POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR EM PRÉDIOS PÚBLICOS:

estudo de caso do Centro Administrativo do Governo do Estado do Maranhão

GOVERNO DO MARANHÃO
TRABALHANDO PARA TODOS

SEPLAN | IMESC

www.imesc.ma.gov.br

INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR EM PRÉDIOS PÚBLICOS:
estudo de caso do Centro Administrativo do Governo do Estado do Maranhão

São Luís
2024

GOVERNADOR DO ESTADO DO MARANHÃO
Carlos Orleans Brandão Júnior

VICE-GOVERNADOR DO ESTADO DO MARANHÃO
Felipe Costa Camarão

SECRETÁRIO DE ESTADO DE PLANEJAMENTO E ORÇAMENTO
Vinicius Ferro Castro

PRESIDENTE DO INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS
Dionatan Silva Carvalho

DIRETOR DE ESTUDOS AMBIENTAIS E GEOPROCESSAMENTO
José de Ribamar Carvalho dos Santos

DIRETOR DE ESTUDOS E PESQUISAS
Rafael Thalysson Costa Silva

DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURAIS E ESTUDOS AMBIENTAIS
Ronald Bruno da Silva Pereira

DEPARTAMENTO DE GEOPROCESSAMENTO E ESTUDOS TERRITORIAIS
Vitor Raffael Oliveira de Carvalho

COORDENAÇÃO
Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais

ELABORAÇÃO
Elison André Leal Pinheiro
Ronald Bruno da Silva Pereira
Débora Frazão Ferreira
Janderson Rocha Silva (*in memoriam*)

APOIO TÉCNICO
Leonardo Vinicius Cruz Moraes
Matheus de Carvalho Oliveira

COORDENAÇÃO DE COMUNICAÇÃO
Mayara Moraes

REVISÃO DE LINGUAGEM
Geovanna Machado

NORMALIZAÇÃO
Kádila Morais de Abreu

CAPA E DIAGRAMAÇÃO
Carliane Sousa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC)

Potencial de geração de energia solar em prédios públicos: estudo de caso do Centro Administrativo do Governo do Estado do Maranhão [recurso eletrônico] / Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC). São Luís: IMESC, 2024.

59 p.: il. color.

1. Energia Solar – Estudo de caso. 2. Energia renovável. 3. Sistemas Fotovoltaicos. 4. CAE - Maranhão. I. Título.

CDU 551.521.37(078.7)(812.1)

Ficha catalográfica elaborada por Kádila Morais de Abreu (CRB13/815).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização e potência de geração de energia solar dos empreendimentos outorgados e fiscalizados nos estados brasileiros (kW).....15

Figura 2 – Instalações fotovoltaicas e Potência de Instalada por categoria nos municípios maranhenses.....17

Figura 3 – Mapas mensais de insolação total no estado do Maranhão.....24

Figura 4 – Fluxograma metodológico.....27

Figura 5 – Modelo digital de superfície e ortomosaico.....28

Figura 6 – Radiação Solar como componentes diretos, difusos e refletidos.....29

Figura 7 – Fotografia hemisférica ou *Viewshed* (Lente Olho de Peixe).....30

Figura 8 – Ângulos horizontais traçados com base em um ponto específico do MDS, campo de visada hemisférico, representando em quais direções o céu é visível ou não.....30

Figura 9 – Mapa Solar (*Sun Map*).....31

Figura 10 – Mapa do Céu (*Sky Map*).....32

Figura 11 – *Overlay* de *Viewshed* e *Sun Map*; *Overlay* de *Viewshed* e *Sky Map*.....32

Figura 12 – Mapa anual de insolação diária no Brasil e Maranhão.....34

Figura 13 – Potência máxima mensal de energia solar (kWh/mês) e quantidade de placas fotovoltaicas por edifício (unid.).....39

Figura 14 – Edificações do Centro Administrativo do Estado (CAE).....40

Figura 15 – Projeto de Implantação de painéis fotovoltaicos na ALEMA.....42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Energia solar e renovável como parte da energia global 2017–2022.....9

Gráfico 2 – Taxa de crescimento da geração de eletricidade de 2021 e 2022, por tecnologia.....10

Gráfico 3 – Custo de geração de eletricidade solar em comparação com outras fontes de energia 2009-2023 e custo de geração de eletricidade solar em comparação com fontes de energia convencionais 2023.....11

Gráfico 4 – Capacidade anual solar instalada em 2000–2022 e principais mercados solares 2010–2022.....11

Gráfico 5 – Principais mercados solares em 2021/2022.....12

Gráfico 6 – 10 países com maior Participação solar em suas matrizes energéticas e a Capacidade Total Solar Instalada 2000 a 2022.....13

Gráfico 7 – Temperaturas máximas e mínimas médias em São Luís.....19

Gráfico 8 – Temperaturas horárias máximas e mínimas médias em São Luís.....20

Gráfico 9 – Horas de luz solar e crepúsculo em São Luís.....22

Gráfico 10 – Nascer e pôr do sol com crepúsculo em São Luís.....22

Gráfico 11 – Média diária de energia solar de ondas curtas incidente em São Luís.....25

Gráfico 12 – Irradiação solar diária média (Kwh/m². dia).....34

Gráfico 13 – Irradiação Solar no Plano Horizontal para Localidades Próximas.....36

Gráfico 14 – Comparativo de Energia Solar Média Estimada e Energia Solar Média em Estações de Referências.....37

Gráfico 15 – Comparativo de Energia Solar Máxima Estimada e Energia Solar Média em Estações de Referências.....38

Gráfico 16 – Histórico do Consumo Faturado dos últimos meses.....41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Empreendimentos outorgados e capacidade de geração de energia solar nas regiões do Brasil 15

Tabela 2 – Empreendimentos outorgados e capacidade de geração de energia solar – UF 16

Tabela 3 – Estações de Referencias de Irradiação solar diária média (Kwh/m².dia) 35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 6
2 CENÁRIOS PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA SOLAR 8
2.1 Contextualização 8
2.2 Mercados solares globais 11
2.3 Mercado solar do brasileiro 14
2.4 Marco Regulatório da Legislação 18
2.5 Aspectos meteorológicos 19
3 METODOLOGIA 26
3.1 Fotogrametria: parâmetros de voo de drone, mapeamento e processamento digital de imagens 27
3.2 Modelagem da radiação solar 28
3.3 Critérios de adequabilidade 33
3.4 Validador do Modelo de Radiação Solar 33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 39
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 43
REFERÊNCIAS 45
APÊNDICE A – Potencial de radiação mensal em kWh/m²/mês 47
APÊNDICE B – Produção de energia solar por edificação (CAE) 48
APÊNDICE C – Cálculo de Radiação Solar e geração de energia elétrica 49
APÊNDICE D – Vôo Sede - Processing Report 15 june 2023 53

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as questões ambientais, e a busca por fontes de energia limpa e sustentável têm impulsionado a adoção de alternativas mais responsáveis e eficientes para suprir as demandas energéticas em várias regiões ao redor do mundo. Neste contexto, na busca de promover caminhos para a sustentabilidade e energia limpa para as atividades e ambientes do governo do estado do Maranhão, surge este estudo, que tem o intuito de entender, mensurar e identificar os benefícios da adoção da matriz de energia solar por edifícios públicos na área do Centro Administrativo do Estado (CAE), por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

A energia solar é proveniente de uma fonte renovável e inesgotável que emerge no cenário mundial como uma das soluções mais promissoras para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e minimizar os impactos ambientais. Ao explorar o potencial da energia solar em edifícios públicos, este estudo busca posicionar o Maranhão como protagonista na transição para uma matriz energética mais sustentável, uma vez que o estado possui potencialidade natural na capacidade de gerar energia a partir de matriz solar. Ressalta-se que, para apoiar esse quadro, o governo do estado tem adotado diretrizes concretas para o Plano de Governo 2023/2026. Entre as propostas para essas diretrizes, o fator de infraestrutura energética estabelece a elaboração de alguns mecanismos norteadores, tais como:

1. Elaboração de uma política estadual de energia, com ênfase em energias renováveis, eólica e solar, em parceria com universidades, entidades públicas, privadas e sociedade civil;
2. Fortalecimento da parceria com a Universidade Federal do Maranhão (UFMA), a Federação das Indústrias do Estado do Maranhão (FIEMA) e a concessionária de energia elétrica, visando à disseminação do Atlas Eólico e Solar do Maranhão;
3. Revisão da legislação do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS) e da legislação ambiental, para incentivar a implantação de usinas de energia renovável;
4. Instituição de um programa de atração de investimentos para implantação de plantas de energia renovável.
5. Instalação, por meio de parcerias público-privadas (PPP) de estações de energia solar em prédios e áreas públicas, especialmente nas redes estaduais de educação e saúde;
6. Instalação de usinas comunitárias de captação de energia solar e eólica em áreas de assentamento rural e em comunidades tradicionais;
7. Ampliação da quantidade de eletropostos movidos a energia solar, para bicicletas e carros elétricos, como no Parque do Rangedor;
8. Elaboração do projeto do primeiro programa habitacional de interesse social abastecido com energia renovável, iluminação pública, drenagem superficial e

profunda, coleta seletiva de resíduos sólidos, arborização, Estação de Tratamento de Água (ETA), unidade de ensino, unidade de saúde, área de comércio, espaço para esporte, entretenimento e lazer;

9. Elaboração do projeto de implantação de cursos técnicos em energias renováveis em todos os Institutos Estaduais de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IEMAs) localizados em áreas de geração de energia renovável — eólica e solar — e curso de tecnólogo em energias renováveis na Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), com oferta de vagas a partir de 2023.

Além das diretrizes do Plano de Governo 2023/2026, são considerados como base norteadora os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), dos quais podemos destacar os objetivos: 7, que trata sobre energia limpa e acessível; 9, que tem relação com a indústria, inovação e infraestrutura; e 11, que aborda a idealização de cidades e comunidades sustentáveis.

Os benefícios da energia solar se estendem para além dos prédios públicos do Centro Administrativo do Governo e podem ser facilmente replicados em outras instituições governamentais, como hospitais, complexos penitenciários, projetos de habitação social, fornecimento de energia para áreas remotas do estado e escolas administradas pelo governo do Maranhão, entre outras. Ao implementar sistemas fotovoltaicos nessas instituições, o poder público garantirá o fornecimento contínuo de energia limpa, reduzirá custos operacionais e direcionará recursos para outras áreas prioritárias, como a melhoria da infraestrutura e a qualidade dos serviços prestados à população.

Por meio dessa iniciativa, o Maranhão se posiciona como um agente de mudança, buscando não apenas suprir suas demandas energéticas, mas também assumir uma postura proativa na promoção de um futuro mais sustentável e consciente.

O Maranhão possui grande potencial para gerar energia solar e tem adotado diretrizes concretas no Plano de Governo 2023/2026, incluindo políticas para instalação de usinas de energia renovável, parcerias público-privadas (PPP), e incentivo à educação e infraestrutura voltadas para a energia limpa.

2 CENÁRIOS PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA SOLAR

2.1 Contextualização

O potencial de transformar energia solar em energia elétrica foi inicialmente relatado pelo francês Edmond Beckquerel, em 1939. Essa energia consiste no deslocamento de nêutrons e prótons contidos em materiais semicondutores que eram estimulados pela irradiação solar. Até então, a utilização era, primordialmente, destinada aos setores de telecomunicação e foi impulsionada pela corrida espacial, uma vez que os materiais semicondutores podiam fornecer energia suficiente por longos períodos no espaço, devido à sua eficiência e adequabilidade (custo e peso) a um ambiente remoto ao qual o material era exposto.

A crise energética de 1973, que demonstrou efeitos globais e se tornou um marco na história mundial, conhecida como a crise do petróleo, foi desencadeada principalmente pelo embargo e aumento do preço dos barris de petróleo imposto pelos países orientais exportadores (OPEP). Essa medida levou a uma reação em cadeia na economia mundial, revelando a dependência integral do petróleo em várias partes das atividades humanas e a recessão da economia.

Diante dos embargos e do aumento rápido do preço do barril, somados aos custos de transporte, a economia mundial, especialmente nos países dependentes de petróleo, entrou em uma espécie de colapso, evidenciando a necessidade de diversificação de outras fontes de energia.

Visto a necessidade, o conceito de energia renovável entrou como solução a longo prazo, muito em virtude de carregar consigo o discurso de ser uma energia de caráter infinito, limpa e abundante[1]. Nesse sentido, as pesquisas e os esforços foram ampliados na busca de implementar fontes de energia sustentáveis. Nessa perspectiva, ao longo dos anos, diversos incentivos foram adotados para a utilização de energias provenientes de fontes renováveis. É notório também que muitas empresas têm adotado essa iniciativa, ao que chamamos de *economia verde* (Gobbo *et al*., 2018).

Sob esse viés, grandes empresas e empreendimentos têm concentrado seus esforços na geração de energia alternativa, diante das preocupações com o meio ambiente, emissões de gases de efeito estufa e a ideia de que determinadas fontes de energia não renováveis são finitas. Com a diversificação do padrão para geração de energia, temos como alternativas, além da energia vinda do sol, a energia eólica, a biomassa e o próprio hidrogênio verde, sendo o potencial de energia solar o que apresentou maior crescimento de investimento no cenário global.

[1] Ressalta-se que esse discurso positivista acerca das energias renováveis era uma característica da época, na atualidade com o avanço sobre o debate da aplicação, produção e implantação destas formas de energia renováveis. Surgiram estudos dos reais impactos destas formas de produzir energia sobre os coletivos humanos e o ambiente natural.

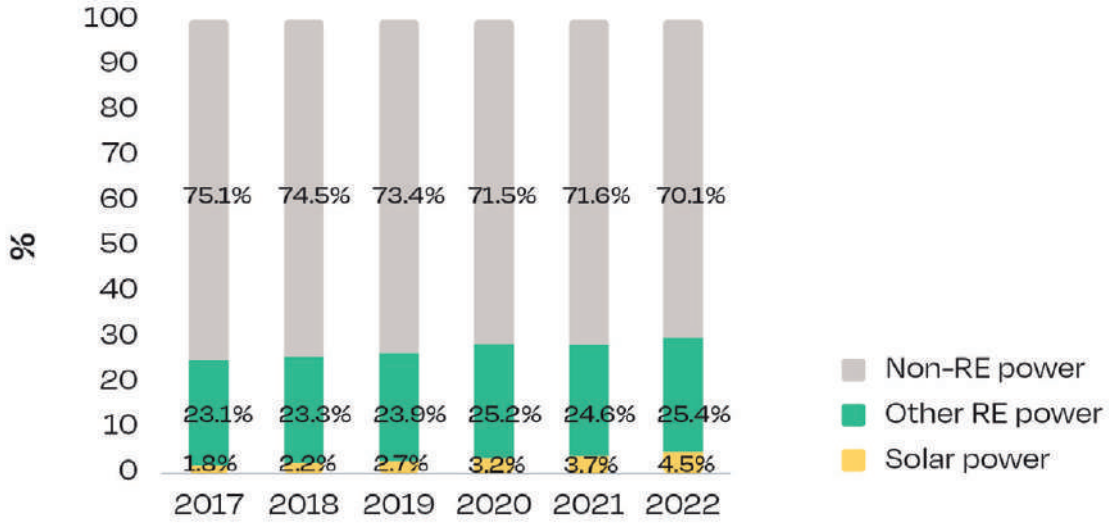
Conforme a Agência Nacional de Energias Renováveis (ANEEL) e a *Global Market Outlook For Solar Power 2023/2027*, a China liderou um dos maiores investimentos em energia renovável, com US$ 102,9 bilhões em 2015. Já os Estados Unidos também investiram consideravelmente, alocando US$ 30,2 bilhões para energia solar.

Na Europa, o Reino Unido e a Alemanha lideraram os investimentos em energia solar e contribuíram para um total de US$ 15,8 bilhões investidos na região. A Alemanha, por sua vez, inaugurou em 2004 o maior sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do mundo, com capacidade de 5 megawatt-hora (MWh) pico, composto por 33.500 módulos.

A Índia, um país em desenvolvimento, investiu US$ 4,6 bilhões em energia solar, reflexo de um compromisso crescente com fontes limpas. O Brasil, com grande potencial solar, recebeu estímulos do Ministério de Minas e Energia para expandir sua capacidade de produção desse recurso, visto o potencial brasileiro natural para essa fonte renovável, graças aos altos índices de radiação. Além disso, o país possui grandes reservas de Quartzo, material este que contém silício, matéria-prima para fabricação de placas fotovoltaicas. Estas características naturais conferem uma certa vantagem econômica e competitiva em relação a outros países.

Apesar do grande potencial, a energia solar contribui com uma pequena parcela do total de eletricidade mundial, representando 4,5% da produção de energia elétrica no ano de 2022. Todavia, apesar da pequena contribuição, isso ainda refletiu um aumento de 22% em 2022, em comparação com os 16% do ano anterior. Isso demonstra um crescimento rápido em relação a outras fontes renováveis. Em contrapartida, as fontes de energia não renováveis mantiveram uma participação de 70,1%, diminuindo 1,6 pontos percentuais em 2022, atingindo o nível mais baixo (**Gráfico 1**).

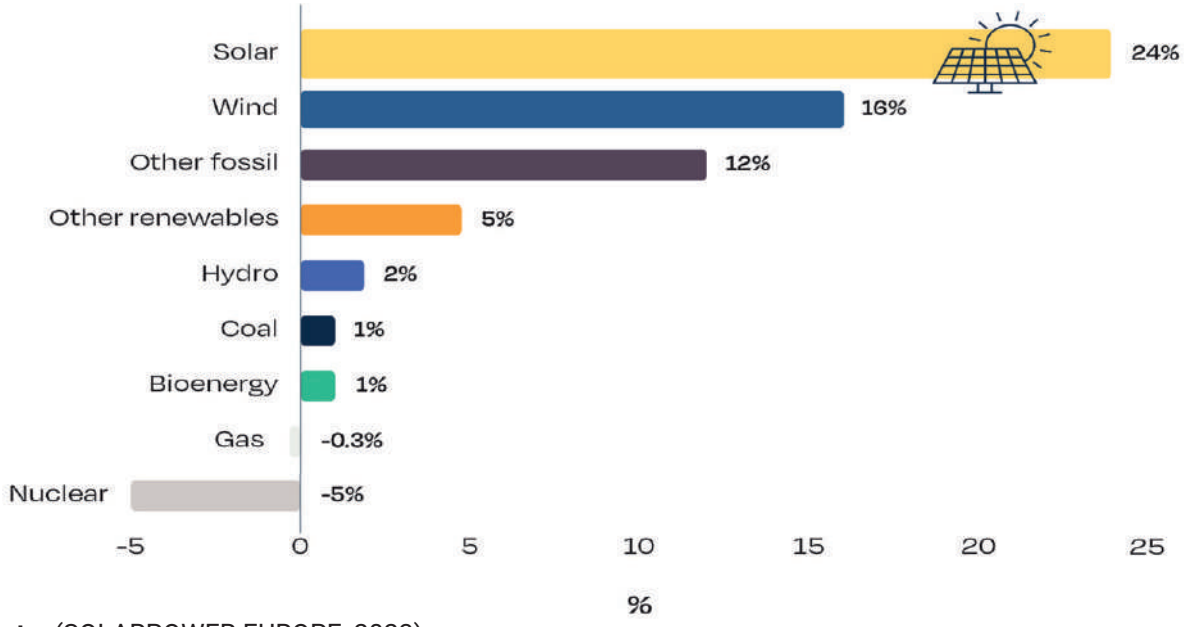
Gráfico 1 – Energia solar e renovável como parte da energia global 2017–2022



Fonte: (SOLARPOWER EUROPE, 2023).

Com crescente o potencial de geração de energia solar, as tecnologias voltadas para essa área produziram 1.289 Terawatt-hora (TWh) em 2022, um aumento de 24% em relação aos 1.040 TWh de 2021 (**Gráfico 2**). O principal fator que impulsionou essa produção foi a redução dos custos dos produtos. No entanto, nos últimos três anos, os preços apresentaram trajetórias ascendentes devido a diversos fatores geopolíticos, como a pandemia da COVID-19, que gerou custos elevados de transporte, especialmente em decorrência do confinamento de empresas em Xangai. Além disso, a guerra na Ucrânia provocou pressões inflacionárias e contribuiu para o aumento do preço do poli silício, que saltou para 38 *United States Dollar* (USD)/kg em 2022, em comparação ao 10 USD/kg no ano anterior.

Gráfico 2 – Taxa de crescimento da geração de eletricidade de 2021 e 2022, por tecnologia

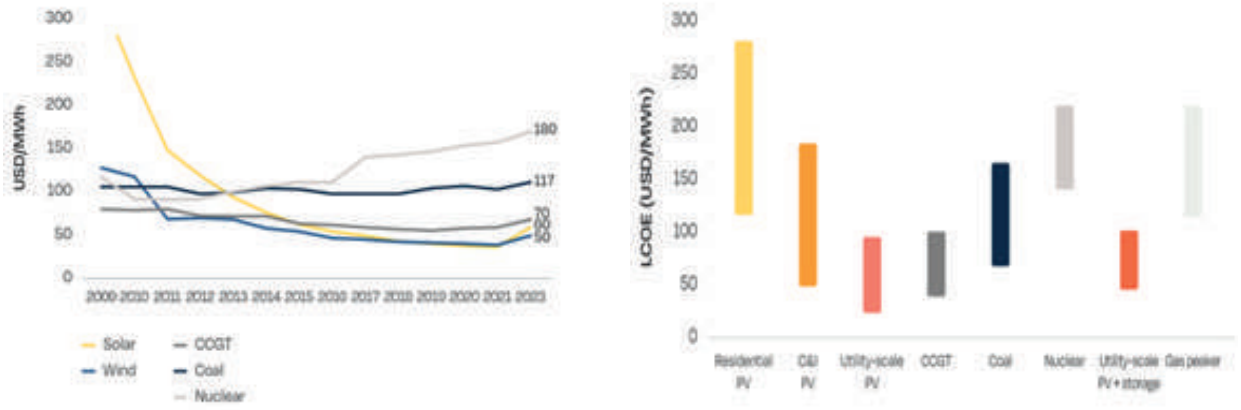


Fonte: (SOLARPOWER EUROPE, 2023).

