



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

ROBSON SÉRGIO GERIMINIANO

**ESTIMATIVA DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS SISTEMAS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO ESTADO DE MATO
GROSSO**

**CUIABÁ - MT
2026**

ROBSON SÉRGIO GERIMINIANO

TÍTULO DO TRABALHO:

**ESTIMATIVA DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS SISTEMAS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO ESTADO DE MATO
GROSSO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Física Ambiental do Instituto de Física da Universidade Federal de Mato Grosso como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em 2026.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Zanella de Arruda

**CUIABÁ-MT
2026**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

G369e Geriminiano, Robson Sérgio.

Estimativa do impacto das mudanças climáticas nos sistemas de geração de energia solar fotovoltaica no estado de Mato Grosso [recurso eletrônico] / Robson Sérgio Geriminiano. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 44 f., il. color., pdf). -- 2026.

Orientador: Paulo Henrique Zanella de Arruda.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2026.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. energia solar fotovoltaica. 2. capacidade instalada. 3. mudanças climáticas. I. Arruda, Paulo Henrique Zanella de, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estimativa do impacto das mudanças climáticas nos sistemas de geração de energia solar fotovoltaica no estado de Mato Grosso

AUTOR : MESTRANDO Robson Sérgio Geriminiano

Dissertação defendida e aprovada em **12 de junho de 2026**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Profa. Dr. Paulo Henrique Zanella de Arruda (Presidente Banca / **Orientador**)

Instituição: Instituto Federal de Mato Grosso

2. Prof. Dr. Leone Francisco Amorim Curado (Membro Interno)

Instituição: Universidade Federal de Mato Grosso

3. Prof. Dr. Danilo Ferreira de Souza (Membro Externo)

Instituição: Universidade Federal de Mato Grosso

Cuiabá, 12/06/2026.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES**, **Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 15/06/2026, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEONE FRANCISCO AMORIM CURADO**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 15/06/2026, às 16:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **DANILO FERREIRA DE SOUZA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 15/06/2026, às 19:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **PAULO HENRIQUE ZANELLA DE ARRUDA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 15/06/2026, às 20:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **9284587** e o código CRC **73E7D9BB**.

RESUMO

Nos últimos anos, observa-se um crescimento expressivo da geração de energia solar fotovoltaica no Brasil, impulsionado tanto pela busca por fontes energéticas mais sustentáveis quanto pela necessidade de diversificação da matriz elétrica. No estado de Mato Grosso, esse avanço ocorre de forma acelerada, favorecido pelas condições climáticas e pela disponibilidade de radiação solar. Entretanto, apesar do potencial elevado, a produção de energia fotovoltaica apresenta limitações associadas à sua dependência de fatores ambientais, especialmente a temperatura, que exerce influência direta sobre o desempenho dos módulos solares.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a evolução da capacidade instalada de geração fotovoltaica no estado de Mato Grosso, bem como avaliar os impactos do aumento da temperatura superficial sobre a eficiência desses sistemas ao longo do tempo. Para isso, foram utilizados dados oficiais da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), associados a projeções climáticas baseadas em modelos globais do projeto de intercomparação de Modelos Acoplados - Fase 6 (CMIP6), considerando o cenário dos caminhos socioeconômicos compartilhados (SSP5). A partir desses dados, aplicou-se modelagem de séries temporais por meio do modelo de média móvel integrada autorregressiva (ARIMA) (0,1,1), permitindo a projeção da expansão da capacidade instalada até o ano de 2050.

Além disso, foram incorporados parâmetros elétricos de módulos fotovoltaicos descritos na literatura, considerando a redução de eficiência em função do aumento da temperatura acima das Condições Padrão de Teste (STC). Os resultados indicam um crescimento contínuo da capacidade instalada no estado, acompanhado por perdas graduais de eficiência decorrentes do aquecimento projetado. Verificou-se que, embora essas perdas sejam relativamente pequenas em termos percentuais, seu impacto torna-se relevante quando associado à expansão da capacidade instalada ao longo das próximas décadas. Dessa forma, conclui-se que a consideração dos efeitos térmicos é fundamental para o planejamento energético de longo prazo, contribuindo para uma avaliação mais realista do desempenho da geração fotovoltaica em cenários futuros.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica; capacidade instalada; mudanças climáticas.

ABSTRACT

In recent years, photovoltaic solar energy generation has experienced significant growth in Brazil, driven both by the search for more sustainable energy sources and by the need to diversify the electrical energy matrix. In the state of Mato Grosso, this expansion has occurred rapidly, favored by climatic conditions and high solar radiation availability. However, despite its considerable potential, photovoltaic energy production presents limitations associated with its dependence on environmental factors, particularly temperature, which directly influences the performance of solar modules.

