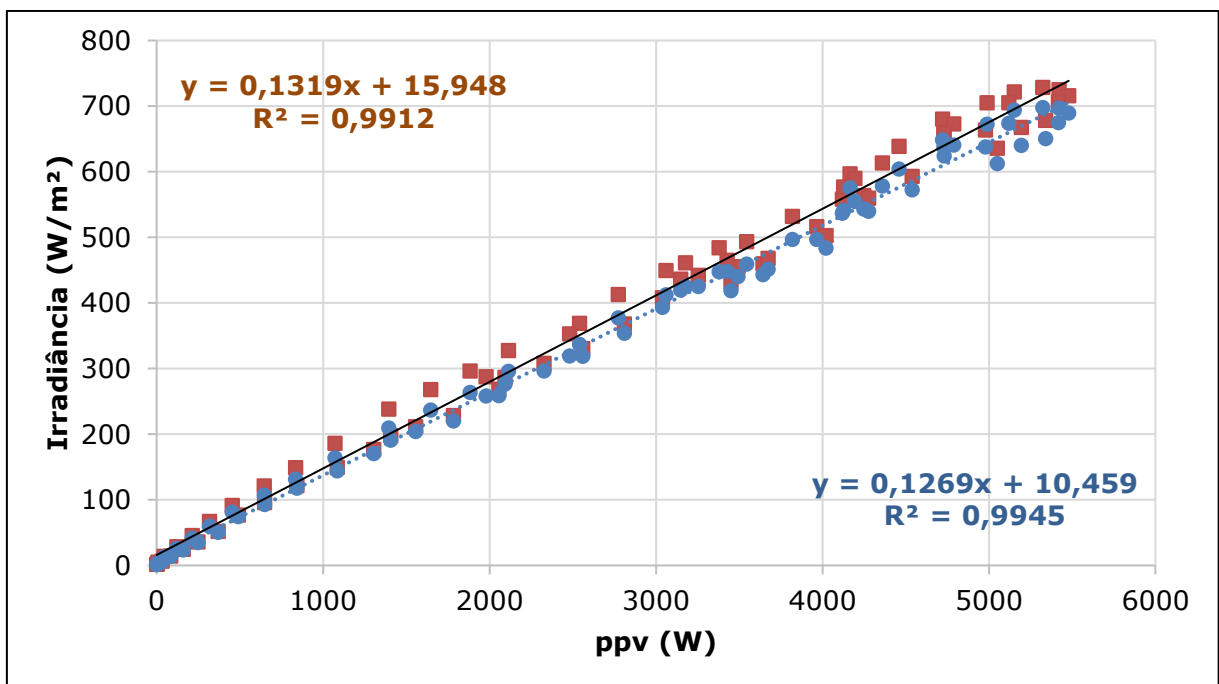
Fonte: Autor (2025).

Pode-se observar de maneira geral, que o comportamento da incidência da variação possui a mesma dinâmica em todos os casos, iniciando às 06:10 HL, tendo um aumento abrupto até as 09:40 HL, seguido de um crescimento acentuado. Cabe também ressaltar, algumas assimetria significativas dos valores do CPM10, que a partir das 09:40 HL, período em que as demais medidas possuem crescimento acentuado, a fazenda se mostra com aumento na chegada de radiação solar, porém, em seguida se normaliza, onde seu pico máximo possui $662,23 \text{ W m}^{-2}$ às 12:20 HL, após esse período seus valores se mantêm abaixo das demais variáveis.

5.4 Correlação

Para melhor visualizar a comparação dos equipamentos com os dados do painel foi realizada a análise da correlação entre os resultados obtidos pelos Piranômetros ST-LITE e ATMOS 41 (W m^{-2}) e produção instantânea do sistema (W) (Figura 22), o qual apresentou um resultado significativo de $r = 0,99$ em ambas as correlações, de acordo com Santos (2007), apresenta correlação forte positiva, o que podemos concluir que há uma forte relação entre as variáveis.

Figura 22 - Gráfico de correlação entre o Piranômetro ST-LITE e produção instantânea do sistema (ppv).



Fonte: Autor (2025)

6. CONCLUSÃO

A análise da produção instantânea média diária do sistema fotovoltaico revelou que a geração de energia varia conforme a incidência de radiação solar ao longo do dia. Observou-se que os valores máximos e mínimos de potência gerada estão diretamente relacionados à disponibilidade de radiação, sendo o valor médio máximo registrado de 5479,15 W às 12:50 HL. O sistema também demonstrou eficiência significativa (>80%) mesmo em condições de menor irradiância, o que reforça sua capacidade de adaptação.

A análise comparativa entre os diferentes equipamentos de medição mostrou pequenas discrepâncias, com perdas médias de captação de radiação solar entre os sensores SP-LITE e ATMOS 41, evidenciando diferenças nas sensibilidades instrumentais, ressaltando o SP-LITE como mais sensível, porém ambos mantem a coerência no padrão de variação da radiação medida.