Diante do aumento dos preços dos produtos, o custo de produção de energia solar quase dobrou entre 2021 e 2023, passou de 36 USD/MWh para 60 USD/MWh, o que representou um aumento mais acentuado em comparação com outras fontes de energia. Contudo, mesmo com esse aumento, a energia solar permaneceu mais barata que quaisquer outras fontes de combustíveis fósseis e nucleares, o que tornou seu custo ainda mais acessível que outras fontes convencionais de geração de energia elétrica (**Gráfico 3**).

O governo planeja ampliar energias renováveis, incluindo incentivos para usinas solares e parceria com a Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e a Federação das Indústrias do Estado do Maranhão (FIEMA).

Gráfico 3 – Custo de geração de eletricidade solar em comparação com outras fontes de energia 2009-2023 e custo de geração de eletricidade solar em comparação com fontes de energia convencionais 2023



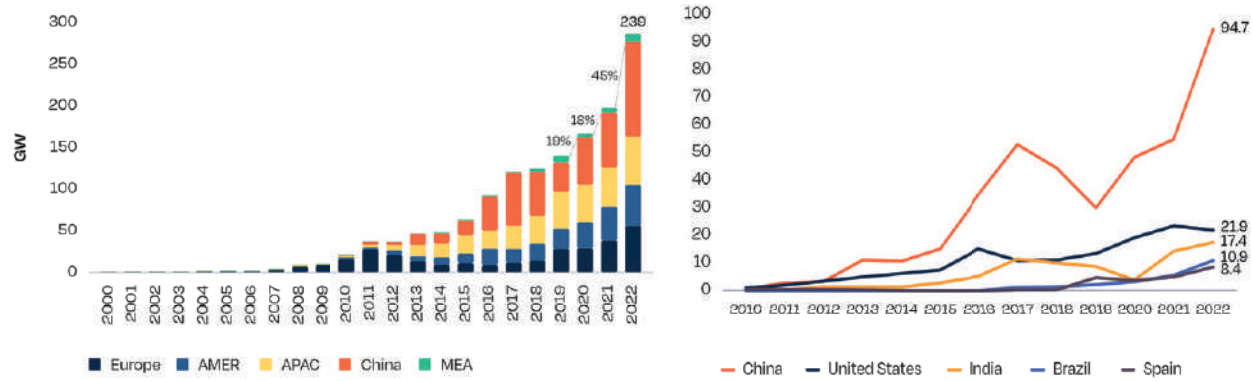
Fonte: (SOLARPOWER EUROPE, 2023).

2.2 Mercados solares globais

O mercado solar global conta com superpotências dominando a produção de energia, países como a China e Estados Unidos têm desenvolvido dinâmica positiva no mercado de energia solar. Pode-se observar também o fenômeno de países como Índia, Brasil, Espanha, Alemanha, Japão, Polônia que têm apresentado um progresso notável neste ramo (**Gráfico 4**).

A China, como já foi abordado, investiu bilhões no mercado solar, tal investimento lhe rendeu o domínio do mercado mundial e uma produção de 94,7 GW de energia anual, o que representa uma taxa de crescimento de 72% em relação aos 54,9 GW instalados em 2021.

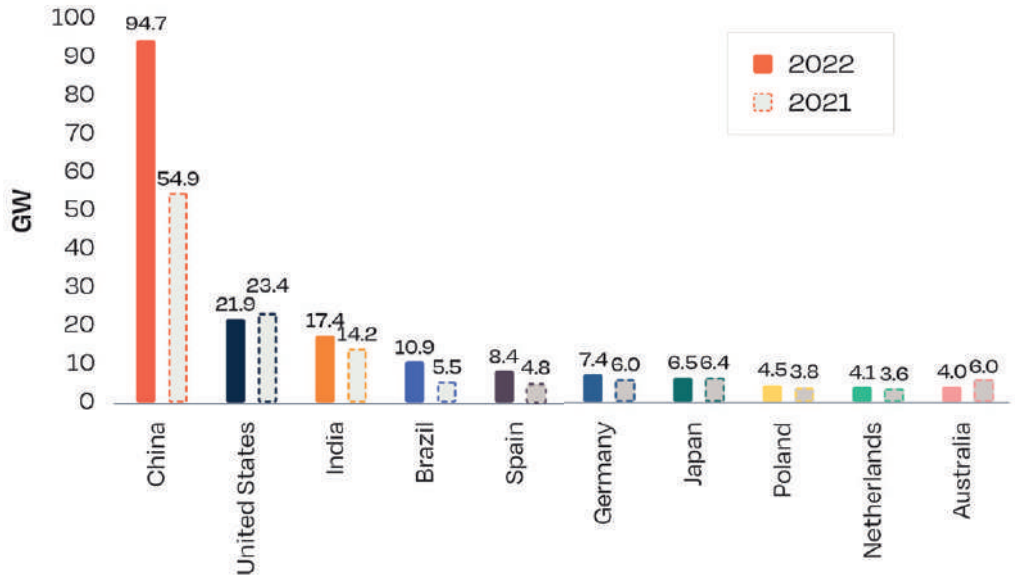
Gráfico 4 – Capacidade anual solar instalada em 2000–2022 e principais mercados solares 2010–2022



Fonte: (SOLARPOWER EUROPE, 2023).

Em 2022, a China manteve seu crescimento no mercado global de energia solar, observando o histórico anual de potencial de geração. Entre 2015 a 2017, houve um crescimento exponencial, com a capacidade aumentada de 12,2 Gigawatt (GW) para 52,8 GW em 2017. Já no período de 2017 a 2019, produção de energia solar sofreu uma queda significativa, sendo a maior queda de produção registrada no histórico até o momento, essa diminuição alcançou marca de 30,1 GW de energia produzida em 2019 e atingiu uma marca de 94,7 GW em 2022 (**Gráfico 5**). O principal seguimento de utilização de energia solar na China foi, principalmente, nos serviços públicos, estabelecimentos residenciais e empresas.

Gráfico 5 – Principais mercados solares em 2021/2022



Fonte: (SOLARPOWER EUROPE, 2023).

Os Estados Unidos da América (EUA), no contexto do mercado global de energia solar, ocupam a segunda posição em potencial de geração de energia elétrica solar. O país apresentou uma redução de 6% em relação ao ano anterior, refletindo 21,9 GW de potência instalada em 2022 em comparação aos 23,4 GW de 2021. A redução se deu por vários motivos, tais como: Leis de Proteção do Trabalho, Redução da Inflação e Retenção na Liberação Alfandegária.

A Índia, na terceira colocação no mercado global de energia solar, tem metas ambiciosas, com o objetivo de atingir 500 GW de capacidade de energia de fontes renováveis até 2030, além do compromisso de alcançar emissões líquidas de zero carbono até 2070.

O Brasil tem avançado significativamente no mercado de energia solar. Em 2021, o país se destacou ao ocupar a sétima posição entre os maiores mercados mundiais. Em 2022, o Brasil alcançou uma posição ainda mais proeminente, ingressando no top 5 mundial e agora ocupa a quarta posição. Esse crescimento expressivo possibilitou a instalação de uma capacidade solar impressionante de 10.9 GW ao longo do ano, o que representa uma duplicação em relação aos 5,5 GW do ano anterior. É importante ressaltar que parte

dessa capacidade instalada se refere a sistemas com uma envergadura de até 5 MW. Esse progresso demonstra o compromisso do Brasil com a expansão da energia solar e seu potencial para liderar o setor no cenário internacional.

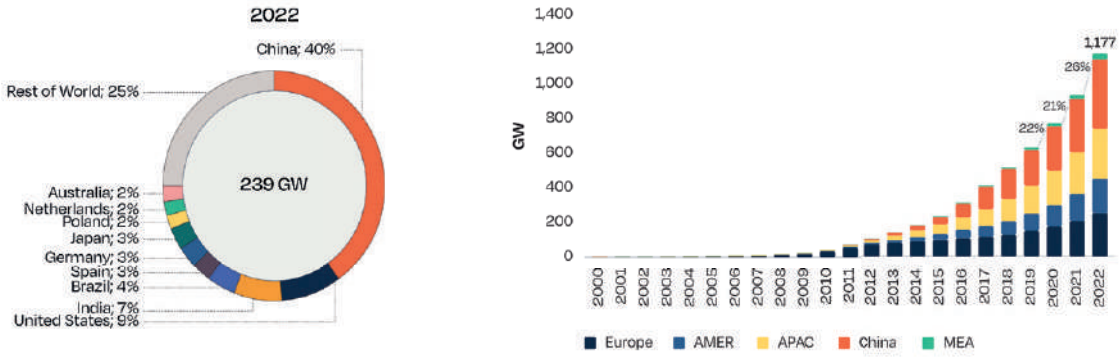
No Brasil, houve recentes alterações nas regulamentações do setor solar, especificamente para os projetos construídos a partir de 2023. Essas mudanças impactaram o sistema de compensação de energia elétrica, que permitia aos consumidores com pequenos geradores em suas unidades consumidoras utilizar a energia gerada para abater o consumo de energia elétrica convencional. Esse benefício desencadeou uma busca massiva por instalações solares até 2022.

A Espanha, por sua vez, se tornou o principal mercado europeu em capacidade instalada, com 8,4 GW em 2022, o que representou um aumento de 76% em relação ao ano anterior. O maior segmento de instalação foi em serviços públicos, que totalizou 5,3 GW em 2022, tornando um dos maiores mercados solares livres de subsídios globais. O país espera instalar mais 25 GW de centrais solares fotovoltaicas em 2023, uma vez que passa por melhorias políticas, no que se refere às licenças ambientais. Fatores como o aumento no preço do gás natural e os altos preços da eletricidade, resultantes da crise energética, incentivaram consumidores e empresas a optarem pela utilização de painéis fotovoltaicos.

No cenário de mercado europeu, a Alemanha também se destacou no mercado global de energia solar. Em 2022, o país registrou um aumento de 23% na capacidade de geração de energia ligada à rede e alcançou 7,4 GW, já o segmento do setor público cresceu de 2,2 GW em 2021 para 3 GW em 2022.

De modo geral, o mercado global teve um bom desempenho no ano de 2022, com um crescimento anual de 45%, o que representa 200 GW em novas instalações. A China foi responsável por 40% das instalações anuais globais em 2022. O **Gráfico 6**, mostra a participação dos 10 principais mercados globais.

Gráfico 6 – 10 países com maior Participação solar em suas matrizes energéticas e a Capacidade Total Solar Instalada 2000 a 2022



Fonte: (SOLARPOWER EUROPE, 2023).

A capacidade total global acumulada de sistemas fotovoltaicos registrou um crescimento de 25%, atingindo 1.177 GW em relação aos 938 GW de 2021. O ano de 2008 foi considerado um marco importante para mercado solar, quando o nível de 10 GW foi superado. Em 2012, o setor alcançou 100 GW, seguido por 500 GW em 2018, registrando marca de 1.177 GW em 2022.

2.3 Mercado solar do brasileiro

O mercado solar brasileiro busca diversificar o fornecimento de energia elétrica no país, promover a adoção fontes solares e minimizar as pressões sobre os recursos hídricos, que frequentemente enfrentam escassez durante períodos de estiagem. Esse fenômeno influencia diretamente no aumento tarifário de fornecimento de energia elétrica no país.

Com a implementação da energia solar, o Brasil pode se tornar um protagonista no que se refere ao desenvolvimento social, econômico e sustentável, além de facilitar uma transição energética mais sustentável.

O Brasil possui dois segmentos importantes no mercado de energia solar:

- Geração Distribuída: engloba sistemas fotovoltaicos de pequeno e médio porte, com capacidade igual ou inferior a 5 MW.
- Geração Centralizada: compreende usinas fotovoltaicas de grande porte, com potência acima de 5 MW, que comercializam a energia elétrica por meio de leilões de mercado regulado pelo Governo Federal.

Em 2022, o Brasil atingiu um acréscimo anual de 10.809 MW em capacidade total instalada de energia solar fotovoltaica, deste, 8.290 MW provenientes da geração distribuída e 2.519 da geração centralizada. Essa ação atraiu diversos empresários, instituições financeiras e investidores nacionais e internacionais para incentivar e contribuir com o crescimento do mercado, a fim de alavancar e aumentar a competitividade nacional.

Um dos principais motivos para o aumento da capacidade instalada de painéis solares, em 2022, foi a mudança na regulamentação para geração de energia distribuída, com a aprovação da Lei n.º 14.300, de 6 de janeiro de 2022, a qual trouxe mais segurança jurídica e transparência ao mercado de energia solar, adotando um mecanismo de taxa gradual para utilização da rede. Contudo, essa taxa, estabelecida em Lei, entra em vigor para os projetos solicitados a partir de 2023. Isso gerou uma procura massiva por consumidores e investidores para apresentarem novos projetos antes do final do ano de 2022.

O progresso da energia solar no Brasil, em relação aos novos projetos registrados na ANEEL (2024a), conta atualmente com mais de 141.646,6 kW, sendo apenas 10.436,5 kW de potência fiscalizada. Isso reflete o real interesse das partes nesse setor, uma vez que essa geração de energia solar se configura como uma estratégia para reduzir os custos com eletricidade e fortalecer a sustentabilidade no país.

Na divisão regional do Brasil, a região Norte é a que apresenta a maior quantidade

de usinas fotovoltaicas instaladas, seguida da região Centro-Oeste. No entanto, quando se trata de potência outorgada e fiscalizada, as regiões Nordeste e Sudeste se destacam com os maiores valores[2] (**Tabela 1**).

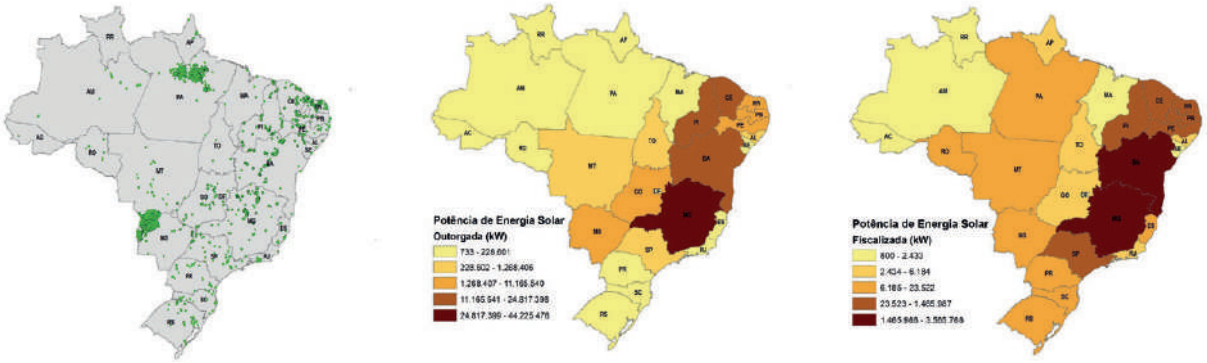
Tabela 1 – Empreendimentos outorgados e capacidade de geração de energia solar nas regiões do Brasil

Região	Quantidade (unid.)	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)
Norte	14.408	622.302	44.770
Nordeste	2.028	82.231.635	5.823.064
Sudeste	1.131	45.648.628	4.477.797
Sul	100	51.847	54.847
Centro-oeste	3.456	12.322.583	39.051

Fonte: (ANEEL, 2024a).

O estado de Minas Gerais domina o mercado nacional com 44.225.475,68 kW de potência outorgada e 3.565.768,15 kW de potência fiscalizada, sendo o estado que detém a maior produção de energia fotovoltaica no país. O segundo estado com a maior produção de energia solar é a Bahia, com 24.817.398,35 kW outorgados e 2.050.711,35 kW fiscalizados, seguido pelos estados do Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte (**Figura 1** e **Tabela 2**).

Figura 1 – Localização e potência de geração de energia solar dos empreendimentos outorgados e fiscalizados nos estados brasileiros (kW)



Fonte: (ANEEL, 2024a).

A posição geográfica próxima ao Equador favorece o estado com alta incidência solar anual, ideal para geração de energia solar.

[2] Os valores de potência outorgada são aqueles considerados no ato de outorga. A potência fiscalizada é considerada com base na operação comercial de cada unidade geradora. Os valores de potência outorgada e potencial fiscalizado não consideram a geração distribuída em unidades consumidoras.

Tabela 2 – Empreendimentos outorgados e capacidade de geração de energia solar – UF

UF	Região	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)
RO	Norte	508	14.573,26	14.573,26
AC	Norte	698	1.412,20	1.412,20
AM	Norte	16	826,04	826,04
RR	Norte	2	2.100	2.100
PA	Norte	13.103	15.634,96	15.634,96
AP	Norte	1	4.039,20	4.039,20
TO	Norte	80	583.716,40	6.184,40
MA	Nordeste	11	228.600,53	2.432,53
PI	Nordeste	455	18.601.746	1.465.987
CE	Nordeste	441	17.004.601	810.551
RN	Nordeste	226	11.165.539,99	463.764,62
PB	Nordeste	106	4.404.041,20	461.023,20
PE	Nordeste	147	5.477.350,63	564.054,05
AL	Nordeste	18	531.624	3.740
SE	Nordeste	17	733,288	800
BA	Nordeste	607	24.817.398,35	2.050.711,35
MG	Sudeste	1.014	44.225.475,68	3.565.768,16
ES	Sudeste	18	12.707,99	12.707,99
RJ	Sudeste	17	179.882,90	5.319,30
SP	Sudeste	82	1.230.561,82	894.001,82
PR	Sul	36	15.949,31	15.949,31
SC	Sul	18	12.376,09	12.376,09
RS	Sul	46	23.521,80	23.521,80
MS	Centro-Oeste	2.950	4.362.436,32	10.952,32
MT	Centro-Oeste	356	1.268.406,35	21.906,35
GO	Centro-Oeste	149	6.700.828,60	5.280,60
DF	Centro-Oeste	1	912	912

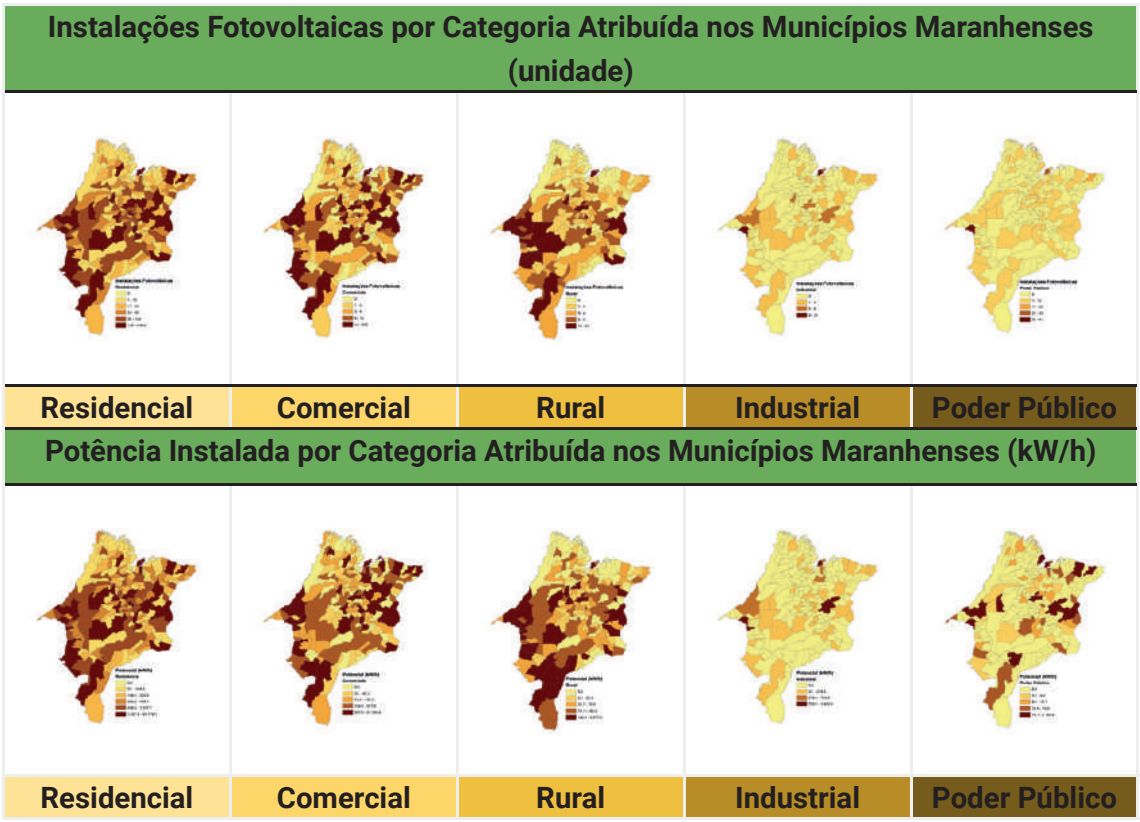
Fonte: (ANEEL, 2024b).

Entre os nove estados do Nordeste, o Maranhão é um dos que apresenta a menor aderência ao potencial de geração de energia elétrica proveniente de matriz solar, na frente apenas de Sergipe. Apesar do potencial climático e ambiental do estado para geração de energia solar, ainda existe um longo caminho a ser percorrido para se tornar referência na geração elétrica, especialmente na região Nordeste. Dessa forma, é crucial enfrentar desafios relacionados à infraestrutura de transmissão de rede, articulação entre as esferas governamentais para estruturar políticas públicas e programas de incentivos, além de fortalecer o eixo sustentável do estado.

Em relação aos municípios maranhenses, a maior busca por equipamentos fotovoltaicos vem setor residencial, com 34.040 equipamentos instalados, com capacidade

de potência para geração de energia de 316.673,14 kWh. Em seguida, o setor comercial se destaca, com 2.948 instalações e uma potência geradora de 121.569,72 kWh. Embora, o mercado de painéis fotovoltaicos no setor rural, apresente baixa representatividade, mostra-se promissor, uma vez que até o momento o setor possui 925 painéis instalados, que geram 26.950,5 kWh de energia elétrica. A participação de painéis fotovoltaicos em indústrias, somou 165 instalações, o que rendeu a geração de 12.077,88 kWh de energia elétrica (**Figura 2**).

Figura 2 – Instalações fotovoltaicas e Potência de Instalada por categoria nos municípios maranhenses



Fonte: (ANEEL, 2024b).

O poder público representa um total de 167 instalações em todo o estado, gerando 9.068 kWh de energia elétrica. O serviço público apresenta cinco unidades instaladas, localizadas em Imperatriz, Pedreiras, São Luís, e Timon, que juntas detêm uma produção total de 1.232 kWh de energia, segundo dados disponibilizados pela ANEEL. Em relação à iluminação pública, apenas duas cidades utilizam o sistema de iluminação por meio de painéis fotovoltaicos: Imperatriz e Timon, que, juntas, são capazes de gerar 13 kWh de energia.