In this context, the present study aims to analyze the evolution of installed photovoltaic generation capacity in the state of Mato Grosso, as well as to evaluate the impacts of increasing surface temperature on the efficiency of these systems over time. For this purpose, official data from the Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL) were used in association with climate projections based on global models from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), considering the Shared Socioeconomic Pathway scenario (SSP5). Based on these data, time series modeling was performed using the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) (0,1,1) model, enabling the projection of installed capacity expansion through the year 2050.

In addition, electrical parameters of photovoltaic modules described in the literature were incorporated, considering the reduction in efficiency as a function of temperature increases above the Standard Test Conditions (STC). The results indicate continuous growth in installed capacity within the state, accompanied by gradual efficiency losses resulting from projected warming. It was observed that, although these losses are relatively small in percentage terms, their impact becomes relevant when associated with the expansion of installed capacity over the coming decades. Therefore, it is concluded that considering thermal effects is essential for long-term energy planning, contributing to a more realistic assessment of photovoltaic generation performance under future climate scenarios.

Keywords: photovoltaic solar energy; installed capacity; climate change.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Tecnologia solar fotovoltaica (FV).....	17
2.2 Painéis fotovoltaicos.....	18
2.3 Influência da temperatura na eficiência da produção de energia (PV).....	19
2.4 O papel das mudanças climáticas nesse contexto.....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 Área de estudo Nacional.....	21
3.1.1 Delimitação geográfica Nacional e suas características.....	21
3.1.2 Histórico de capacidade instalada de energia fotovoltaica.....	22
3.1.3 Histórico do comportamento térmico.....	24
3.2 Área de estudo estadual – Mato Grosso, como foco desse estudo	25
3.2.1 Delimitação geográfica estadual	25
3.2.2 Histórico de capacidade instalada de energia fotovoltaica.....	27
3.2.3 Histórico do comportamento térmico.....	29
3.3 Procedimentos de análise e tratamento de dados.....	30
3.4 Parâmetros fotovoltaicos adotados	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1 Projeção de capacidade instalada de energia de origem fotovoltaica – Período histórico até 2050	36
4.2 Projeção de temperatura superficial em mato grosso	37
4.3 Análise da comparação entre os cenários propostos	38
5 CONCLUSÕES.....	40
6 REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

É amplamente reconhecido que a maior parte da radiação solar incidente absorvida por um módulo fotovoltaico (FV) não é convertida em energia elétrica, sendo dissipada na forma de calor. Esse processo provoca o aumento da temperatura de operação do módulo (NISHIOKA et al., 2003) e, como consequência, resulta na redução de sua eficiência elétrica.

Esse cenário tem motivado diversos pesquisadores a desenvolverem coletores que exploram a característica térmica dos sistemas fotovoltaicos, de modo a aproveitar a energia que anteriormente era dissipada como perda térmica em uma aplicação útil para o cotidiano da população. Esses sistemas, conhecidos como fotovoltaico-térmicos (FV/T), são capazes de gerar simultaneamente energia elétrica e energia térmica, sendo esta última utilizada, por exemplo, no aquecimento de água (HUANG et al., 2001).

Paralelamente, o contexto das mudanças climáticas tem se intensificado nas últimas décadas, caracterizado pelo aumento das temperaturas médias globais e pela maior frequência de eventos climáticos extremos. Os modelos climáticos globais e regionais indicam uma tendência consistente de elevação da temperatura próxima à superfície, inclusive para a América do Sul e, em particular, para o território brasileiro. Esse aumento térmico projeta impactos diretos sobre sistemas energéticos sensíveis à temperatura de operação, como é o caso dos sistemas fotovoltaicos, tornando essencial a análise dos efeitos do aquecimento global sobre o desempenho e a produção de energia solar ao longo do tempo (REBOITA et al., 2024).

Nesse contexto, o presente estudo também se relaciona com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas, especialmente a ODS 7, que visa assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos. A expansão da geração de energia solar fotovoltaica representa uma estratégia relevante para a diversificação da matriz energética e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Assim, a compreensão dos impactos das mudanças climáticas sobre o desempenho desses sistemas contribui diretamente para o planejamento energético sustentável, particularmente em regiões de elevado potencial solar, como o estado de Mato Grosso.

O primeiro passo consiste em compreender o comportamento do módulo fotovoltaico de forma isolada, bem como a relação entre a produção de energia elétrica e suas características térmicas. Nesse contexto, torna-se fundamental estudar a influência das variações da temperatura da superfície terrestre na região brasileira, em especial no estado de Mato Grosso,

e os efeitos de longo prazo desse fenômeno sobre a eficiência elétrica dos sistemas fotovoltaicos.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo geral analisar a evolução da capacidade instalada de geração de energia solar fotovoltaica no estado de Mato Grosso e avaliar quantitativamente os impactos do aumento da temperatura superficial sobre a eficiência desses sistemas, considerando projeções até o ano de 2050.