A comparação entre os dados urbanos e rurais indicou uma dinâmica semelhante na incidência da radiação solar, porém com algumas assimetrias em determinados horários. O pico máximo de radiação ocorreu entre 12:40 e 13:20 HL na área urbana, enquanto na área rural às 12:20 HL. Cabe ressaltar também a diferença no valor máximo médio de irradiância entre as duas áreas, sendo urbana com máximo de 728,19 W m⁻² e a rural de 662,23 W m⁻².

Por fim, a análise estatística da correlação entre a produção fotovoltaica e a radiação solar medida pelos piranômetros revelou um coeficiente de correlação forte ($r = 0,99$), indicando uma relação direta e significativa entre as variáveis. Esses resultados confirmam a confiabilidade das medições, reforçando a previsibilidade da irradiância solar com base na produção fotovoltaica.

6.1 Projetos Futuros

Diante dos achados desta pesquisa, futuros estudos podem explorar a implementação de novas tecnologias para otimizar ainda mais a eficiência dos painéis fotovoltaicos, como o uso de sistemas de rastreamento solar, que ajustam automaticamente o ângulo dos painéis para maximizar a captação da radiação.

Além disso, estudos comparativos entre diferentes tipos de painéis solares, considerando sua durabilidade e rendimento em diferentes condições climáticas, também seriam benéficos. A expansão da pesquisa para outras regiões do Brasil, com diferentes padrões de irradiância, pode oferecer uma visão mais abrangente sobre o potencial da energia solar no país, contribuindo para o avanço da matriz energética sustentável.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. D. M., & Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728 (2013). DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507. Acesso em: 06 de mar. de 2025.
- ALVES, P. V. et al. A importância do conceito da radiação solar na educação básica: a percepção de alunos do ensino médio sobre a temática. 2021. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, e20210054, 2021. Acesso em: 16 de jan. de 2025.
- ALVES, Alceu Ferreira. Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos. 2008. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, 2008. Acesso em: 18 de jan. de 2025.
- BARBOSA, Gabriel V.; ALCÂNTARA, Matheus F. S.; ARAÚJO, MATHEUS R. G.; FONSECA, Tiago T.; RODRIGUES, Rosemberg F. N.; DIAS, Márcio J. Análise de Eficiência Solar em Painéis Fotovoltaicos. 2021. *Revista Processos Químicos*, v. 14, n. 28, p. 108-115, 24 abr. 2021. Acesso em: 18 de jan. de 2025.
- BAROLET, Daniel; CHRISTIAENS, François; HAMBLIN, Michael R. Infrared and skin: Friend or foe. 2016. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, v. 155, p. 78-85, 2016. Acesso em: 06 mar. de 2025.
- BELÚCIO, Liana Pereira; DA SILVA, Ana Paula Nunes; SOUZA, Leandro Rodrigues; MOURA, Geber Barbosa De Albuquerque. Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). 2014. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 29, n 4, p. 494-504, 2014. Acesso em: 06 mar. de 2025.
- CAMPOS, Rodrigo Meneses Oliveira.; NETO, José Henrique Martins. Análise experimental de um painel fotovoltaico para determinação das curvas de corrente vs tensão considerando diferentes níveis de radiação solar e temperaturas da célula. 2008. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS*. 2008. DOI: <https://doi.org/10.59627/cbens.2008.152>. Acesso em: 18 de jan. de 2025.
- Conceitos de Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos. Instituto solar, 20 jul. 2020. Disponível em: <https://institutosolar.com/dimensionamento-de-sistemas-fotovoltaicos/>. Acesso em: 06 mar. de 2025.
- Dimensionador De Painel Para Kit Solar *Off-Grid*. Minha Casa Solar. Disponível em: <https://www.minhacasasolar.com.br/dimensione-seu-sistema-off-grid>. Acesso em: 06 de março de 2025.
- FAPESP. Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo: FAPESP, InterAcademy Council, 2007. Disponível em: <www.fapesp.br/publicacoes/energia.pdf>. Acesso em: 15 de jan. de 2025.
- GRÁCIO, Maria Cláudia Cabrini; DE OLIVEIRA, Ely Francina Tannuri. Indicadores de proximidades em análise de citação de autores: um estudo comparativo entre coeficiente de Correlação de Pearson e Cosseno de Salton. *Informação & Sociedade: Estudos*, v. 25, n. 2, p. 116-116, 2015. Acesso em: 20 de jan. de 2025.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. Estudos avançados. 2007. Dossiê Energia, v. 21, p. 7-20, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142007000100003>. Acesso em: 20 de jan. de 2025.

GREENPRO. Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projetos e instalação. Lisboa, 2004, v. 2. Disponível em: <http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Cidades e Estados. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/santarem.html/>. Acesso em: 06 de mar. de 2025.