2.4 Marco Regulatório da Legislação

O desenvolvimento da energia solar no Brasil foi marcado por diversos marcos regulatórios ao longo da história. Um dos mais influentes e relevantes foi a Lei n. º 9.991, de 24 de julho de 2000, que destinou recursos para o programa de eficiência energética por meio da Conta de Desenvolvimento Energético (CDE). Embora não tenha sido desativada especificamente para o setor de energia solar, ela permitiu alocar recursos para iniciativas de energias renováveis.

Em 2012, a ANEEL aprovou a Resolução Normativa n.º 482, de 17 de abril, que estabeleceu critérios para geração e distribuição de energia, incluindo a energia solar. A medida visa permitir que consumidores produzam a sua própria eletricidade por meio de fontes renováveis e que o excedente seja distribuído na rede elétrica em troca de créditos para compensar consumo posterior. Essa iniciativa provocou um *boom* no crescimento da energia solar no país.

Com os avanços do mercado de energia solar no país, foi estabelecido um novo Marco Regulatório mais específico. A Resolução Normativa n. º482/2012 da ANEEL, estabeleceu condições de acesso para micro e minigeradores de energia elétrica, favorecendo a instalação de sistemas de geração de energia solar de até 5MW, beneficiando diversos consumidores e aquecendo ainda mais o mercado.

Em 2015, outra Resolução Normativa número n.º 687, de 24 de novembro, possibilitou uma espécie de consórcios de sistema de geração de energia, que possibilitou o compartilhamento de créditos de energia entre consumidores de um mesmo grupo ou empreendimento, além desse sistema, foi possível também utilizar os créditos em outros locais, desde que sob a mesma titularidade, e aumentou do prazo de validade dos créditos, de 36 para 60 meses, conforme publicado na nova atualização, prevista inicialmente para 2019, foi realizada por meio da Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023. Esse Ato promoveu adequações dos regulamentos da ANEEL às disposições da Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022, bem como aos estudos promovidos desde 2018, além de consolidar as disposições referentes à Micro e minigeração distribuída (MMGD) e ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) nas condições gerais de fornecimento de energia (Resolução Normativa nº 1.000, de 17 de dezembro de 2021).Já em 2022, foi instituído o marco legal da minigeração e microgeração de energia solar distribuída por meio da Lei n.º 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Essa nova lei alterou as Leis n.º 10.848, de 15 de março de 2004, e n.º 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e deu as seguintes providências: o autoconsumo do consumidor-gerador, com o excedente compensado em forma de créditos pelo mesmo titular da unidade consumidora, a adoção de consórcios de consumidores de energia elétrica, entre outras disposições legais contidas na lei.

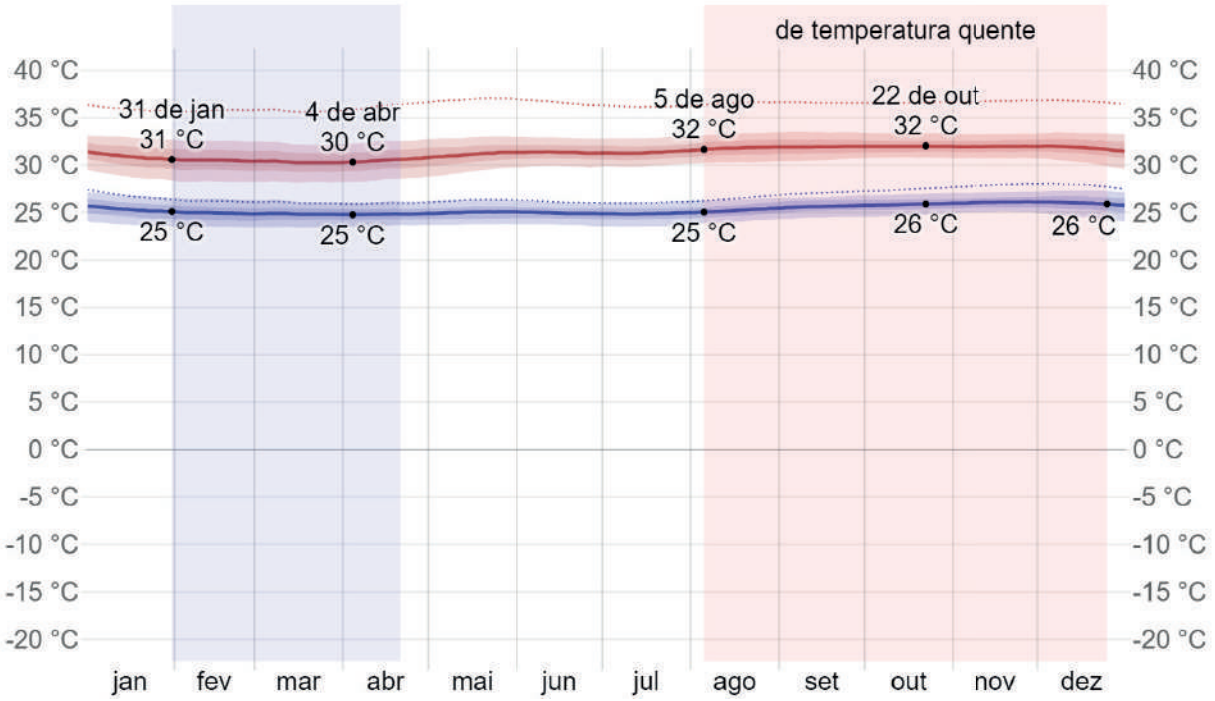
2.5 Aspectos meteorológicos

A Ilha do Maranhão é uma região de baixa latitude, aproximadamente 2° ao sul do Equador, fator que exerce uma influência direta nas características climáticas e, consequentemente, em seu potencial para a produção de energia solar. A proximidade com o Equador proporciona uma incidência solar perpendicular e constante ao longo do ano, o que é um fator crucial para a viabilidade da energia solar na região.

O clima tropical úmido (classificação de Köppen: AWW'), caracterizado por temperaturas elevadas e duas estações bem definidas, favorece a disponibilidade de radiação solar, especialmente durante a estação seca, que ocorre entre os de julho a dezembro. Nesse período, a menor ocorrência de nuvens e precipitação contribui para uma maior incidência de energia solar, o que eleva o potencial para geração de eletricidade a partir de sistemas fotovoltaicos.

A temperatura média varia entre 25 °C e 32 °C, com menor amplitude térmica diária. Embora temperaturas mais elevadas possam reduzir a eficiência dos painéis solares, a baixa amplitude térmica favorece a previsibilidade no desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Além disso, a proximidade com o litoral e o oceano contribui para uma menor variabilidade climática, o que torna o ambiente relativamente estável para a operação de sistemas de energia solar ao longo do ano (**Gráfico 7**).

Gráfico 7 – Temperaturas máximas e mínimas médias em São Luís



Fonte: (Clima ..., [2024]).
Nota: Temperatura máxima (linha vermelha) e mínima (linha azul) médias, com faixas do 25º ao 75º e do 10º ao 90º percentil. As linhas finas pontilhadas são as temperaturas médias percebidas correspondentes.

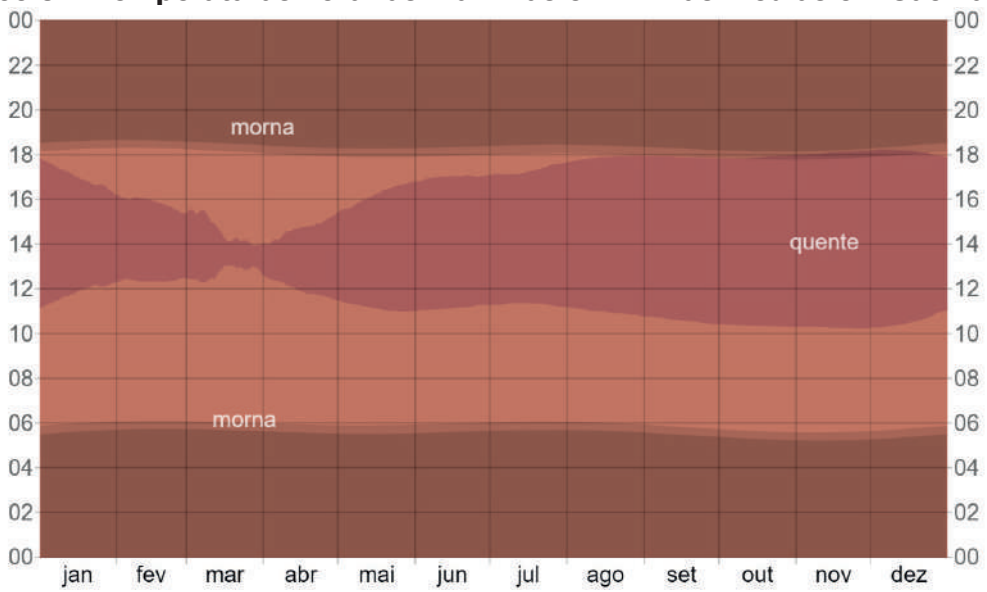
Ao considerar as características climáticas, especialmente em relação às temperaturas médias e à duração solar, a proximidade com a linha do Equador assegura uma duração diária de insolação que excede a 12 horas, o que proporciona uma disponibilidade quase constante de radiação solar ao longo do ano.

A variação de insolação e temperatura ocorre entre 6h e 18h, com os maiores picos de temperatura sendo registrados entre 11h e 18h durante os meses de julho a janeiro. Esse período coincide com a estação seca, quando há menor cobertura de nuvens e, consequentemente, possa diminuir ligeiramente a eficiência dos painéis fotovoltaicos devido ao aquecimento, não compromete significativamente a produção de energia, pois a alta insolação compensa a perda de eficiência térmica.

Nos meses de março e abril, o pico de temperatura concentra-se entre 12h e 14h, indicando uma janela menor de máxima radiação solar direta. Entretanto, mesmo nesse período, a média diária de insolação continua a ser favorável para a produção de energia solar, com uma duração significativa de exposição à luz solar direta.

A média anual com horas de sol é 3.063,16, ou cerca de 255 horas por mês, o que indica de um grande potencial para a geração de energia solar. Esse volume de horas de exposição solar proporciona uma base robusta para o planejamento e operação de sistemas fotovoltaicos, permitindo um fluxo constante de eletricidade ao longo do ano. Além disso, a constância na duração do dia, típica de regiões próximas ao Equador, permite uma previsão mais precisa da geração de energia, o que é uma vantagem significativa em comparação com regiões de latitudes mais elevadas, em que a variação sazonal na duração do dia é mais significante (**Gráfico 8**).

Gráfico 8 – Temperaturas horárias máximas e mínimas médias em São Luís



Fonte: (Clima ..., [2024]).
Nota: A temperatura horária média, codificada em faixas coloridas. O crepúsculo civil e a noite são indicados pelas áreas sombreadas.

Os fenômenos astronômicos de solstícios e equinócios, resultantes da inclinação do eixo de rotação da Terra e sua posição em relação ao Sol, desempenham um papel fundamental na definição das estações do ano e influenciam o potencial de produção de energia solar.

No solstício de verão no Hemisfério Sul, a Terra se encontra inclinada de forma que esse hemisfério recebe a maior incidência de raios solares durante o dia. Nesse período, o dia é mais longo, com maior duração de luz solar. Essa condição é extremamente favorável para a produção de energia solar, uma vez que a extensão das horas de insolação e a intensidade dos raios solares atingem seu ponto máximo. No caso da Ilha do Maranhão, situada próximo à linha do Equador, essa diferença não é tão extrema quanto em latitudes mais elevadas. Contudo, ainda há um aumento na duração das horas de sol, o que maximiza o aproveitamento energético durante esse período.

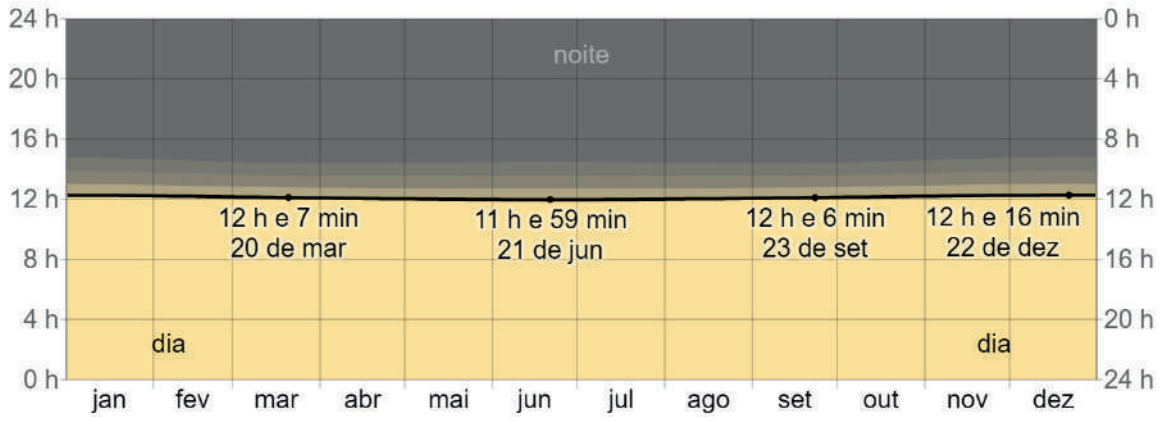
No solstício de inverno, o Hemisfério Sul está inclinado de forma que recebe menor incidência de luz solar. Consequentemente, a duração do dia é mais curta, e a quantidade de radiação solar disponível para conversão em energia é reduzida. No entanto, essa variação é menos pronunciada em comparação a regiões de latitudes médias e altas. A diminuição da duração do dia afeta a produção de energia solar, mas o impacto é mitigado pela posição geográfica da região, que mantém uma média elevada de horas de sol ao longo do ano.

Durante os equinócios, a Terra está posicionada de tal forma que os Hemisférios Norte e Sul recebem luz solar de maneira praticamente igual ao longo do dia. Nessas condições, a duração do dia e da noite é aproximadamente igual, o que resulta em uma distribuição mais uniforme da radiação solar. Para o Hemisfério Sul, isso significa que, nos equinócios de março e setembro, há uma transição suave entre as estações, sem variações drásticas na duração do dia. Esse equilíbrio favorece uma produção estável de energia solar, com menor flutuação na quantidade de radiação disponível para captação.

Em termos de impacto sobre a produção de energia solar, as variações sazonais, tanto em termos de duração do dia quanto de intensidade de radiação solar, são menos acentuadas em comparação a regiões mais distantes do Equador, alcançando uma diferença média de 1 hora e 11 minutos entre os períodos de solstícios e equinócios (**Gráfico 9)**. Dessa forma, a região experimenta uma disponibilidade consistente de radiação solar ao longo do ano.

A Ilha do Maranhão tem grande potencial para a produção de energia solar devido à sua proximidade com o Equador e alta incidência solar, com uma média anual de 3.063 horas de sol. A estação seca, entre julho e dezembro, e a estabilidade climática favorecem o desempenho de sistemas fotovoltaicos, garantindo uma produção consistente de energia ao longo do ano.

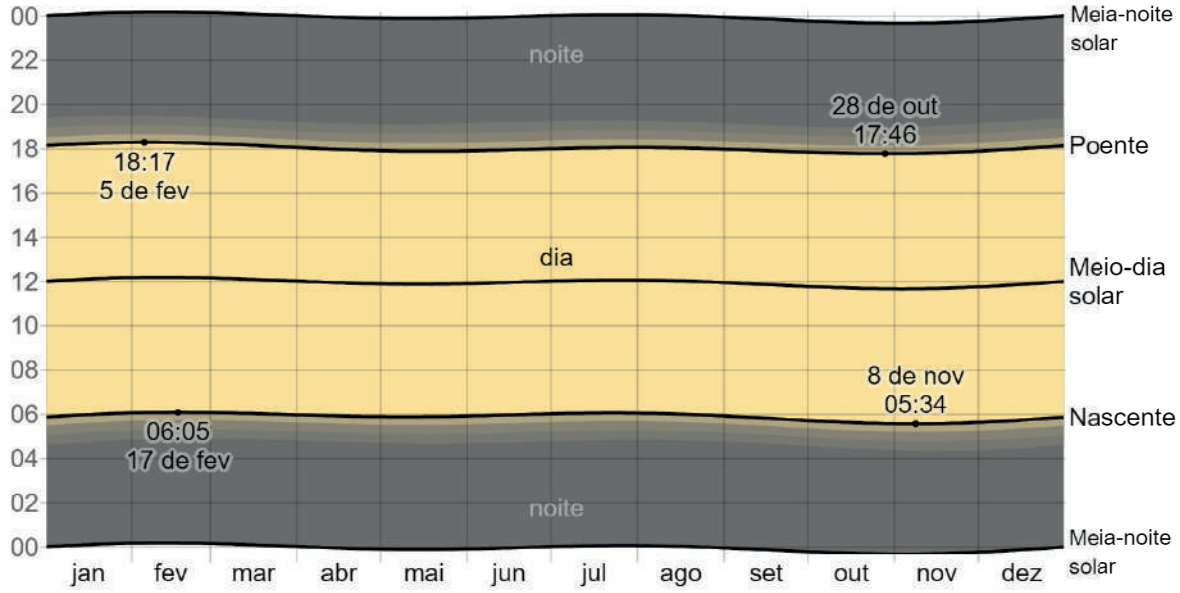
Gráfico 9 – Horas de luz solar e crepúsculo em São Luís



Fonte: (Clima ..., [2024]).
Nota: Número de horas em que o sol é visível (linha preta). De baixo (mais amarelo) para cima (mais cinza), as faixas coloridas indicam: luz solar total, crepúsculo (civil, náutico e astronômico) e noite total. Equinócio de outono: 20 de março às 18h25; Solstício de inverno: 21 de junho às 11h58; Equinócio de primavera: 23 de setembro às 03h50; Solstício de verão: 22 de dezembro às 00h27.

A constância nos padrões de insolação garante um fluxo relativamente estável de energia, com flutuações sazonais menos impactantes. Isso permite um planejamento mais eficiente e previsível da geração de energia solar, o que torna a região uma área altamente favorável para o aproveitamento da energia solar, considerando a constância da radiação solar ao longo do ano (**Gráfico 10**).

Gráfico 10 – Nascer e pôr do sol com crepúsculo em São Luís



Fonte: (Clima ..., [2024]).
Nota: Dia solar durante o ano de 2023. De baixo para cima, as linhas pretas são a meia-noite solar anterior, o nascer do sol, o meio-dia solar, o pôr do sol e a meia-noite solar seguinte. O dia, os crepúsculos (civil, náutico e astronômico) e a noite são indicados pelas faixas coloridas que vão do amarelo ao cinza.

A posição geográfica, aliada à sua alta incidência de insolação ao longo do ano, contribui significativamente para o potencial de produção de energia solar. A insolação, que corresponde ao período em que o Sol está visível e o céu está livre de nuvens ou outros fenômenos atmosféricos, é um fator determinante na eficiência dos sistemas fotovoltaicos, pois influencia diretamente a quantidade de radiação solar disponível para a conversão em eletricidade.

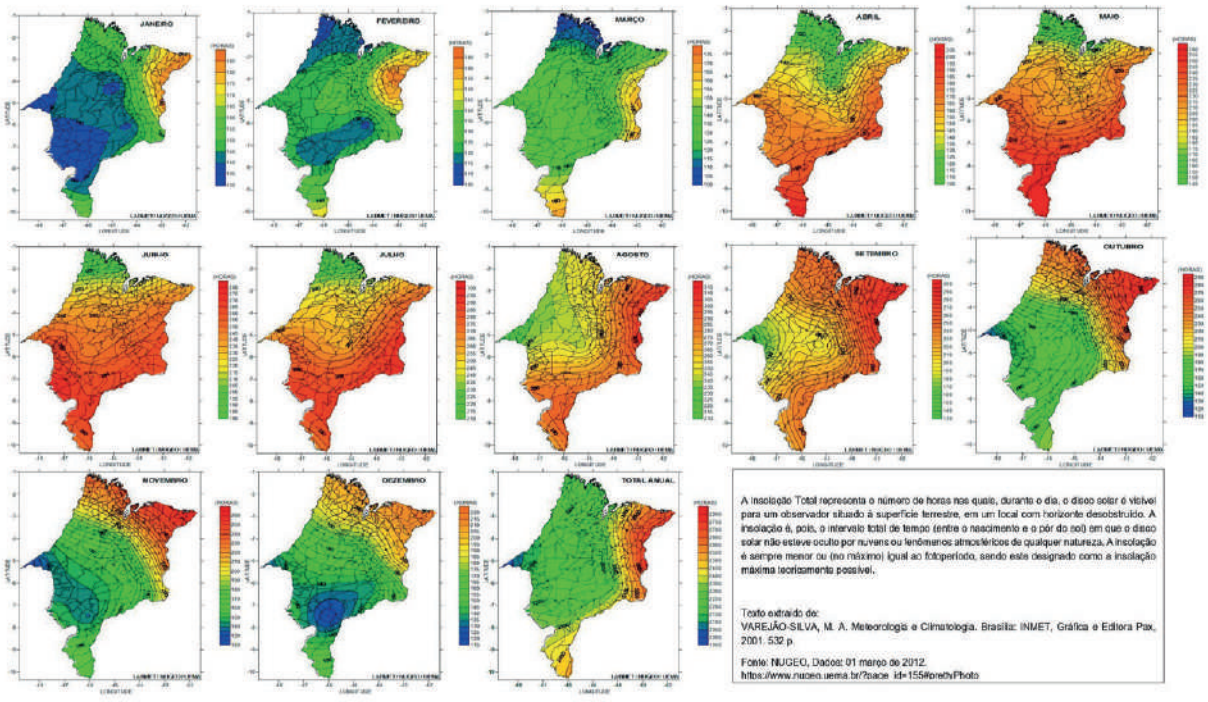
No Maranhão, observa-se que o período de abril a outubro apresenta condições particularmente favoráveis para a energia solar, com altos índices de insolação. Durante esses meses, o estado registra uma média mensal máxima de até 315 horas de sol, com destaque para agosto, que é o mês de maior insolação. Isso indica que, nesse período, há menos interferência de nuvens e fenômenos climáticos, o que maximiza a captura de radiação solar e, portanto, a eficiência dos sistemas solares. Essa alta disponibilidade de luz solar faz com que os sistemas fotovoltaicos operem em sua capacidade máxima e gerem mais energia e, consequentemente, aumentem o retorno sobre o investimento em tecnologias solares.

Por outro lado, os meses que compreendem o período chuvoso, principalmente de novembro a março, são caracterizados por uma redução significativa da insolação devido à maior presença de nuvens. Em março, por exemplo, é registrado o mínimo extremo de 100 horas de sol, o que reflete a forte influência da estação chuvosa nesse período. Embora a redução da insolação nesses meses impacte a produção de energia solar, esse efeito é parcialmente mitigado pela alta insolação registrada nos meses de seca.

A variação de insolação total anual no Maranhão, como é mostrado na **Figura 3**, situa-se entre 1.950 e 2.800 horas de sol por ano, uma indicação clara do grande potencial energético do estado. Regiões que recebem entre 2.500 e 3.000 horas de sol por ano são consideradas altamente adequadas para a produção de energia solar. Com sua média anual de insolação dentro dessa faixa, o Maranhão apresenta condições muito favoráveis para o desenvolvimento de projetos de energia solar em larga escala. As áreas do nordeste do estado, que registram os maiores picos de insolação, são particularmente promissoras para a instalação de fazendas solares, dada a alta incidência de luz solar e a baixa interferência de nuvens durante a maior parte do ano.

Em síntese, o padrão de insolação no Maranhão, com um ciclo bem definido entre as estações seca e chuvosa, permite um planejamento estratégico na instalação de sistemas solares, de modo a otimizar a produção durante os meses de alta insolação e reduzir as perdas durante o período de menor radiação. O elevado número de horas de sol anual, aliado à distribuição espacial da insolação que favorece o nordeste do estado, posiciona o Maranhão como uma região com grande potencial para a exploração de energia solar, contribuindo significativamente para a matriz energética sustentável do Brasil.

Figura 3 – Mapas mensais de insolação total no estado do Maranhão



Fonte: (UEMA, 2012).

A insolação solar, medida como a quantidade de energia solar que atinge uma área específica da superfície terrestre em um determinado intervalo de tempo, é um fator essencial na estimativa da produção de energia solar. Essa variável determina diretamente o potencial de geração de eletricidade por sistemas fotovoltaicos.

A variação da insolação ao longo do dia, entre diferentes regiões e durante as estações do ano, afeta a eficiência dos sistemas solares. Durante o período de máxima insolação, os painéis fotovoltaicos operam em sua capacidade ideal, convertendo mais radiação solar em eletricidade. Por outro lado, durante os períodos de menor insolação, como nas primeiras horas da manhã ou durante os meses de maior nebulosidade ou precipitação, a produção de energia tende a diminuir devido à menor disponibilidade de radiação solar.

No contexto da área de estudo, a variação mensal e espacial da insolação é um indicador crucial para o dimensionamento e o planejamento de sistemas solares. Nos meses de maior insolação, como de julho a novembro, quando a radiação solar é mais intensa e constante, os sistemas solares podem ser projetados para captar a máxima quantidade de energia possível, aproveitando o maior número de horas de luz solar. Nesse período, a produção de energia atinge seu pico, o que contribui para uma geração mais eficiente e econômica.

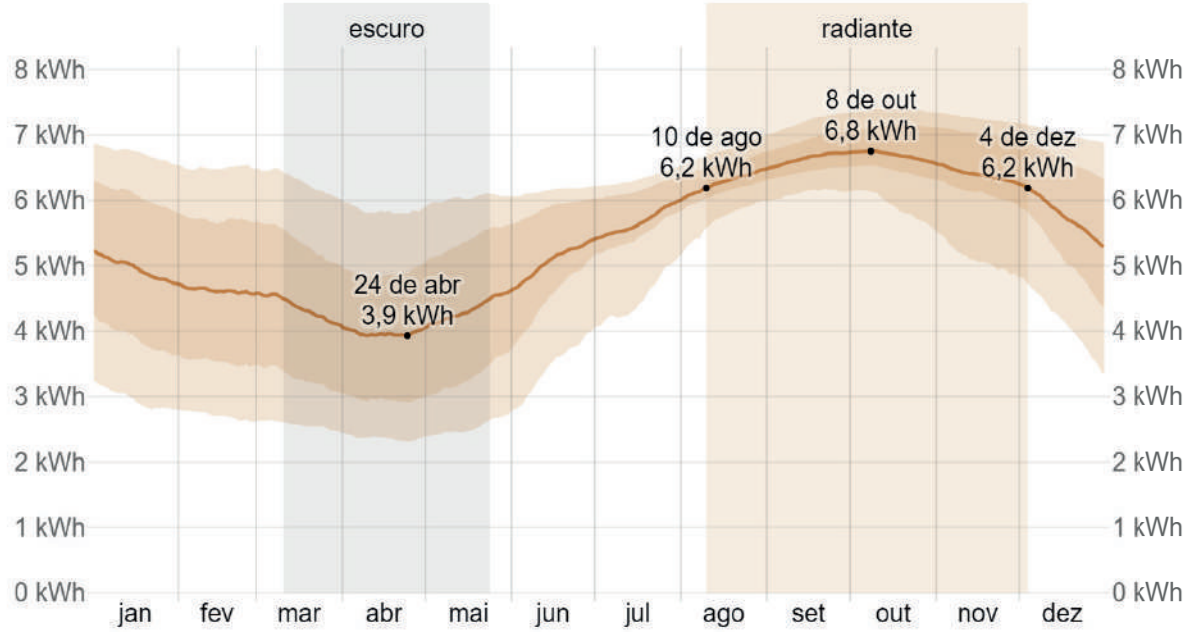
Em contrapartida, nos meses com maior presença de nuvens e precipitação, como de janeiro a maio, o planejamento energético precisa considerar a diminuição da insolação. Nesses meses, a produção de energia solar será reduzida, exigindo, talvez, a necessidade de sistemas de armazenamento de energia ou de fontes complementares para garantir a estabilidade do fornecimento.

Além disso, a variação geográfica da insolação na região, conforme destacado nos mapas mensais, indica que certas áreas, como o nordeste do estado, têm maior potencial solar em comparação a outras regiões, devido à maior quantidade de horas de sol anuais. Essa informação é vital para a escolha de locais ideais para a instalação de usinas solares, onde a captura de radiação solar será maximizada.

Em termos de estimativas energéticas, ao conhecer a quantidade de insolação recebida por uma determinada área ao longo do dia e do ano, é possível calcular a produção potencial de energia. Esse cálculo é baseado na integração da radiação solar recebida com a eficiência dos painéis fotovoltaicos. A energia gerada é diretamente proporcional à quantidade de radiação solar incidente, o que significa que áreas com maior insolação terão um rendimento energético superior.

Portanto, regiões com alta insolação, como o Maranhão durante grande parte do ano, apresentam um potencial significativo para a geração de eletricidade solar, favorecendo o desenvolvimento de uma matriz energética limpa e sustentável, adaptada às condições climáticas locais (**Gráfico 11**).

Gráfico 11 – Média diária de energia solar de ondas curtas incidente em São Luís



Fonte: (Clima ..., [2024]).
Nota: Energia solar de ondas curtas média que chega ao solo (linha laranja), por metro quadrado, com faixas do 25º ao 75º e do 10º ao 90º percentil.

Considerando a insolação mensal e a quantidade de energia solar de ondas curtas incidente em São Luís, observa-se que, nos meses de maio a dezembro, a quantidade de energia potencial produzida pode chegar a até 6,8 kWh, o que corresponde ao período de maior insolação e de incidência solar. Em contrapartida, os meses de janeiro a abril, representam o período de menor insolação e incidência solar, uma vez que podem gerar até 3,9 kWh de energia solar.

3 METODOLOGIA

O estudo seguiu um conjunto de procedimentos metodológicos composto por três etapas interligadas e complementares, conduzidas de forma sequencial para alcançar com êxito o objetivo central da pesquisa. Na primeira etapa, foram realizados o planejamento de voo e o mapeamento com o drone. O objetivo dessa etapa foi garantir uma cobertura eficiente e abrangente das instalações públicas do CAE. Essa etapa incluiu a escolha da altitude de voo, a definição da trajetória e a seleção dos pontos de interesse a serem capturados. A coleta de dados por meio do drone foi essencial para a obter as imagens que foram posteriormente processadas.

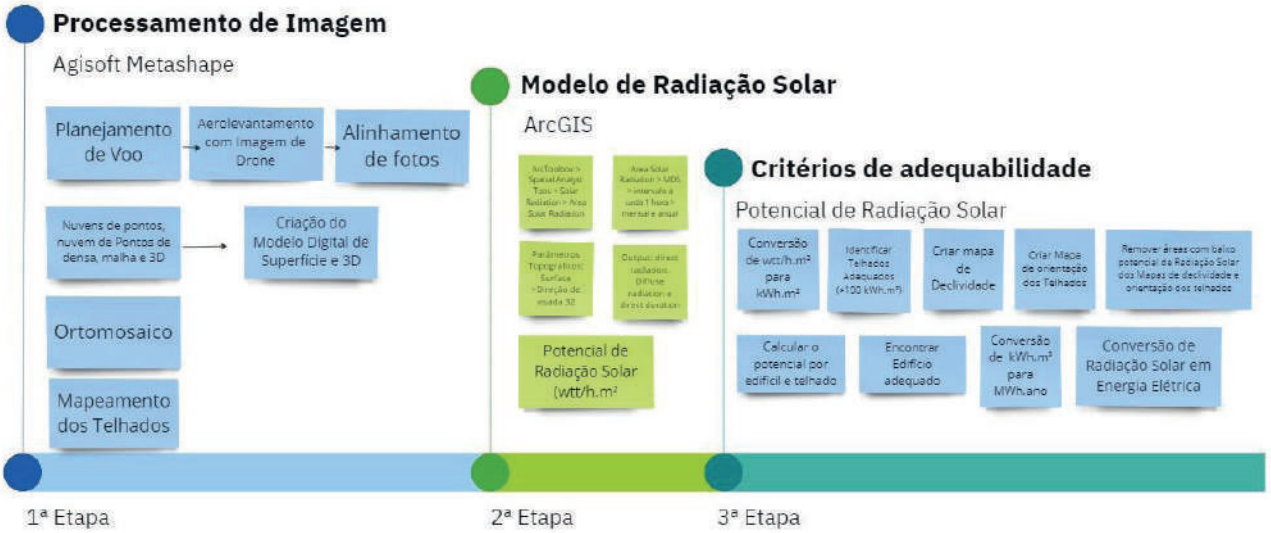
Na segunda etapa, os dados capturados pelo drone passaram por um processamento de imagens. Esse procedimento visou criar um modelo digital de superfície detalhado (MDS) das áreas em estudo. Além disso, foi elaborado um mosaico das instalações, o que foi crucial para a obtenção de representações visuais de alta qualidade das áreas mapeadas.

Na terceira etapa, foi desenvolvido um modelo de radiação solar com base no algoritmo *Hemispherical Viewshed* do ArcGIS. Esse modelo possibilitou calcular o nível de radiação global, direta, indireta e difusa recebida em pontos da superfície mapeada. Isso permitiu identificar as áreas da superfície que estavam diretamente expostas à radiação solar em diferentes momentos ao longo do dia e do ano. Essa análise proporcionou uma compreensão mais precisa da distribuição da radiação solar incidente, além de quantificar detalhadamente a quantidade de energia solar disponível em diferentes partes da área analisada (ESRI, 2020).

Os resultados obtidos foram complementados pela sobreposição de mapas de declividade, aspecto e orientação dos telhados nas instalações. Por meio dessa análise conjunta, foi possível avaliar o grau de adequação das superfícies para a geração de energia elétrica a partir da energia solar. Superfícies com exposição favorável à radiação solar e ângulos adequados foram identificadas como locais com maior potencial para a instalação de painéis solares (**Figura 4**).

Foram três etapas principais para avaliar o potencial de energia solar nas instalações do CAE:
a) o planejamento de voo e o mapeamento com drone;
b) as imagens capturadas foram processadas para criar um modelo digital de superfície.
c) foi desenvolvido um modelo de radiação solar com ArcGIS, permitindo a identificação de áreas ideais para a instalação de painéis solares.

Figura 4 – Fluxograma metodológico



Fonte: Elaborada conforme informações de Amarante *et al*. (2019) e Franco e Pinheiro (2020).

3.1 **Fotogrametria:** parâmetros de voo de drone, mapeamento e processamento digital de imagens

O aerolevantamento foi realizado no CAE, localizado na avenida Jerônimo de Albuquerque, em São Luís-MA. O equipamento utilizado foi o *Drone DJI Mavic Air 2*[3], e o programa empregado para o planejamento do voo foi o *Drone Deploy*. A seguir, são apresentados os parâmetros de cada etapa do aerolevantamento:

Quadro 1 – Parâmetros de cada etapa do aerolevantamento

Parâmetros de Voo:	Parâmetros da Câmera:	Parâmetros do Modelo Digital de Elevação
Sistema de Coordenadas: WGS 84 (EPSG:4326) Sobreposição longitudinal: 60 Sobreposição latitudinal: 70 Números de Imagens: 183 Altitude do Voo: 120 metros Resolução: 3.8 cm/pix Área: 0.169 km² Erro de Projeção: 1.36 pix	Modelo da Câmera: FC200 (4.73mm) Resolução: 4.000 x 3.000 Distância Focal: 4.73 mm Tamanho do Pixel: 1.57 x 1.57	Resolução: 7.59 cm/pix Altitude: -46 a 45 metros

Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

[3] Disponível em: https://www.dji.com/br/mavic-air-2/specs.

O processamento das imagens adquiridas pelo drone foi realizado com software *Agisoft Metashape*. Esse programa utiliza um conjunto de algoritmos para alinhar as fotos e gerar de nuvens de pontos em caráter tridimensional. Com base nessas informações, é possível, em etapas subsequentes, criar uma malha tridimensional capaz de replicar a cena em 3D, além de permitir a geração do modelo digital de superfície do mosaico (**Figura 5**).

Figura 5 – Modelo digital de superfície e ortomosaico

Fonte: Dados da Pesquisa (2023).

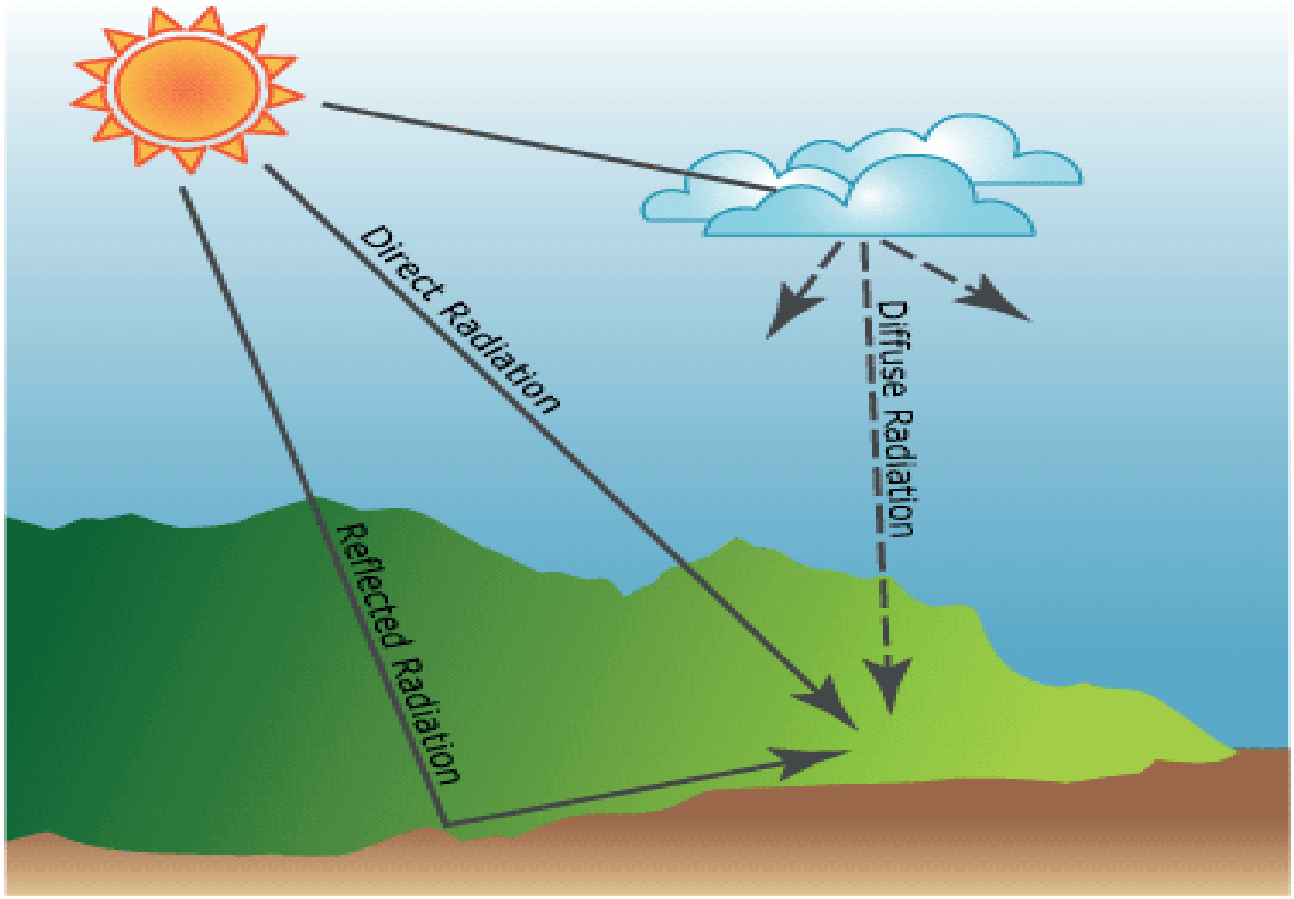
As informações direcionadas sobre calibração da câmera de mapeamento, coeficientes de calibração, matriz de correlação, erros residuais, erros Z (Altitude), erros X e Y, além de parâmetros de mapeamento e processamento, estão disponíveis no material suplementar (ver Apêndice D).

3.2 Modelagem da radiação solar

Para modelar a radiação solar, é fundamental compreender os conceitos básicos relacionados à radiação que atravessa a atmosfera. Essa radiação sofre modificações à medida que passa por essa camada de partículas e é alterada novamente ao ser interceptada pela topografia das superfícies. A radiação solar recebida pelas superfícies, também denominada de insolação, pode ser entendida como radiação direta, que é interceptada em linha direta com o sol; radiação difusão, que é espalhada por fatores atmosféricos, como, nuvens, cristais de gelo, vapor d'água, poeira e etc., e radiação refletida, que como o nome sugere, é a radiação que é refletida devido às características das superfícies (**Figura 6**).

De modo geral, o maior componente da radiação solar é a direta, seguida da radiação difusa, já a radiação refletida compreende uma pequena parte da proporção da radiação total. Na modelagem de radiação solar pelo ArcGis no *Spatial Analyst Tools,* a radiação refletida não é incluída no cálculo de radiação total.

Figura 6 – Radiação Solar como componentes diretos, difusos e refletidos



Fonte: (ESRI, 2020).

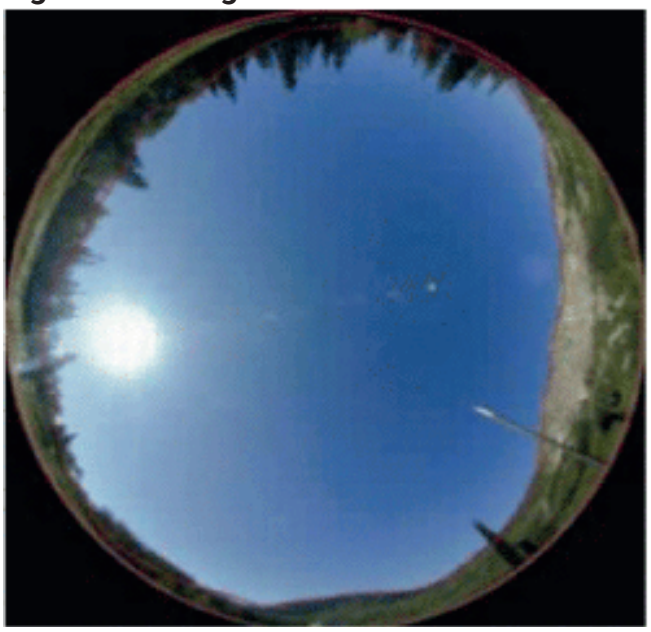
Para o cálculo de radiação solar local, consta na modelagem 4 etapas que envolvem os seguintes mecanismos (Apêndice C).

1. O cálculo de um *viewshed* hemisférico voltado para cima, com base na topografia.
2. Sobreposição do *viewshed* em um mapa solar direto para estimar a radiação direta.
3. Sobreposição do *viewshed* em um mapa do céu difuso para estimar a radiação difusa.
4. A repetição do processo para cada local de interesse, afim de produzir um mapa de insolação.

Visto que a radiação solar é afetada pela topografia e pelas características da superfície, um fator-chave do algoritmo para mapeamento é visão hemisférica voltada para cima[4], em um ângulo de 90° dos MDS (**Figura 7**). Com base nessa visão hemisférica é possível identificar a quantidade de céu visível, mensurando assim a radiação que a topografia ou superfície[5] pode receber ao longo do dia, mês e ano.

[4] As visões hemisféricas são semelhantes às fotografias hemisféricas (olho de peixe) voltadas para cima, que visualizam todo o céu do chão para cima, semelhante à visão de um planetário.
[5] Leva em consideração a influência local das sombras, edificações, árvores, topografia do relevo e etc.