JACINTO, A. I.; SIMAS, M. T. M.; BIANCHI, R.; OLIVEIRA, K. N.; RECH, C. M. C. B. Aspectos fisicoterritoriais e atrações turísticas do município de Santarém, Pará, 2006. Disponível em: <http://www2.ifes.com.br/webifef/revista/REVISTA%20DE%20TURISMO/EDI%20C7%20C30/ARTIGOS%20AA20EDI%20C7%20C30/ASPECTOS>. Acesso em: 19 fev. 2025.

MATTOS, Gustavo Marques. Estudo de rendimento e temperatura de painéis fotovoltaicos com uso de técnica de concentração solar. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal Do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Acesso em: 08 dez. 2024.

Matriz Energética e Elétrica. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 06 de março de 2025.

MELO, Eduardo. Funcionamento do Sistema On Grid "Energia Solar Fotovoltaica". Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/funcionamento-do-sistema-grid-energia-solar-eduardo-melo>. Acesso em: 06 de março de 2025.

MGHOUCI, Youness E. Best Combinations of Inputs for ANN-Based Solar Radiation Forecasting in Morocco. 2022. Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy. Volume 27. 25 July 2022. Acesso em: 06 de março de 2025.

Módulo Mono-Facial (RS6-560~575N-E3). Renesola. Disponível em: <https://pt.renesola-energy.com/product/977144052489027584.html>. Acesso em: 06 de março de 2025.

Movimentos da Terra: rotação, translação, precessão e nutação. Meteorologiaenred. Disponível em: <https://en.meteorologiaenred.com/earth-movements.html/>. Acesso em: 06 mar. de 2025.

NIEDZIALKOSKI, Rosana Krauss. Desempenho de painéis solares mono e policristalinos em um sistema de bombeamento de água. 2013. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, p. 261. 2013. Acesso em: 23 de fev. de 2025.

RICIERI, R.P. Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida de radiação solar. 1998. Tese (Doutorado em Ciências Agrônomicas). Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" Faculdade de Ciências Agrônomicas. Botucatu, 1998, p. 81. Acesso em: 15 de fev. de 2025.

SANTOS, Carla. Estatística descritiva: manual de autoaprendizagem. Lisboa: Edições Sílabo, 2007. Acesso em: 15 de fev. de 2025.

SEVERINO, Mauro Moura. Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas da Amazônia. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008. 13 jan. 2025.

SILVA, Matheus Segundo; LANA, Thiago Rocha; JÚNIOR, José Antônio Silva; TALARICO, Matheus G. Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica. 2001. Revista Mythos, p. 51–61, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.36674/mythos.v14i2.467>. Acesso em: 23 de jan. de 2025.

SILVA, V.A.M. Influência da cobertura do céu na estimativa da radiação solar utilizando modelo digital de elevação. 2011. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011. Acesso em: 23 de jan. de 2025.

SILVA, Heitor Marques Francelino; ARAÚJO, Francisco José Costa. Energia solar fotovoltaica no brasil: uma revisão bibliográfica. 2022. Revista Ibero-Americana De Humanidades, Ciências E Educação, v. 8 n. 3, p. 859–869. Disponível: <https://doi.org/10.51891/rease.v8i3.4654>. Acesso em: 15 de jan. de 2025.

SOUZA, José Leonaldo; NICÁCIO, Rosilene Mendonça; MOURA, Marcos Antônio Lima. Global solar radiation measurements in maceió, brazil. 2005. Renewable Energy. v. 30, p. 1203 - 1220, 2005. Acesso em: 15 de dez. de 2025.

SOUZA, Amaury; ARISTONE, Flavio. Estudo da eficiência energética de células fotovoltaicas em função da radiação solar no Centro-Oeste Brasileiro. 2017. Revista de Geografia e Interdisciplinaridade, v. 2, n. 7, 2017. Acesso em: 27 dez. 2024.

Tipos de painéis solares: no mercado e no laboratório (2023). Revista Solar Magazine, 03 jan. 2020. Disponível em: <https://solarmagazine.com/solar-panels/>. Acesso em: 06 de março de 2025.

Tudo sobre Transição Energética: o que é, qual a importância. PETROBRAS, 14 de jul. de 2024. Disponível em: <https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/tudo-sobre-transicao-energetica-o-que-e-qual-a-importancia-principais-beneficios-e-mais>. Acesso em: 15 de jan. de 2025.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações.1. Ed. São Paulo: Érica, 2012. Acesso em: 27 dez. 2024.

ZHANG, Huili; GERVEN, Tom Van; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, Jan. Photovoltaics: Reviewing the European Feed-in-Tariffs and Changing PV Efficiencies and Costs. The Scientific World Journal, DOI: 10.1155/2014/404913, 2014. Acesso em: 06 de março de 2025.