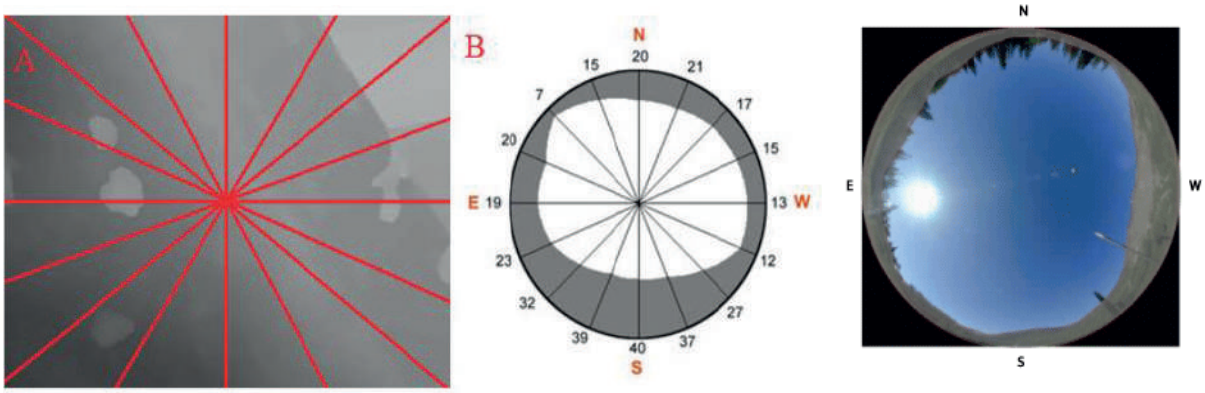
Figura 7 – Fotografia hemisférica ou *Viewshed* (Lente Olho de Peixe)



Fonte: (Fu; Rich, 1999).

O *viewshed*, como representação de um céu visível ou obstruído em um determinado local, realiza um cálculo que pesquisa diversas direções ao redor do local de interesse, determinando a quantidade de obstruções do céu ou ângulo do horizonte. Por padrão são utilizadas 32 direções, que podem adotar valores múltiplos de 8 (8, 16, 24, 32...). Para superfícies suaves, são utilizados 8 ângulos do horizonte, enquanto para superfícies com topografia complexa, são utilizados 32 ângulos (**Figura 8**).

Figura 8 – Ângulos horizontais traçados com base em um ponto específico do MDS, campo de visada hemisférico, representando em quais direções o céu é visível ou não[6]



Fonte: (Fu; Rich, 1999).

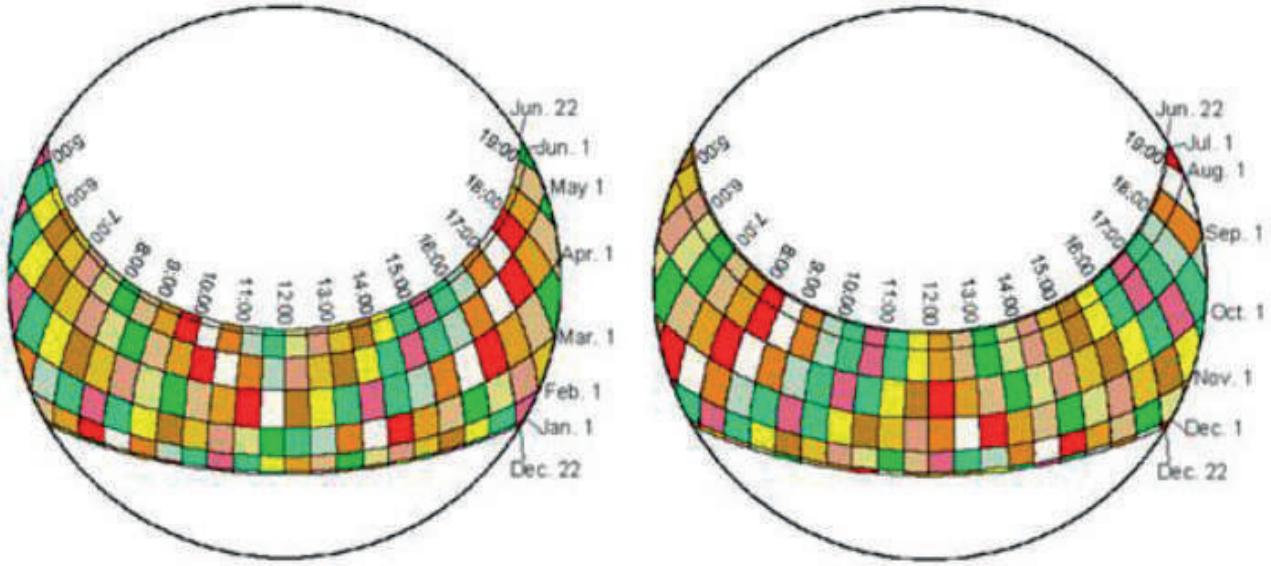
[6] O *Viewshed* resultante caracteriza se as direções do céu são visíveis (mostradas em branco) ou obstruídas (mostradas em cinza). O *viewshed* é mostrado sobreposto em uma fotografia hemisférica para demonstrar a teoria.

Os ângulos do horizonte não são convertidos em um sistema de coordenadas hemisféricas, representando assim, um hemisfério tridimensional de direções, como uma imagem raster bidimensional. A cada célula raster do *viewshed* é atribuído um valor que indica se a direção do céu está visível ou obstruída. As localizações das células de saída (linha e coluna) correspondem ao ângulo zenital θ (ângulo relativo à reta ascendente) e ao ângulo azimutal α (ângulo relativo ao norte) no hemisfério das direções.

Os *viewsheds* são empregados em conjunto com a posição solar e os dados de orientação do céu (representados por um mapa solar e um mapa celeste). Isso permite o cálculo das componentes de radiação total (soma da radiação direta e da difusa) em cada local, resultando na geração de um mapa de radiação solar altamente preciso.

O mapa solar (*Sun Map*) consiste em uma representação rasterizada que mostra a trajetória do Sol ao longo das horas do dia, mês e ano. As representações dos setores do mapa solar são definidas com base na latitude da área de estudo e na posição do sol conforme ele se move no céu durante o dia e ao longo do ano. Cada valor estabelecido no mapa solar é único e exclusivo, alinhando-se com o centroide, zênite e o ângulo de azimute (**Figura 9**).

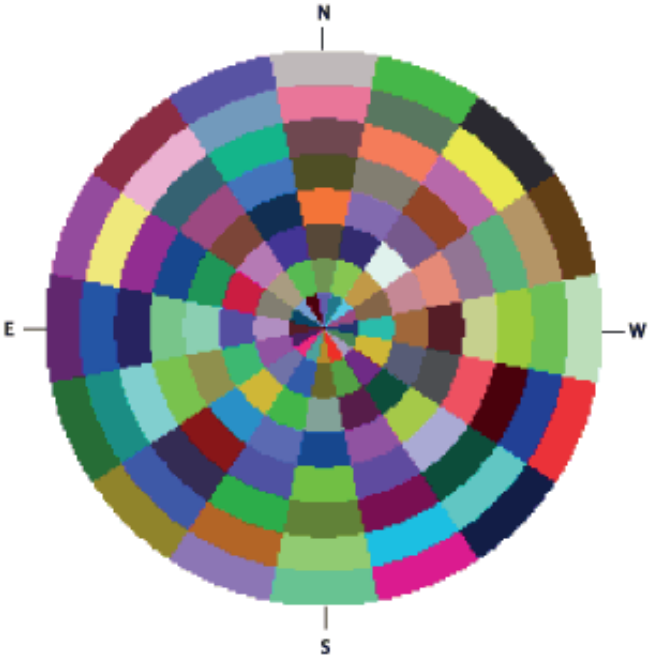
Figura 9 – Mapa Solar (*Sun Map*)



Fonte: (Fu; Rich, 1999).

Em relação ao mapa do céu (*Sky Map*), ele se refere à visão hemisférica de todo o céu, que é dividido em setores definidos pelo ângulo zênite e azimute do centroide. Para cada setor é atribuído um valor único. Desse modo, a radiação difusa é vista em todas as direções, resultante da dispersão por componentes atmosféricos, como nuvens, cristais de gelo, vapor d'água e poeira. Na **Figura 10**, o mapa do céu (*Sky Map*) está dividido em 8 setores zenitais e 16 divisões azimutais. Cada cor representa um setor único do céu, que contribui para a radiação difusa.

Figura 10 – Mapa do Céu (*Sky Map*)



Fonte: (Fu; Rich, 1999).

Para mensurar o potencial de radiação solar (direta e difusa), é necessário realizar um *overlay* entre o *Sun Map* e o *Sky Map*. A área visível de cada setor do céu é calculada dividindo o número de células desobstruídas pelo número total de células em cada setor.

A figura a seguir ilustra a sobreposição de um *viewshed* em um mapa solar e em um mapa celeste. As áreas em cinza representam as direções do céu que estão obstruídas. A radiação solar é calculada somando a radiação direta e difusa proveniente das direções desobstruídas do céu.

Figura 11 – *Overlay* de *Viewshed* e Sun Map; *Overlay* de *Viewshed* e *Sky Map*

Fonte: (Fu; Rich, 1999).

3.3 Critérios de adequabilidade

De modo geral, o modelo de potencial de radiação solar não considera apenas a variação sazonal do trajeto do sol e as atenuações atmosféricas, como abordado anteriormente. Ele também contempla a latitude, a elevação, o MDS, a orientação dos telhados e a sombra projetada pela topografia ao redor.

Para os critérios de adequabilidade, foram primeiramente identificados telhados planos ou com inclinação de até 45°, excluindo-se das análises as encostas íngremes, que tendem a receber menos luz solar. Além disso, foram consideradas adequadas as áreas que recebem acima de 100 kWh/m² de radiação solar. As áreas que recebem radiação solar abaixo de 100 kWh/m² foram excluídas utilizando a ferramenta condicional do ArcGIS.

Para estimar a inclinação dos telhados, foi criado um mapa de declividade, e foram excluídas, por meio da ferramenta Con (*Spatial Analyst*) do *ArcToolbox*, as áreas com inclinação superior a 45°. Também foi gerado um mapa de aspecto e orientação do terreno com o uso da ferramenta Aspect (*Spatial Analyst*), que define a orientação e direção dos telhados.

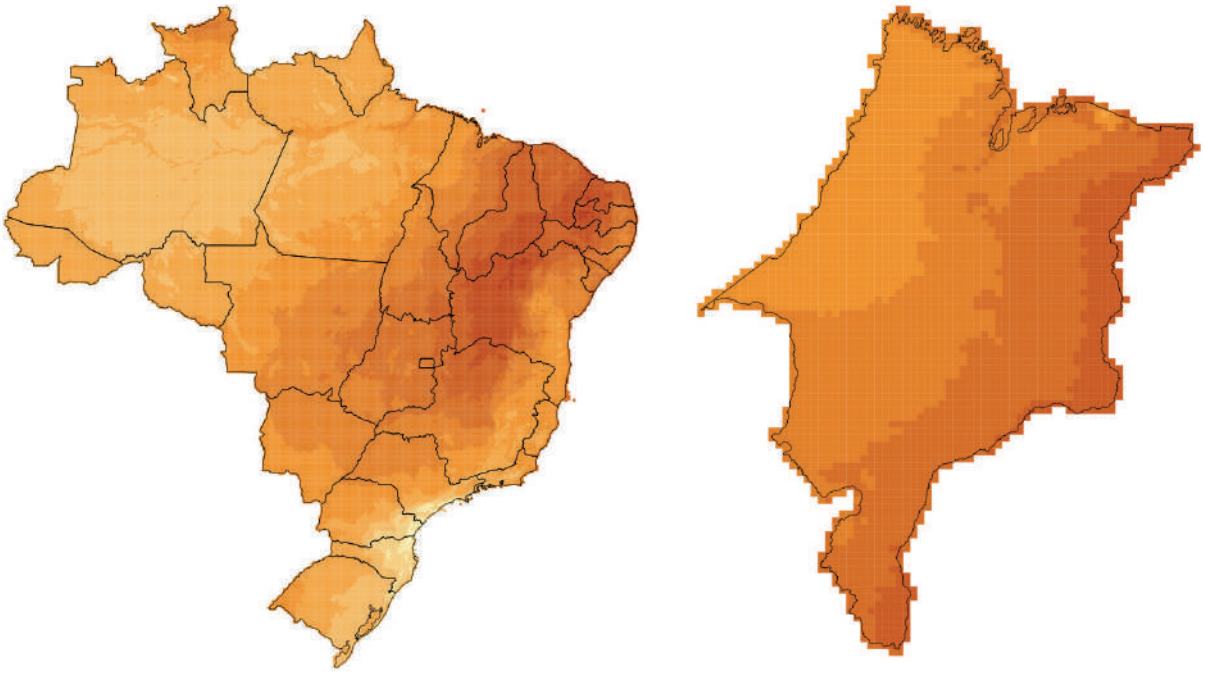
Nesse sentido, é importante destacar que esse critério de adequabilidade é fundamental, visto que as superfícies dos telhados voltados para o sul no hemisfério sul recebem menos radiação solar do que as outras superfícies voltadas para outras direções. Para excluir as áreas com orientação entre 112.5 e 202.5, que são as superfícies voltadas para o sul e sudeste, foi utilizada a ferramenta *Con (Spatial Analyst)* do *ArcToolBox*.

3.4 Validador do Modelo de Radiação Solar

Como parâmetro validador do modelo de potencial de radiação solar, o Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis (LABREN) possui 72.272 estações solarimétricas espalhadas pelo território nacional, com a capacidade de medir a radiação solar incidente global, difusa e direta normal. Dentre essas, cerca de 2.993 estações estão localizadas no estado do Maranhão, onde cada estação abrange uma dimensão de 0,1° x 0,1°, projetadas no DATUM de SIRGAS 2000. Os dados disponibilizados estão disponíveis em formatos tabular e vetorial (**Figura 12**).

Telhados planos ou com inclinação até 45° e áreas com mais de 100 kWh/m² de radiação solar foram consideradas ideais para instalação de painéis fotovoltaicos.

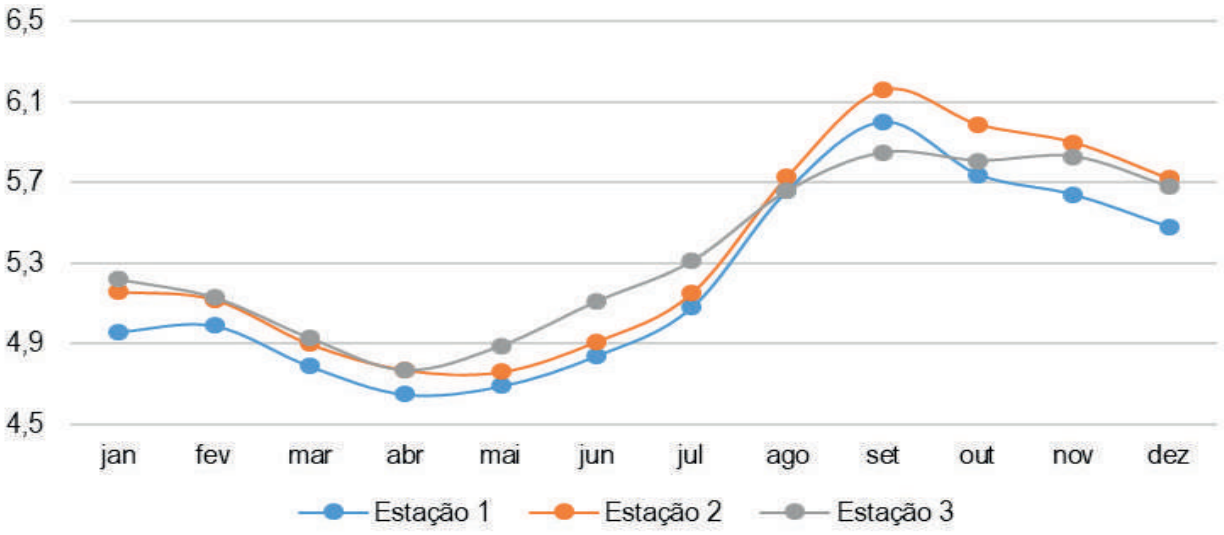
Figura 12 – Mapa anual de insolação diária no Brasil e Maranhão



Fonte: LABREN (Brasil, 2023).

Os dados disponíveis na plataforma do *SunData* incluem informações sobre radiações médias mensais e anuais para cada localidade dentro das áreas de abrangência das estações. O CAE, que é o alvo deste estudo, possui três estações próximas, que indica a irradiação solar diária média em kWh/m².dia (**Gráfico 12**).

Gráfico 12 – Irradiação solar diária média (Kwh/m². dia)



Fonte: (CRESESB, [2024]).

São Luís, devido à sua posição equatorial, recebe uma irradiação solar média anual que varia entre 4,65 e 6,16 kWh/m².dia. Essa faixa coloca a cidade entre as regiões mais promissoras do Brasil para o aproveitamento da energia solar. A irradiação elevada é particularmente vantajosa para a instalação de sistemas fotovoltaicos, pois possibilita uma produção contínua de eletricidade ao longo de todo o ano (**Tabela 3**).

Tabela 3 – Estações de Referencias de Irradiação solar diária média (Kwh/m². dia)

Latitude: 2,50026° S
Longitude: 44,276838° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m².dia]															
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
☑	Sao Luis	Sao Luis	MA	BRASIL	2,501° S	44,249° O	3,1	4,96	4,99	4,79	4,65	4,69	4,84	5,08	5,66	6,00	5,74	5,64	5,48	5,21	1,35
☑	Sao Luis	Sao Luis	MA	BRASIL	2,501° S	44,349° O	8,0	5,16	5,12	4,90	4,77	4,76	4,91	5,15	5,73	6,16	5,99	5,90	5,72	5,36	1,39
☑	Oceano Atlantico	Oceano Atlantico			2,401° S	44,249° O	11,5	5,22	5,13	4,93	4,77	4,89	5,11	5,31	5,66	5,85	5,81	5,83	5,68	5,35	1,08

Fonte: (CRESESB, [2024]).

Ao longo dos meses, a irradiação solar nas estações de São Luís apresenta variações bem definidas, uma vez que estão associadas às mudanças sazonais entre a estação chuvosa e a estação seca. Durante o período de janeiro a março, que corresponde à estação chuvosa, a maior cobertura de nuvens reduz a quantidade de radiação solar disponível, com valores mensais de irradiação variando entre 4,7 e 5,22 kWh/m².dia.

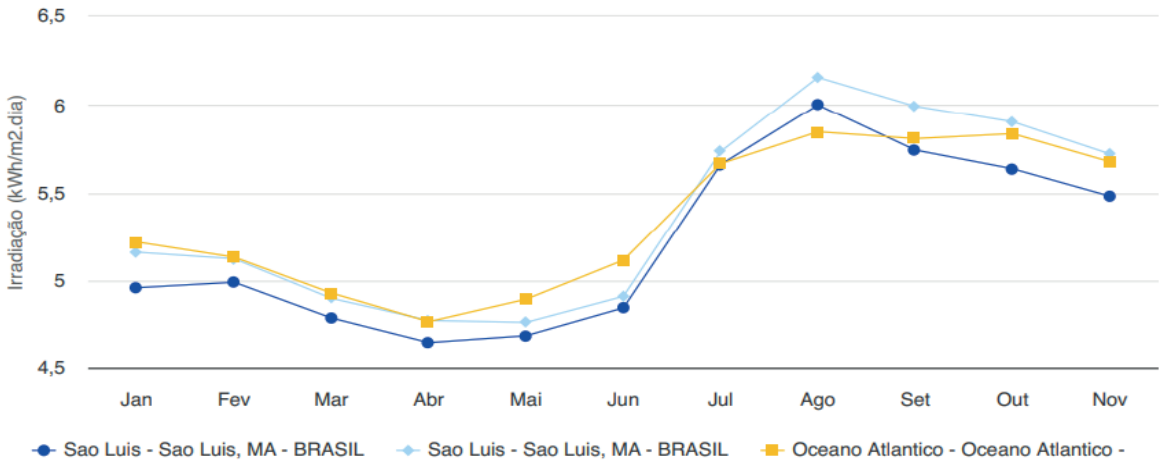
No período de transição, que varia de abril a junho, a irradiação solar ainda se mantém estável, com valores mensais variando de 4,65 a 5,11 kWh/m².dia. A cobertura de nuvens durante o período chuvoso dificulta a captação de energia solar, contribuindo para uma baixa eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

O período de julho a outubro, caracterizado pelo auge da estação seca, registra os maiores valores anuais de irradiação solar, com valores mensais variando entre 4,91 e 6,16 kWh/m².dia. O mês de setembro é o mês de maior insolação, e a ausência de nuvens durante esse período maximiza a eficiência dos sistemas solares, elevando a produção de energia ao seu nível mais alto.

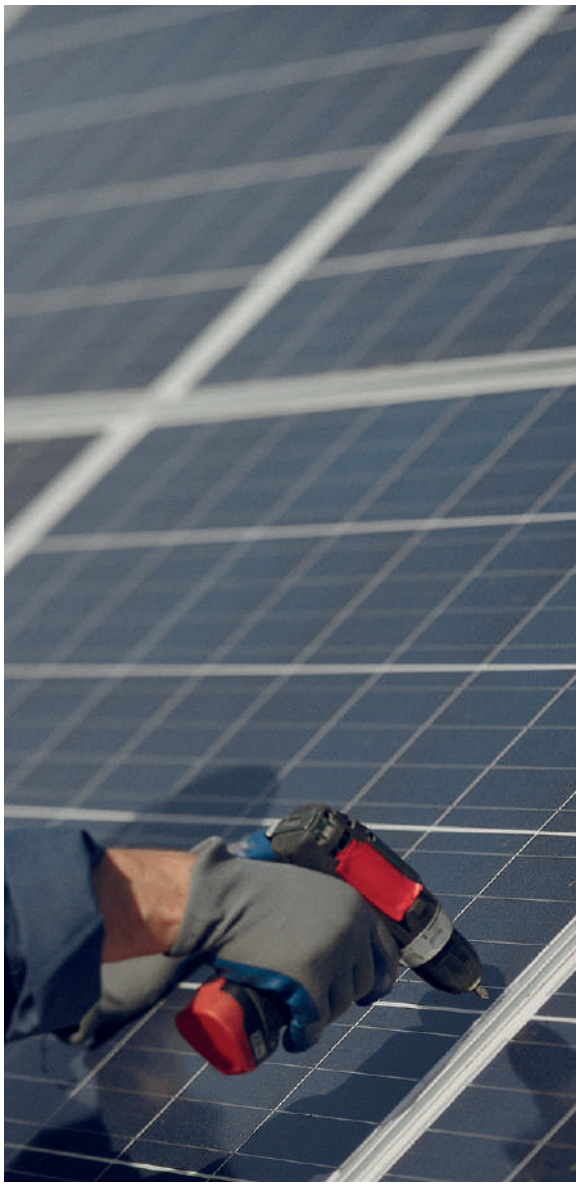
Nos meses de novembro e dezembro, a aproximação da estação chuvosa provoca uma leve queda na irradiação solar, com valores mensais que variam entre 5,48 e 5,99 kWh/m².dia. Embora a nebulosidade aumente, a quantidade de radiação solar disponível ainda se mantém suficientemente alta para garantir a viabilidade dos sistemas solares (**Gráfico 13**).

O modelo de radiação solar foi validado com dados do LABREN, que possui 2.993 estações no Maranhão. A irradiação média anual entre 4,65 e 6,16 kWh/m².dia comprovou o alto potencial solar do CAE, assegurando a precisão e confiabilidade para planejamento de sistemas fotovoltaicos.

Gráfico 13 – Irradiação Solar no Plano Horizontal para Localidades Próximas



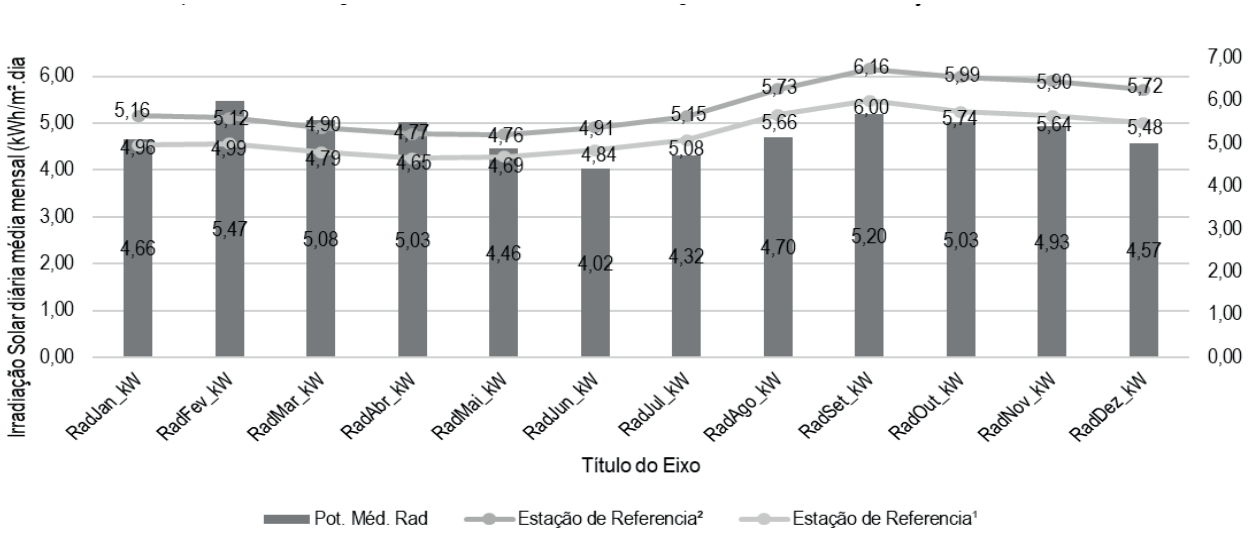
Fonte: (CRESESB, [2024]).



Em suma, a irradiação solar diária média em São Luís do Maranhão permanece elevada ao longo do ano, com picos durante a estação seca e uma redução moderada na estação chuvosa. As variações mensais de irradiação, que oscilam entre 4,65 e 6,16 kWh/m². dia, fazem de São Luís uma cidade altamente promissora para a implementação de sistemas de energia solar. A média anual elevada garante um retorno significativo sobre o investimento em tecnologias fotovoltaicas, proporcionando um fornecimento energético estável e sustentável.

Com base nas informações das estações de referência e fazendo uma comparação com os dados obtidos na modelagem de radiação solar da área de estudo, observamos que o potencial médio estimado de energia solar ficou bem próximo dos valores das estações de referência. Nota-se que os valores apresentados em barra acompanham a linha de radiação média mensal das estações de referência (**Gráfico 14**). Embora alguns valores estejam abaixo dos obtidos nas estações de referência, eles ainda assim representam um alto potencial de geração de energia por meio de painéis fotovoltaicos.

Gráfico 14 – Comparativo de Energia Solar Média Estimada e Energia Solar Média em Estações de Referências



Fonte: (CRESESB, [2024]).
Nota: Estação de Referencia¹ – Estação São Luís, latitude: 2,501°S; longitude: 44,249°O; distância 3,14 km.
Estação de Referencia² – Estação São Luís, latitude: 2,501°S; longitude: 44,349°O; distância 8,0 km.

O Apêndice A retrata os valores médios de irradiação solar diária (medida em kWh/m²/dia) para três estações ao longo dos meses do ano. Na estação de Referência 1, os valores de irradiação variam de 4,65 kWh/m²/dia (mínimo em abril) a 6 kWh/m²/dia (máximo em setembro). Observa-se uma tendência de aumento na irradiação a partir de junho, atingindo o pico em setembro, seguida de uma leve diminuição nos meses subsequentes.

Na de Referência 2, a amplitude é ligeiramente maior que a Estação 1, com irradiação variando de 4,76 kWh/m²/dia (mínimo em maio) a 6,16 kWh/m²/dia (máximo em setembro). Assim como na Estação 1, o período de maior irradiação ocorre nos meses de setembro e outubro. Já os valores estimados na modelagem de radiação solar para a área de estudo, os valores variam de 4,77 kWh/m²/dia (mínimo em abril) a 5,85 kWh/m²/dia (máximo em setembro). Os dados de irradiação solar diária apresentam um comportamento similar ao das estações anteriores, com um aumento nos meses de inverno e primavera.

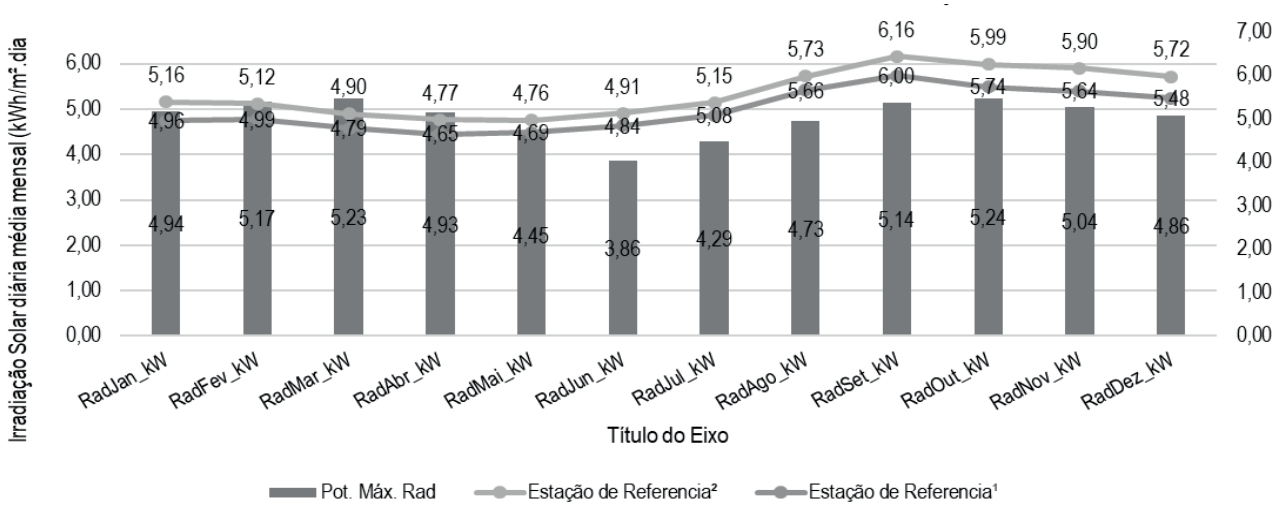
De forma geral, os valores médios apresentados ao final do Gráfico 14 indicam uma variação sazonal típica, com os menores valores médios observados em junho (4,1 kWh/m²/dia) e os maiores em setembro (5,2 kWh/m²/dia). Isso sugere que, nos meses de inverno, a irradiação solar é reduzida, enquanto no fim do inverno e início da primavera há um aumento considerável.

A distribuição dos dados também sugere um comportamento cíclico, típico de regiões com sazonalidade climática pronunciada, com maiores níveis de radiação solar nos meses de transição entre as estações frias e quentes.

O **Gráfico 15** apresenta os valores máximos de irradiação solar diária (em kWh/m²/dia) para três estações de medição ao longo de cada mês do ano. As estações demonstram variações significativas nos níveis de irradiação solar, com flutuações sazonais evidentes

que acompanham as alterações climáticas ao longo do ano. A Estação de Referência 1 apresenta um pico de irradiação em setembro, com um valor médio de 6 kWh/m²/dia, enquanto o menor valor é observado em abril (4,65 kWh/m²/dia). Essa estação segue uma tendência crescente de irradiação a partir de julho, atingindo o máximo no início da primavera. Já os valores médios da Estação de Referência 2 alcançam 6,16 kWh/m²/dia em setembro, com um mínimo de 4,76 kWh/m²/dia registrado em maio. A variação anual é similar à da Estação de Referência 1, com os meses de transição entre inverno e primavera apresentando os maiores níveis de irradiação.

Gráfico 15 – Comparativo de Energia Solar Máxima Estimada e Energia Solar Média em Estações de Referencias



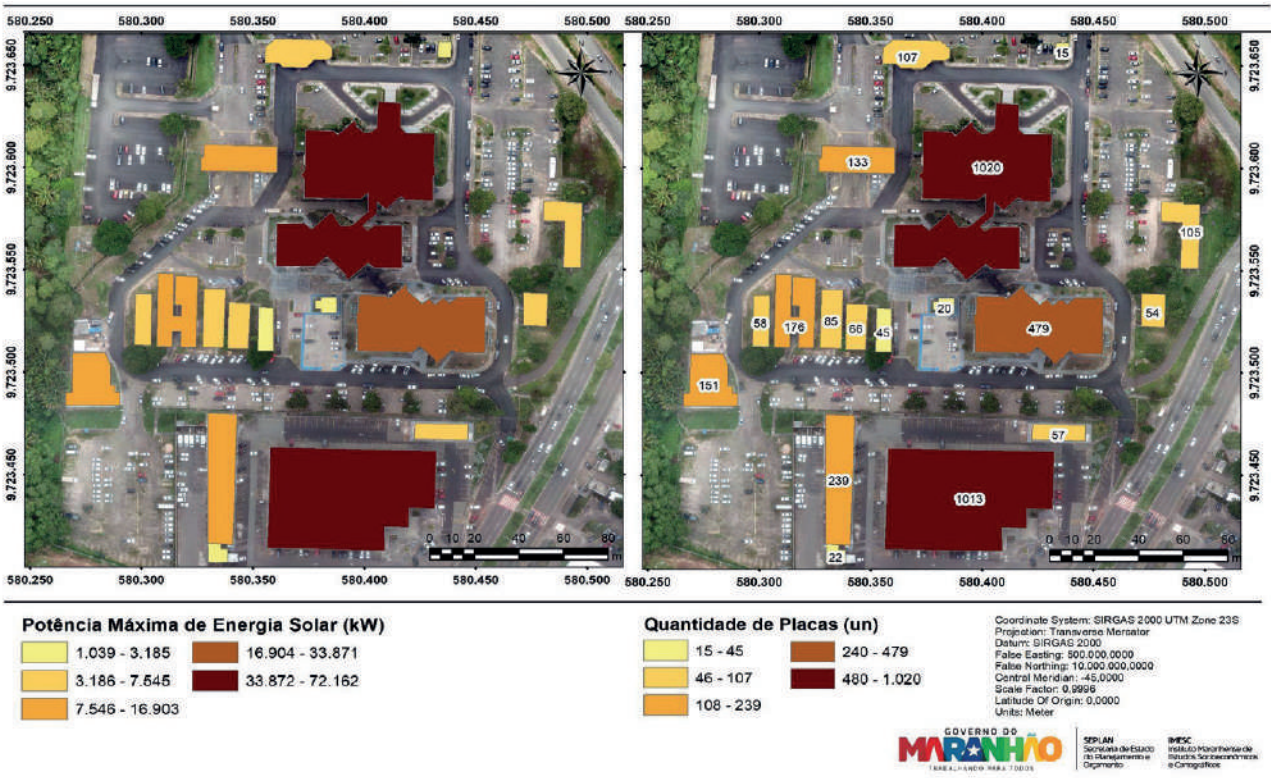
Fonte: (CRESESB, [2024]).
Nota: Estação de Referência¹ – Estação São Luís, latitude: 2,501°S; longitude: 44,249°O; distância 3,14 km.
Estação de Referência² – Estação São Luís, latitude: 2,501°S; longitude: 44,349°O; distância 8,0 km.

Em contrapartida, os valores resultantes da modelagem de radiação para o CAE, apresentam comportamento semelhante, com um máximo de 5,85 kWh/m²/dia, também em setembro, e um mínimo em abril, com 4,77 kWh/m²/dia. Nota-se que as duas estações têm seus valores mais baixos de irradiação concentrados no outono, especialmente em abril e maio. O **Gráfico 14** consolida os valores máximos de irradiação para cada mês entre as duas estações de referência. Ela indica que o mês com a maior irradiação é setembro (5,22 kWh/m²/dia), e o mês com a menor irradiação é junho (4,13 kWh/m²/dia). Esses dados evidenciam a presença de uma forte sazonalidade, com maiores índices de irradiação nos meses de transição de inverno para primavera, enquanto os meses de inverno apresentam valores mínimos. Portanto, a variação nos dados sugere a importância do período do ano na captação de energia solar, sendo essencial considerar essa flutuação ao planejar sistemas de energia solar baseados nessas estações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados provenientes da modelagem de radiação solar para o CAE revelam uma perspectiva promissora em termos de geração de energia sustentável. Com uma área total de 12.556 m² distribuída entre 18 edifícios, os potenciais de radiação variam entre 5,22 e 5,26 kW/h.m²/dia, o que equivale a uma potência máxima de 2.832 kW/h.m²/mês (Apêndice A). Visto o potencial de radiação solar, as edificações possuem a capacidade de produzir mensalmente pouco mais de 271 mil kWh (Apêndice B), com uma média anual de 251.438 kWh, que resulta em uma produção estimada em 3.017 MWh ao longo do ano. Para atingir esses números, seria necessário instalar um total de 3.845 placas, cada uma com capacidade de 550 kWh (conforme ilustrado na **Figura 13**).

Figura 13 – Potência máxima mensal de energia solar (kWh/mês) e quantidade de placas fotovoltaicas por edifício (unid.)



Fonte: Dados da Pesquisa (2023).

Ao comparar a produção estimada de energia solar com o consumo mensal do CAE, observa-se que o sistema de placas fotovoltaicas pode cobrir 79% do consumo elétrico mensal, restando apenas 21% do consumo a ser suprido por outras fontes.

Uma análise mais detalhada revela que os edifícios do CAE apresentam diferentes características em relação à exposição solar. Os prédios com maiores áreas de telhado, como o Palácio Henrique de La Roque, o Clodomir Millet, a Delegacia da Polícia Civil, a Secretaria de Estado da Fazenda e o Edifício Nagib Haickel, são considerados ideais para

a instalação de sistemas fotovoltaicos, cobrindo aproximadamente 71,7% do potencial de energia solar estimado. Os 28,3% restantes são atribuídos às edificações menores, como guaritas, almoxarifados e anexos do complexo administrativo (conforme detalhado na **Figura 14**).

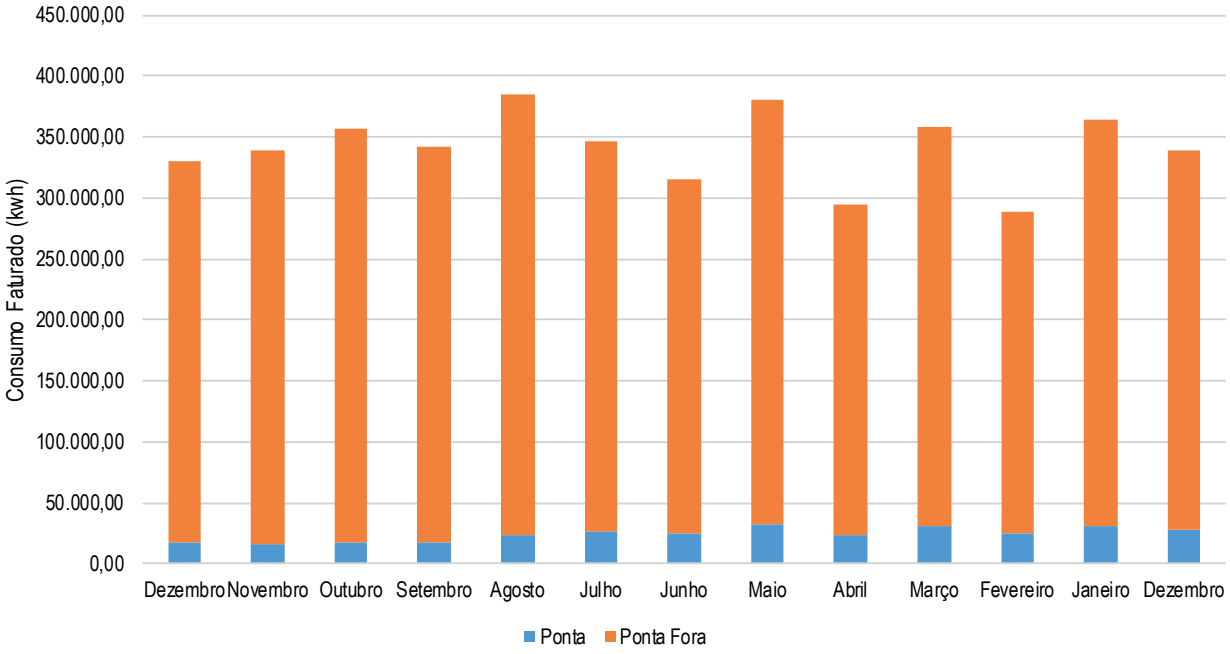
Figura 14 – Edificações do Centro Administrativo do Estado (CAE)

Fonte: Dados da Pesquisa (2024).

Para ilustrar os benefícios econômicos da autossuficiência energética, o CAE apresenta um consumo médio diário de 10.628,91 kWh e média mensal de 342.686,05 kWh, equipando o complexo com 3.845 placas fotovoltaicas, que é a capacidade total estimada neste estudo para o CAE (**Gráfico 16**). Ao considerar o consumo máximo mensal já registrado nos últimos meses, que foi de 384.774,60 kWh, o CAE ficaria responsável por cobrir 112.829,60 kWh da demanda no consumo.

- **O CAE pode gerar 271 mil kWh/mês, cobrindo 79% do consumo elétrico, com uma média anual de 3.017 MWh.**
- **Necessárias 3.845 placas, com capacidade individual de 550 kWh, cobrindo telhados maiores como o do Palácio Henrique de La Roque.**
- **Redução de R$ 276.579,83 para R$ 81.000 no custo mensal de energia com autossuficiência.**
- **Sistemas fotovoltaicos asseguram energia limpa e reduzem dependência de outras fontes.**

Gráfico 16 – Histórico do Consumo Faturado dos últimos meses[7]



Fonte: Dados da Pesquisa (2023).

Com uma tarifa unitária de consumo de R$0,71881 por kWh[8], sem o sistema de energia solar, o CAE pagaria um total mensal de R$276.579,83. Com a implantação do sistema fotovoltaico, o valor total mensal reduziria para R$81.103,04, uma economia de R$195.476,79, o que representa uma redação de cerca de 70,68%. Ao longo de 12 meses, essa economia acumulada ultrapassaria R$2,3 milhões e possibilitaria investimentos em outras áreas do Governo Estadual.[9]

A utilização de painéis solares em prédios públicos tem se tornado cada vez mais comum em diversas partes do mundo. Essa iniciativa contribui para a diminuição da pegada de carbono no setor público, o aumento da independência energética e a redução significativa das contas de energia, o que pode gerar economia para financiar outros serviços públicos.

O estado tem avançado consideravelmente nesse setor, especialmente, no que se refere ao desenvolvimento de políticas de regulamentação, flexibilização de processos, licenciamento e incentivos fiscais, além de firmar parcerias público-privadas para a implementação de projetos em edifícios públicos.

[7] O horário de ponta é quando a demanda de energia é maior, geralmente entre as 19h e as 22h, e a energia é mais cara. O horário fora de ponta é quando a demanda de energia é menor, geralmente entre as 23h e as 18h, e a energia é mais barata. Nos feriados nacionais e nos fins de semana, o valor é sempre fora ponta.

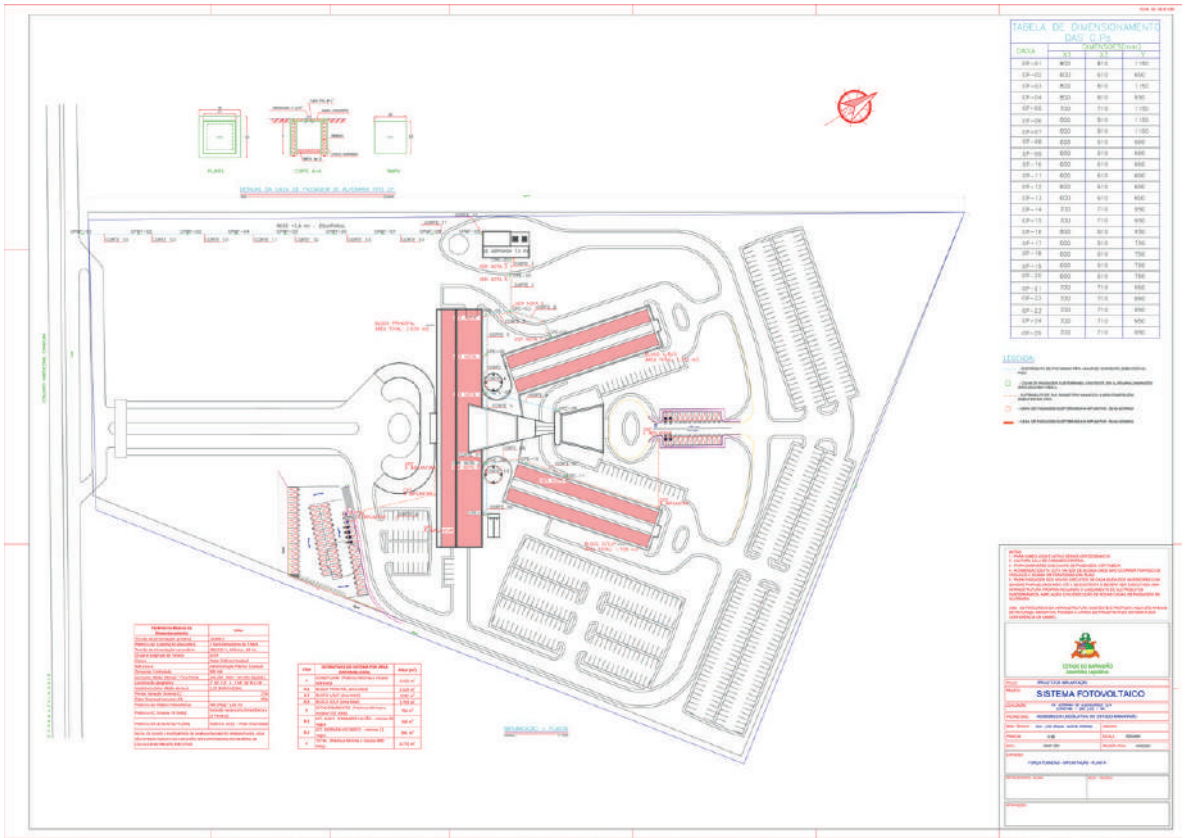
[8] Foi considerado o valor de uma tarifa unitária padrão de R$ 0,71881 para simplificar os cálculos, porém, os valores unitários (R$) com tributos seguem detalhados desta forma: consumo ponta (kWh): 2,534969; consumo fora ponta (kWh): 0,340652; demanda ativa (Kw) 29,047619; Demanda de ultrapassagem (Kw): 58,095263; consumo reativo excedente NP (kVAr): 0,270370; consumo reativo excedente FP (kVAr): 0,270379; demanda reativo (kVAr): 29,046032.

[9] Para estimar os valores estimados de economia foi considerada uma placa fotovoltaica de 550kWh para produção de energia solar, com produção diária de 2,358 kW/h.dia e mensal de 70,75 kW/h.mês.

Aliado a esses avanços, um dos destaques de 2023 para o Maranhão foi a instalação de uma Microrrede de Energia Elétrica Inteligente no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). A iniciativa foi desenvolvida por meio de parcerias público-privadas envolvendo a ANEEL, o Comando da Aeronáutica (COMAER), o grupo Equatorial Energia e a UFMA. Com a implementação da microrrede no CLA, espera-se uma redução de 40% no consumo de energia elétrica, uma vez que a unidade conta com 2.800 painéis solares de 445 watts pico (Wp), capazes de gerar 1.823 MWh/ano.

Além desse projeto, também temos o sistema fotovoltaico implantado na Assembleia Legislativa do Maranhão (ALEMA) e no Fórum Desembargador José Sarney. O sistema da ALEMA obteve uma redução de 42% no custo mensal de energia elétrica e conta com 1.204 painéis, com capacidade de gerar 800 quilowatts pico (kWp) (**Figura 15**). Já o sistema instalado no Fórum Desembargador José Sarney possui 1.270 painéis, com capacidade de 550 watts pico (Wp), podendo gerar 80.000 kWh por mês.

Figura 15 – Projeto de Implantação de painéis fotovoltaicos na ALEMA



Fonte: (ALEMA, 2021).

Portanto, observa-se que o estado tem buscado potencializar os estudos e a implementação de painéis fotovoltaicos em prédios públicos. De modo geral, os benefícios dessa ação vão além do social, ambiental e econômicos. Nesse contexto, o mapeamento de radiação solar no Centro Administrativo do Governo do Estado surge como forma de identificar e mensurar o potencial de radiação solar capaz de gerar energia elétrica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estado do Maranhão, assim como os demais estados do Nordeste, se destaca pela sua notável representatividade no que concerne ao potencial de geração de energia limpa. Essa distinção é atribuída à sua localização estratégica, próxima à Linha do Equador e à considerável incidência de luz solar e ventos ao longo do ano.

No âmbito deste estudo, que se concentra na adoção de energia solar nos prédios públicos do Centro Administrativo, foi possível observar uma crescente adoção dessa medida em diversas partes do mundo. Além de contribuir para a redução da pegada de carbono no setor público, a iniciativa visa aumentar a independência energética e reduzir significativamente os custos com energia, possibilitando a realocação desses recursos para outros serviços públicos.

O estado tem registrado avanços significativos nesse setor, especialmente no desenvolvimento de políticas de regulamentação, simplificação de processos de licenciamento e concessão de incentivos fiscais. Além disso, parcerias público-privadas têm sido estabelecidas para viabilizar a implementação de projetos em edifícios públicos, o que demonstra um compromisso com a transição para fontes de energia mais sustentáveis.

Ao analisar os resultados apresentados, observou-se que o potencial de radiação do CAE variou de forma pouco significativa, mantendo-se entre 5,22 e 5,26 kWh/m²/dia. Essa estabilidade reflete uma autonomia de 79% na produção de energia própria, o que indica valores economicamente viáveis para avaliação da rentabilidade financeira na produção de energia por meio de painéis fotovoltaicos, quando comparados ao potencial de radiação dos estados do sul e sudeste brasileiro.

É importante ressaltar que a metodologia adotada neste estudo possui grande relevância para ser aplicada em diversas outras áreas e instituições, tanto públicas quanto privadas. Com base no modelo e nos cálculos apresentados, o Maranhão pode avançar em estudos e tecnologias voltadas para energias renováveis, consolidando-se como um centro de referência tecnológica na produção de energia limpa e sustentável. Um aspecto a ser considerado é a eficiência, praticidade e viabilidade do uso de drones para o levantamento de dados necessários à execução do processamento. A alta resolução das imagens obtidas por drones permite quantificar a influência de pequenas estruturas nos telhados, como elevadores, antenas, espaços para ar-condicionado, muretas e árvores, que podem projetar sombras e reduzir a incidência de insolação sobre os painéis fotovoltaicos ao longo do dia. Além disso, a aplicação de drones viabiliza a extensão deste estudo a áreas maiores, incluindo pequenas cidades, onde é possível estimar o potencial de produção de energia para residências, estabelecimentos comerciais e outros fins.

A instalação de uma microrrede de energia solar no CLA é um exemplo prático dos esforços do Estado na promoção da energia limpa. Esses projetos têm potencial para reduzir significativamente o consumo de energia elétrica, como evidenciado pela implantação na Assembleia Legislativa do Maranhão e no Fórum Desembargador José Sarney.

Em suma, o estado do Maranhão tem buscado potencializar os estudos e a implementação de painéis fotovoltaicos em prédios públicos, alinhando-se às metas governamentais estabelecidas no Plano Plurianual e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Nesse contexto, este trabalho fornece um suporte tangível para o desenvolvimento de soluções energéticas no setor público, com potencial para expansão a outros edifícios públicos, comunidades rurais, escolas, hospitais macrorregionais, IEMAs e universidades. Essa abordagem visa consolidar o Maranhão como um centro de referência tecnológica na produção de energia limpa e sustentável e estabelecer um ambiente propício à inovação e ao crescimento sustentável. Esse modelo não apenas promoverá a produção de energia limpa, mas também incentivará o compartilhamento de conhecimento e a colaboração entre diferentes setores e comunidades.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Superintendência de Fiscalização de Serviços de Geração. **Quantidade de empreendimentos de geração de energia em operação**. Brasília, DF, 2024a. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/empreendimentos-em-operacao. Acesso em: 14 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Superintendência de Fiscalização de Serviços de Geração. **Relação de empreendimentos de Mini e Micro Geração Distribuída.** Brasília, DF, 2024b. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/empreendimentos-em-operacao. Acesso em: 14 ago. 2024.

AMARANTE, R. T. et al. Proposta de mapeamento do potencial de radiação solar em edificações com o uso de drone. **Brazilian Journal of Development**, [*s. l.*], v. 5, n. 11, p. 24537-24550, 2019. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/4529. Acesso em: 14 ago. 2023.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO MARANHÃO. **Pregão Eletrônico n.º 031, de 16 de novembro de 2021.** Fornecimento e instalação de sistema fotovoltaico conectado à rede (sfcr), no edifício sede da Assembleia Legislativa do Maranhão, com potência mínima total de 800 kwp (oitocentos mil watt-pico) e serviço continuado de aferição de performance com manutenção da usina pelo período de 24 (vinte e quatro) meses. São Luís, 2021. Disponível em: https://www.al.ma.leg.br/licitacoes/index.php?action=consultar. Acesso em: 14 set. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Divisão de Impactos, Adaptação e Vulnerabilidades. **LABREN - Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia.** São José dos Campos, 2023. Disponível em: https://labren.ccst.inpe.br/index.html. Acesso em: 14 ago. 2023.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Potencial Solar - SunData v 3.0.** Rio de Janeiro, [2024]. Disponível em: https://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata. Acesso em: 14 ago. 2024.

CLIMA e condições meteorológicas médias em São Luís no ano todo. **Weather Spark**, Excelsior, [2024]. Disponível em: https://pt.weatherspark.com/y/30549/Clima-caracter%C3%ADstico-em-S%C3%A3o-Lu%C3%ADs-Maranh%C3%A3o-Brasil-durante-o-ano. Acesso em: 13 ago. 2024.

ESRI. **ArcGIS Pro Tool Reference**. [*S. l.*], 2020. Disponível em: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/modeling-solarradiation.htm. Acesso em: 10 ago. 2023.

FRANCO, G. G.; PINHEIRO, R. L. Estudo comparativo das estimativas de energia fotovoltaica gerada sobre superfícies tridimensionais em ambiente SIG e das informadas pela plataforma Sundata. **Brazilian Journal of Development**, [*s. l.*], v. 6, n. 12, p. 93829–93844, 2020. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/20830. Acesso em: 14 ago. 2023.

FU, P.; RICH, P. M. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. In: ANNUAL ESRI INTERNATIONAL USER CONFERENCE, 19., San Diego. **Proceedings** [...]. USA: San Diego, 1999. Vol. 1, p. 1-31. Disponível em: https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/abstracts/a867.htm. Acesso em: 14 ago. 2024.

GOBBO, E. R; SILVA, M. A. T. F da; BONE, R. B. Do Petróleo à energia fotovoltaica: a inserção do brasil neste novo mercado. **Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, São Paulo, 2018. Disponível em: https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/501/501. Acesso em: 14 ago. 2023.

SOLARPOWER EUROPE. **Global Market Outlook for Solar Power 2023-2027**. Brussels, 2023. Disponível em: https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2023-2027/detail#gw-scale-markets-references. Acesso em: 14 ago. 2024.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO. Núcleo Geoambiental. **Insolação Total**. São Luís, 2012. Disponível em: https://www.nugeo.uema.br/?page_id=155. Acesso em: 14 set. 2024.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Potencial de radiação mensal em kWh/m²/mês

Edifício	Id	Rad. jan._kW	Rad. fev._kW	Rad. mar._ kW	Rad. abr._kW	Rad.maio _kW	Rad. jun._kW	Rad. jul._kW	Rad. ago._kW	Rad.set ._kW	Rad. out._kW	Rad. nov._kW	Rad. dez._kW
Guarita entrada	1	140,6	150,5	156,7	152,3	141,2	123,8	137,2	147,9	156,1	154,0	144,5	137,4
	2	144,3	153,1	157,6	151,4	139,1	121,5	134,8	146,4	156,3	156,0	147,8	141,3
Guarita entrada II	3	141,3	150,9	156,7	152,0	140,7	123,2	136,5	147,5	156,0	154,3	145,1	138,1
	4	142,0	151,5	157,3	152,4	141,0	123,5	136,8	147,8	156,5	154,9	145,8	138,8
	5	142,3	151,8	157,4	152,4	140,8	123,3	136,7	147,8	156,6	155,1	146,0	139,1
	6	143,9	152,9	157,6	151,7	139,6	121,9	135,2	146,8	156,4	155,9	147,5	140,9
Palácio Henrique de La Roque/ Clodomir Millet	7	144,8	153,4	157,7	151,2	138,8	121,1	134,4	146,2	156,3	156,2	148,2	141,8
Delegacia DEFAZ	8	144,0	152,8	157,3	151,1	138,8	121,2	134,5	146,1	156,0	155,7	147,5	141,0
Secretaria de Estado da Fazenda	9	142,0	151,6	157,4	152,5	141,0	123,5	136,9	147,9	156,6	155,0	145,8	138,9
	10	146,1	154,0	157,2	149,6	136,4	118,6	131,8	144,2	155,3	156,4	149,3	143,3
Edifício Nagib Haickel	11	148,2	155,2	156,9	147,8	133,6	115,8	128,8	141,9	154,3	157,1	151,2	145,7
	12	145,4	153,8	157,7	150,9	138,1	120,4	133,7	145,7	156,1	156,5	148,8	142,5
	13	147,3	154,9	157,6	149,5	135,9	118,1	131,3	143,9	155,4	157,1	150,4	144,5
	14	144,9	153,4	157,4	150,7	138,1	120,4	133,7	145,6	155,9	156,1	148,3	142,0
	15	144,9	153,4	157,4	150,7	138,1	120,4	133,7	145,6	155,9	156,1	148,3	142,0
	16	146,3	154,3	157,4	149,8	136,6	118,9	132,0	144,4	155,5	156,6	149,6	143,5
	17	146,3	154,3	157,4	149,8	136,6	118,9	132,0	144,4	155,5	156,6	149,6	143,5
	18	147,3	154,9	157,5	149,2	135,6	117,8	130,9	143,6	155,3	157,1	150,5	144,6
Total de Radiação (kW)		**2.602**	**2.757**	**2.832**	**2.715**	**2.490**	**2.172**	**2.411**	**2.624**	**2.806**	**2.807**	**2.664**	**2.549**

Fonte: Dados da Pesquisa (2023).
Legendas: Id – Identificação dos edifícios (ver **Figura 14**);
Rad.jan._kW – radiação mensal de janeiro.

APÊNDICE B – Produção de energia solar por edificação (CAE)

Edifício	Id	P_Ener_ jan.	P_Ener_ fev.	P_Ener_ mar.	P_Ener_ abr.	P_Ener_ maio	P_Ener_ jun.	P_Ener_ jul.	P_Ener_ ago.	P_Ener_ set.	P_Ener_ out.	P_Ener_ nov.	P_Ener_ dez.
Guarita entrada I	1	6.773	7.246	7.545	7.334	6.802	5.964	6.607	7.124	7.520	7.418	6.958	6.617
	2	9.787	10.384	10.691	10.271	9.437	8.239	9.141	9.934	10.603	10.582	10.026	9.584
Guarita entrada II	3	8.476	9.052	9.402	9.117	8.439	7.393	8.192	8.848	9.361	9.257	8.703	8.286
	4	938	1.001	1.039	1.006	931	815	904	976	1.034	1.023	963	917
	5	6.735	7.184	7.450	7.212	6.667	5.837	6.469	6.995	7.412	7.342	6.912	6.586
	6	3.465	3.681	3.795	3.653	3.361	2.936	3.257	3.535	3.767	3.753	3.551	3.392
Palácio Henrique de La Roque/ Clodomir Millet	7	66.248	70.207	72.162	69.213	63.504	55.419	61.495	66.899	71.517	71.500	67.839	64.894
Delegacia DEFAZ	8	15.474	16.419	16.903	16.239	14.919	13.025	14.452	15.706	16.764	16.732	15.852	15.153
	9	1.427	1.523	1.581	1.531	1.417	1.241	1.375	1.486	1.573	1.557	1.465	1.395
Secretaria de Estado da Fazenda	10	66.617	70.238	71.672	68.216	62.190	54.102	60.114	65.742	70.802	71.329	68.096	65.343
	11	3.794	3.973	4.016	3.783	3.420	2.964	3.297	3.632	3.950	4.020	3.869	3.728
Edifício Nagib Haickel	12	31.225	33.034	33.871	32.404	29.669	25.867	28.714	31.291	33.533	33.610	31.956	30.601
	13	1.337	1.407	1.431	1.358	1.234	1.073	1.192	1.307	1.412	1.427	1.366	1.313
	14	3.768	3.989	4.094	3.920	3.591	3.132	3.476	3.786	4.054	4.060	3.857	3.693
Anexos	15	11.445	12.115	12.432	11.904	10.907	9.511	10.557	11.498	12.312	12.331	11.715	11.214
	16	5.597	5.901	6.021	5.731	5.225	4.547	5.051	5.524	5.948	5.992	5.721	5.490
	17	4.328	4.564	4.657	4.432	4.041	3.516	3.906	4.272	4.600	4.634	4.425	4.246
	18	2.980	3.133	3.185	3.018	2.742	2.382	2.648	2.904	3.140	3.177	3.044	2.926
Total de produção de energia solar (kW)		**250.414**	**265.050**	**271.945**	**260.343**	**238.495**	**207.963**	**230.846**	**251.459**	**269.304**	**269.744**	**256.318**	**245.377**

Fonte: Dados da Pesquisa (2023).
Legenda: Id – Identificação dos edifícios (ver **Figura 14**);
P_Ener_jan. – Produção de energia em janeiro.

APÊNDICE C – Cálculo de Radiação Solar e geração de energia elétrica

Com base nos estudos de Rich (1990), Rich *et al.* (1994), Fu e Rich (2000, 2002), os modelos de radiação solar calculam a radiação incidente com base no método de algoritmo de visão hemisférica. Com isso o modelo de potencial de radiação solar deste estudo foi elaborado por meio da ferramenta *Solar Analyst do ArcGis,* na qual o arquivo matricial do modelo digital de superfície (MDS) é inserido como dado de entrada. O MDS, por sua vez, apresenta valores de altimetria da superfície, inclinação e orientação. Como resultado da modelagem, é gerado o mapa de radiação solar, que utiliza uma equação de radiação global, direta e difusa para cada área topográfica.

O cálculo de radiação global (Global $_{tot}$) consiste na soma da radiação direta (Dir $_{tot}$) e difusa (Dif $_{tot}$) conforme os setores do mapa solar e do mapa celeste, respectivamente.

$$\text{Global}_{tot} = \text{Dir}_{tot} + \text{Dif}_{tot} \quad (1)$$

A radiação direta (Dir $_{tot}$) é dada pela soma de insolação direta (Dir $_{\theta,\alpha}$) de todos os setores do mapa solar, que é dada pela seguinte equação:

$$\text{Dir}_{tot} = \Sigma\, \text{Dir}_{\theta'\alpha} \quad (2)$$

Em relação à insolação direta do setor no mapa solar (Dir $_{\theta,\alpha}$) dada na equação anterior, esta é estabelecida pelo centroide do ângulo zenital (θ) e do ângulo azimutal (α), de modo que a insolação direta do setor no mapa solar é dada pela seguinte equação:

$$\text{Dir}_{\theta,\alpha} = S_{Const} * \beta^{m(\theta)} * \text{SunDur}_{\theta,\alpha} * \text{SunGap}_{\theta,\alpha} * \cos(\text{AngIn}_{\theta,\alpha}) \quad (3)$$

Na qual,

S_{Const} - *O fluxo solar fora da atmosfera na distância média Terra-Sol, conhecida como constante solar. A constante solar utilizada na análise é de 1.367 W/m². Isso é consistente com a constante solar do World Radiation Center (WRC).*

β- *A transmissividade da atmosfera (média de todos os comprimentos de onda) para o caminho mais curto (na direção do zênite).*

m(θ) - *O comprimento do caminho óptico relativo, medido como uma proporção em relação ao comprimento do caminho zenital (equação logo a seguir).*

$\text{SunDur}_{\theta,\alpha}$ - *A duração do tempo representada pelo setor do céu. Para a maioria dos setores, é igual ao intervalo do dia (por exemplo, um mês) multiplicado pelo intervalo da hora (por exemplo, meia hora). Para setores parciais (perto do horizonte), a duração é calculada usando geometria esférica.*

$\text{SunGap}_{\theta,\alpha}$ - *A fração de gap para o setor do mapa solar.*

$\text{AngIn}_{\theta,\alpha}$ - *O ângulo de incidência entre o centróide do setor do céu e o eixo normal à superfície (ver equação abaixo).*

O comprimento óptico relativo, m(θ), é determinado pelo ângulo zênite solar e elevação acima do nível do mar. Para ângulos zenitais menores que 80°, é calculado por

meio da seguinte equação:

$$m(\theta) = EXP(-0.000118 * Elev - 1.638*10^{-9} * Elev^2) / \cos(\theta) \quad (4)$$

Na qual,

θ — *O ângulo zênite solar.*

Elev — A elevação acima do nível do mar em metros.

Outro fator a ser considerado é a orientação da superfície, que é multiplicado pelo cosseno do ângulo de incidência. O ângulo de incidência (AngInSky θ,α) a superfície de interceptação e o setor do céu é representado em um centroide no ângulo zenital e no ângulo azimutal, estes são calculados usando a seguinte equação:

$$AngIn_{\theta,\alpha} = acos(Cos(\theta) * Cos(G_z) + Sin(\theta) * Sin(Gz) * Cos(\alpha-G_a)) \quad (5)$$

Na qual,

G_z — *O ângulo zenital da superfície.*

Observe que para ângulos de zênite maiores que 80°, a refração é importante.

G_a — *O ângulo de azimute da superfície.*

A Radiação difusa é calculada para cada setor do céu com base no centroide, a radiação difusa consiste na integração do intervalo de tempo corrigida pela fração da lacuna e ângulo de incidência, como mostra a equação a seguir.

$$Dif_{\theta,\alpha} = R_{glb} * P_{dif} * Dur * SkyGap_{\theta,\alpha} * Weight_{\theta,\alpha} * \cos(AngIn_{\theta,\alpha}) \quad (6)$$

Na qual,

R_{glb} – *A radiação normal global.*

P_{dif} – *A proporção do fluxo de radiação normal global é difusa. Normalmente é aproximadamente 0,2 para condições de céu muito claro e 0,7 para condições de céu muito nublado.*

Dur – *O intervalo de tempo para análise.*

$SkyGap_{\theta,\alpha}$ – *A fração de lacuna (proporção do céu visível) para o setor do céu.*

Weightθ,α – A proporção de radiação difusa originada em um determinado setor do céu em relação a todos os setores.

$AngIn_{\theta,\alpha}$ – *O ângulo de incidência entre o centróide do setor do céu e a superfície de interceptação.*

A radiação normal global (R glb) pode ser calculada somando a radiação direta de todos os setores (incluindo os setores obstruídos) sem correção para o ângulo de incidência e, em seguida, corrigindo a proporção da radiação direta, que é igual a 1- P_{dif}:

$$R_{glb} = (S_{Const} \Sigma(\beta^{m(\theta)})) / (1 - P_{dif}) \quad (7)$$

Em relação ao modelo difuso de céu uniforme, o peso $_{\theta,\alpha}$ é calculado da seguinte forma:

$$Weight_{\theta,\alpha} = (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) / Div_{azi} \quad (8)$$

Onde,

θ_1 e θ_2 — Os ângulos zenitais delimitadores do setor do céu.

Div_{azi} — O número de divisões azimutais no mapa celeste.

Para o modelo padrão de céu nublado, o Peso θ,α é calculado da seguinte forma:

$$Weight_{\theta,\alpha} = (2\cos\theta_2 + \cos 2\theta_2 - 2\cos\theta_1 - \cos 2\theta_1) / 4 * Div_{azi} \quad (9)$$

A radiação solar difusa total para o local (Dif tot) é calculada como a soma da radiação solar difusa (Dif) de todos os setores do mapa celeste:

$$Dif_{tot} = \Sigma\, Dif_{\theta,\alpha} \quad (10)$$

Os dados de potencial de radiação solar obtidos estão expressos em Watt Hora (wtt/h). Dessa forma, faz-se necessário realizar a conversão dos dados para Quilowatt-hora (kWh) e, em seguida, para megawatt-hora (MWh). Para a conversão, os valores foram divididos por 1.000.

Para a conversão de radiação solar em energia elétrica, foi utilizada uma estimativa conservadora, a qual pode variar conforme a quantidade de energia que os painéis podem gerar, bem como e a eficiência e o desempenho de funcionamento e instalação. Nesse sentido, foi adotado um valor base de 16% de eficiência no processo de conversão de radiação solar em eletricidade e 86% na taxa de desempenho de eletricidade preservada à medida que percorre a instalação.

Para determinar o potencial de geração de energia elétrica, será necessário multiplicar os valores de potencial de radiação MWh pelos valores da taxa de eficiência (0,16) e a taxa de desempenho (0,86). A equação correspondente é:

$$MWh * 0{,}16 * 0{,}86 \quad (11)$$

Considerando a extensão territorial do estado do Maranhão e as diferentes regiões climáticas existentes, é comum que alguns locais tenham grande incidência de radiação solar e variações de temperatura. Esses fatores influenciam na geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos. Para estimar e exemplificar a quantidade de painéis solares necessários para gerar energia elétrica em uma determinada área, iremos tomar como exemplo um módulo solar fotovoltaico capaz de gerar 550 W de potência.

Vamos considerar uma área localizada no hemisfério sul, com orientação para o Norte, inclinação de 20° e perdas no sistema fotovoltaico em 20% (aquecimento e sujeiras) e instalação do módulo de forma eficiente. Para os dados solarimétricos, será tomado como base os dados apresentados no Centro de Referência de Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB) para a capital São Luís do Maranhão.

Com base nos dados obtidos, é necessário estimar a quantidade de horas diárias de irradiação solar útil à geração de energia fotovoltaica. Para a capital São Luís, o valor de referência é em média 5,36 de horas diárias de irradiação útil à geração de energia fotovoltaica. Dessa forma, considerando as informações, temos a seguinte equação:

Energia = Potência * HSP * (rendimento)

Na qual,

Potência – é a Capacidade de geração de energia de uma placa fotovoltaica;

HSP – Hora do Sol Pico ou Pleno

Rendimento – Eficiência para geração de energia

Energia = 550 * 5,36 * (1-0,2) = 2,358 kW/h.dia (12)

Ao longo de um mês, o módulo será capaz de gerar:

Energia = 2,358 * 30 = 70,75 kWh/mês (13)

Logo, se em uma residência o consumo médio é de 1.000 kWh/mês, é necessário realizar uma *Regra de Três* para estimar a quantidade de painéis fotovoltaicos serão necessários para suprir a demanda de energia elétrica:

- 1 Módulo ⇒ 70,75 kW/h
- X Módulos ⇒ 1.000 kW/h

1 / X = 70,75 / 1000

70,75 * X = 1000 * 1

X=1000 / 70,75 = 14,13 Módulos (15 Módulos - Placas fotovoltaicas) (14)

Cabe destacar que, os valores adotados para estimar a quantidade de placas fotovoltaicas têm caráter exemplificativo com base nos critérios previamente descritos, podendo sofrer alterações devido a diversos fatores, tais como: potência das placas fotovoltaicas, eficiência de instalação, orientação e inclinação de telhado, irradiação local, duração de irradiação útil para geração de energia solar, período do ano, etc.

REFERÊNCIAS

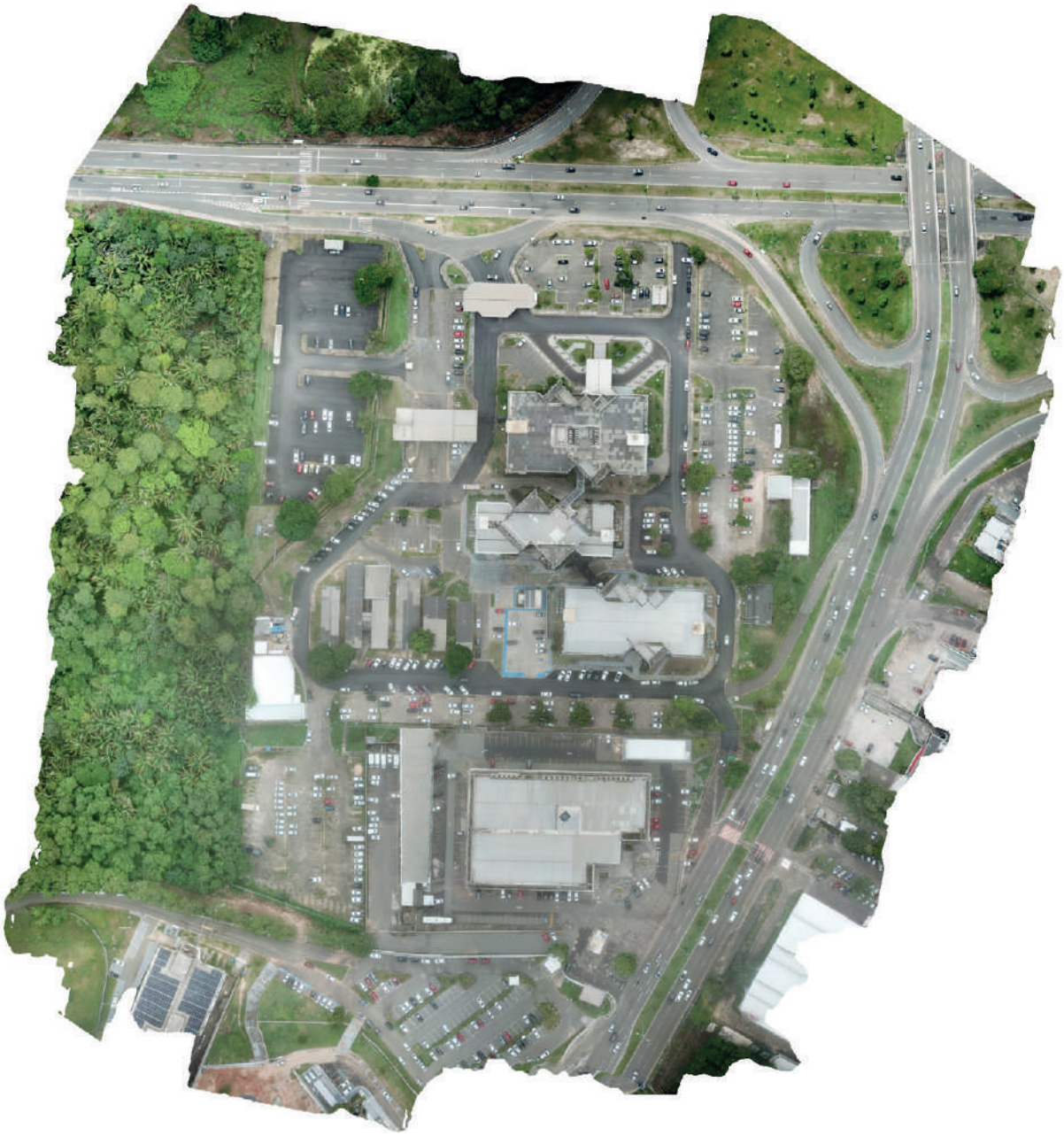
FU, P.; RICH, P. M. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s, l.], v. 37, n. 1-3, p. 25-35, dec. 2002. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/20830. Acesso em: 14 ago. 2023.

FU, P.; RICH, P. M. **The Solar Analyst 1.0 - User Manual**. USA: Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), 2000.

RICH, P. M. Characterizing plant canopies with hemispherical photography. **Remote Sensing Reviews**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 13-29, 1990. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02757259009532119. Acesso em: 14 ago. 2023.

RICH, P. M. et al. Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology. **American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers**, Reno, p. 524–529, 1994. Disponível em: https://professorpaul.com/publications/rich_et_al_1994_asprs.pdf. Acesso em: 14 ago. 2023.

APÊNDICE D – Vôo Sede - Processing Report 15 june 2023



Survey Data

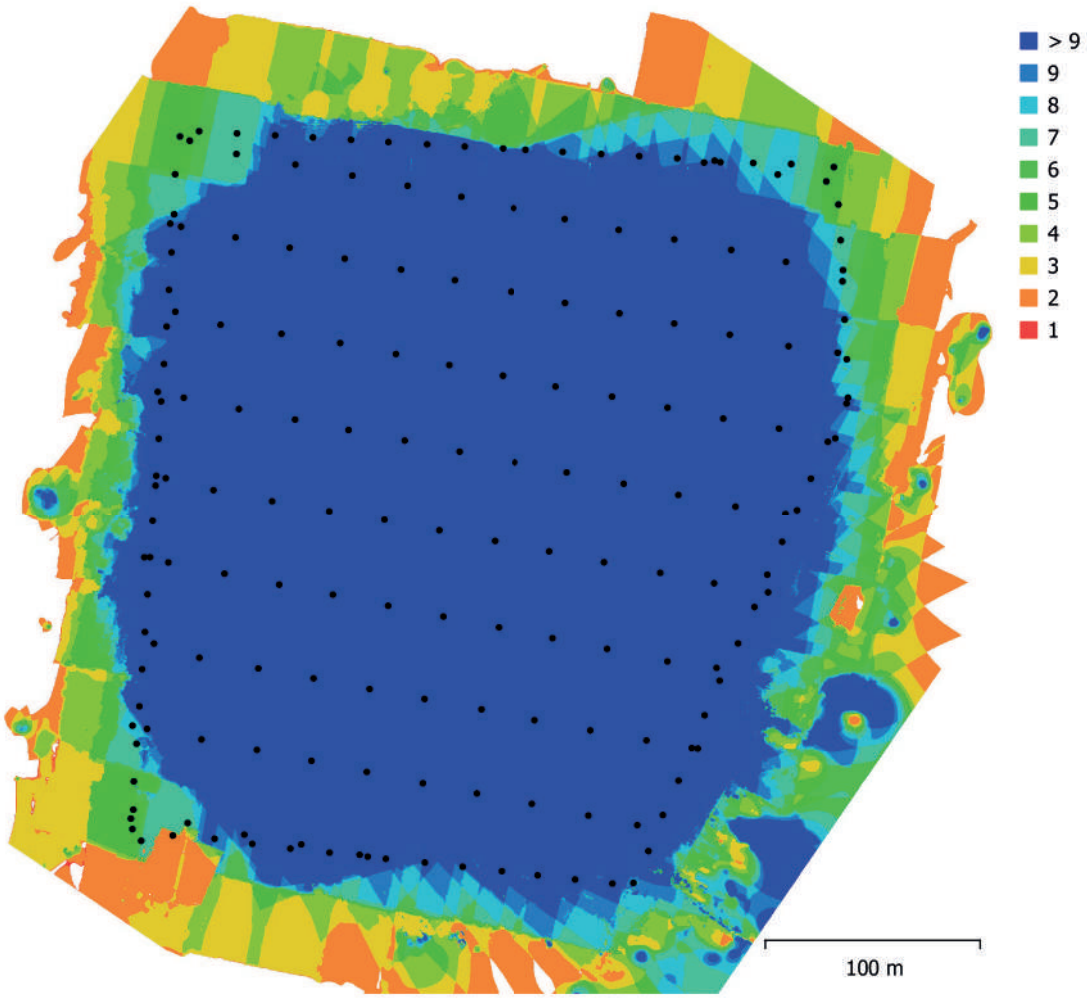


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	183	Camera stations:	182
Flying altitude:	120 m	Tie points:	150,029
Ground resolution:	3.8 cm/pix	Projections:	645,052
Coverage area:	0.169 km^2	Reprojection error:	1.36 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC220 (4.73mm)	4000 x 3000	4.73 mm	1.57 x 1.57 um	Não

Table 1. Cameras.

Calibração da Câmara

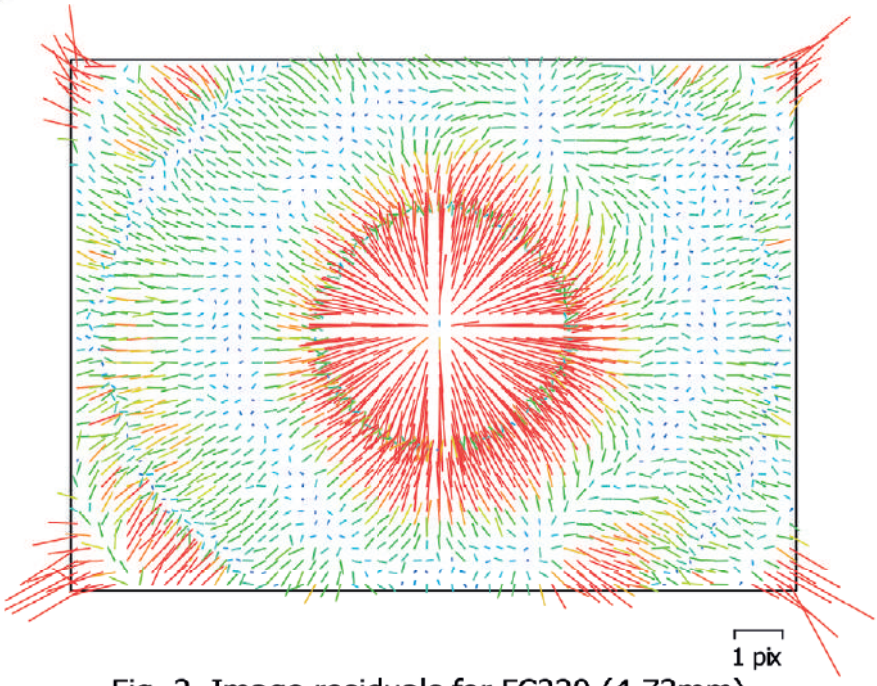


Fig. 2. Image residuals for FC220 (4.73mm).

FC220 (4.73mm)
183 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	**4000 x 3000**	**4.73 mm**	**1.57 x 1.57 um**

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	**3038.77**	0.11	1.00	0.08	-0.43	-0.10	0.11	-0.07	0.01	-0.17
Cx	**41.0517**	0.07		1.00	-0.04	0.01	-0.01	0.01	0.81	-0.02
Cy	**13.7101**	0.067			1.00	-0.06	0.03	-0.03	-0.02	0.66
K1	**0.045116**	0.00011				1.00	-0.97	0.92	0.01	-0.06
K2	**-0.100285**	0.00041					1.00	-0.98	-0.01	0.02
K3	**0.0967738**	0.00045						1.00	0.01	-0.01
P1	**-8.88282e-05**	7.5e-06							1.00	-0.03
P2	**-0.000294566**	6.3e-06								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

Fig. 3. Camera locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
0.429521	0.360212	0.890146	0.560571	1.05195

Table 3. Average camera location error.
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

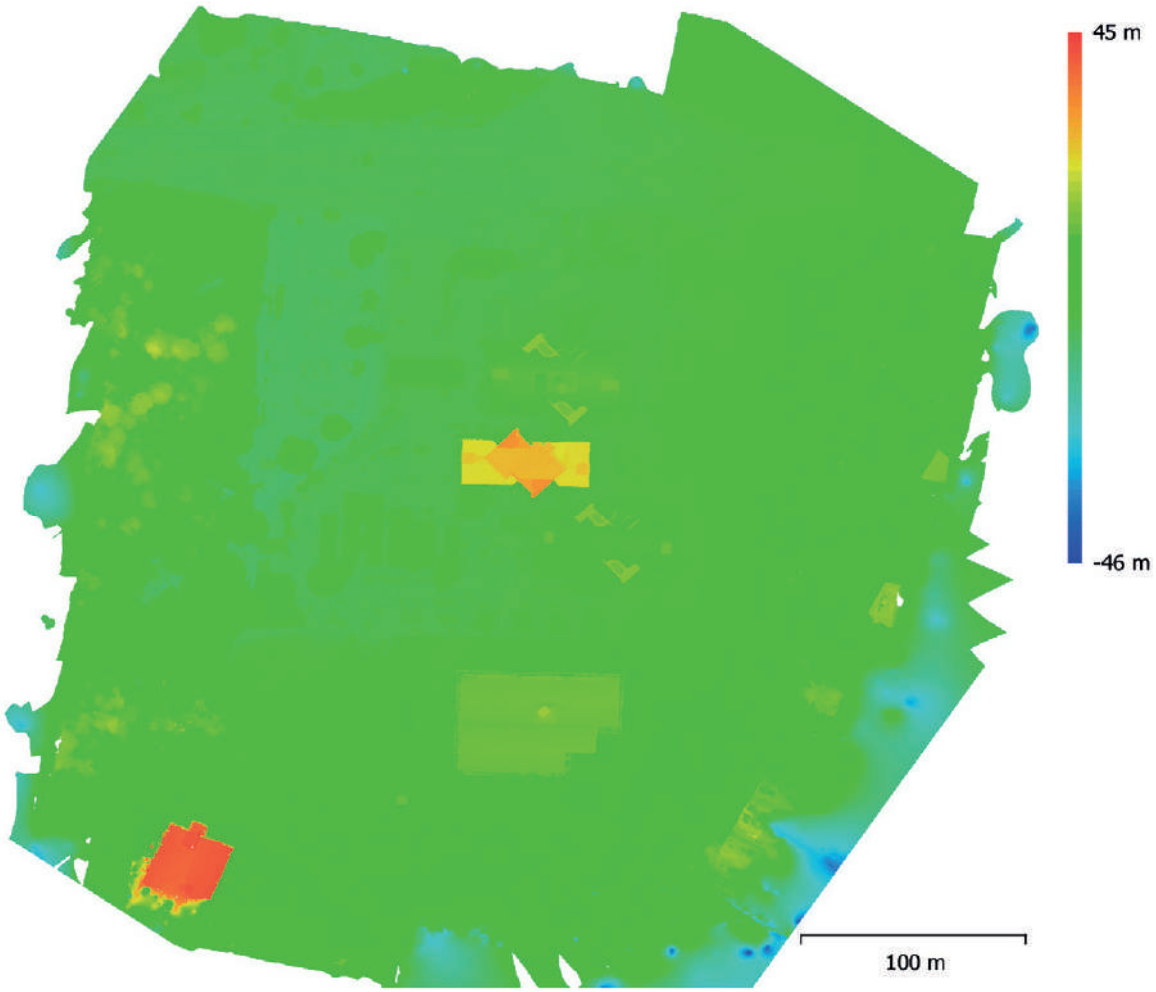


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution:	7.59 cm/pix
Point density:	174 points/m^2

Processing Parameters

Geral	
Câmaras	183
Aligned cameras	182
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Nuvem de Pontos	
Pontos	150,029 of 165,955
RMS reprojection error	0.395384 (1.3647 pix)
Max reprojection error	1.1981 (50.3586 pix)
Mean key point size	3.63814 pix
Cores dos pontos	3 bands, uint8
Key points	Não
Average tie point multiplicity	4.67852
Parâmetros de alinhamento	
Precisão	Elevada
Generic preselection	Sim
Reference preselection	Não
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Exclude stationary tie points	Sim
Guided image matching	Não
Adaptive camera model fitting	Não
Matching time	2 minutes 18 seconds
Matching memory usage	1.21 GB
Alignment time	3 minutes 8 seconds
Alignment memory usage	115.03 MB
Software version	1.7.0.11701
File size	15.78 MB
Mapas de Profundidade	
Número	182
Depth maps generation parameters	
Qualidade	Elevada
Filtering mode	Aggressive
Tempo de processamento	35 minutes 32 seconds
File size	843.39 MB
Dense Point Cloud	
Pontos	45,955,946
Cores dos pontos	3 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Qualidade	Elevada
Filtering mode	Aggressive
Tempo de processamento	35 minutes 32 seconds
Dense cloud generation parameters	
Tempo de processamento	1 hours 44 minutes
Software version	1.7.0.11701
File size	664.70 MB
Modelo	
Faces	6,627,816
Vértices	3,315,568
Cores dos vértices	3 bands, uint8

Depth maps generation parameters	
Qualidade	Elevada
Filtering mode	Aggressive
Tempo de processamento	35 minutes 32 seconds
Parâmetros de reconstrução	
Surface type	Arbitrário
Source data	Depth maps
Interpolation	Enabled
Strict volumetric masks	Não
Tempo de processamento	17 minutes 27 seconds
Memory usage	4.46 GB
Software version	1.7.0.11701
File size	151.72 MB
DEM	
Tamanho	8,772 x 8,891
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Parâmetros de reconstrução	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Tempo de processamento	30 seconds
Memory usage	299.07 MB
Software version	1.7.0.11701
File size	148.45 MB
Orthomosaic	
Tamanho	11,523 x 12,241
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Colors	3 bands, uint8
Parâmetros de reconstrução	
Modo de combinação	Mosaico
Surface	Mesh
Enable hole filling	Sim
Enable ghosting filter	Não
Tempo de processamento	5 minutes 1 seconds
Memory usage	2.74 GB
Software version	1.7.0.11701
File size	2.39 GB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.7.0 build 11701
OS	Windows 64 bit
RAM	15.84 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i5-10300H CPU @ 2.50GHz
GPU(s)	GeForce GTX 1650

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR EM PRÉDIOS PÚBLICOS:

estudo de caso do Centro Administrativo do Governo do Estado do Maranhão

GOVERNO DO MARANHÃO
TRABALHANDO PARA TODOS

SEPLAN | IMESC

www.imesc.ma.gov.br