Para o alcance do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos: modelar o comportamento histórico da capacidade instalada de geração fotovoltaica no estado de Mato Grosso por meio de técnicas de séries temporais; projetar a expansão da capacidade instalada até o ano de 2050 utilizando modelos estatísticos e integrar projeções climáticas globais, a fim de estimar os impactos do aumento da temperatura sobre a eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este trabalho tem como objetivo abordar, por meio de uma extrapolação estatística, a produção de energia solar no território brasileiro, comparando os valores projetados para o cenário de 2050 com as previsões de temperatura global. Essa comparação servirá de base para a análise dos efeitos do aumento da temperatura da superfície terrestre sobre a produção de energia solar.

A revisão do tema foi delimitada a partir da pesquisa de referências clássicas e recentes nas principais bases bibliográficas científicas, incluindo Scielo, Scopus, Web of Science e a biblioteca virtual Periódicos CAPES. Para a busca, foram utilizadas palavras-chave e expressões em português e em inglês, tais como: energia solar, geração fotovoltaica, dependência da temperatura, temperatura e mudanças climáticas. Após o procedimento exploratório, realizou-se também uma análise das referências citadas nos trabalhos selecionados, ampliando a compreensão do estado da arte sobre o tema.

A definição das palavras-chave utilizadas neste estudo foi realizada com base nos principais eixos temáticos da pesquisa, buscando representar de forma objetiva os elementos centrais relacionados ao problema investigado. As expressões “energia solar fotovoltaica”, “capacidade instalada” e “mudanças climáticas” foram selecionadas por sintetizarem os temas associados à expansão da geração fotovoltaica, à análise estatística da evolução da matriz

energética e aos impactos das variações climáticas sobre o desempenho desses sistemas. A escolha dessas palavras-chave teve como objetivo otimizar a busca por produções científicas relevantes nas bases bibliográficas consultadas, permitindo maior abrangência e alinhamento com o foco do estudo.

Com o objetivo de facilitar a compreensão dos conceitos abordados neste estudo, será apresentada uma revisão bibliográfica detalhada sobre os sistemas fotovoltaicos, suas aplicações, níveis de eficiência e os principais fatores que influenciam o desempenho na geração de energia elétrica.

O foco central da pesquisa consiste em investigar a influência da temperatura ambiente na conversão de energia fotovoltaica pelos painéis solares. Inicialmente, será discutido o funcionamento das células solares responsáveis pela geração da energia elétrica.

Considerando que a garantia de acesso universal a uma energia acessível, confiável e moderna constitui o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável nº 7 da Organização das Nações Unidas, e que o alcance desse objetivo depende fortemente do uso de fontes de energia renováveis (SHARMA et al., 2017), destaca-se a energia solar fotovoltaica como uma alternativa plenamente alinhada a esse propósito.

A discussão prossegue com a análise da eficiência desses sistemas e dos fatores que afetam sua potência de saída, com ênfase especial no papel da temperatura. Por fim, será realizada uma reflexão sobre os impactos das mudanças climáticas, em particular o aumento da temperatura global, nas projeções de geração de energia elétrica por meio dessa fonte renovável.

Fig. 1. Fluxograma demonstrando a metodologia adotada. Fonte: Elaboração própria.



A metodologia adotada neste trabalho encontra-se sintetizada na Figura 1, que apresenta de forma esquemática as principais etapas de desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, definiu-se o problema de pesquisa relacionado aos impactos do aumento da temperatura na eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Em seguida, realizou-se o levantamento e tratamento dos dados energéticos e climáticos utilizados no estudo. Posteriormente, aplicou-se a modelagem estatística para projeção da expansão da capacidade instalada de geração fotovoltaica até o ano de 2050. Por fim, os cenários climáticos foram integrados à análise, possibilitando a avaliação dos impactos térmicos sobre a eficiência dos sistemas fotovoltaicos e a comparação dos resultados projetados em diferentes cenários de mudanças climáticas.

2.1 Tecnologia solar fotovoltaica (FV)

A energia solar é uma fonte renovável, limpa, abundante e promissora, desempenhando papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa e contribuindo de forma significativa para a mitigação do aquecimento global e das mudanças climáticas. Entre as diversas tecnologias de aproveitamento dessa fonte, os sistemas fotovoltaicos destacam-se por converterem diretamente a radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico.

Os painéis fotovoltaicos (PV) têm se consolidado como uma das formas mais eficientes e versáteis de utilização da energia solar, sendo aplicáveis tanto em sistemas de geração centralizada quanto distribuída. Nos últimos anos, essa tecnologia tem apresentado a maior taxa de crescimento entre as fontes renováveis, impulsionada pela redução dos custos de implantação, avanços tecnológicos e políticas públicas de incentivo.

No contexto brasileiro, o crescimento da geração solar fotovoltaica tem sido particularmente expressivo. Somente no ano de 2024, foram instaladas 301 novas usinas solares em 16 estados do país. Desse total, aproximadamente 91,13% da potência instalada proveniente de fontes renováveis corresponde à energia solar fotovoltaica, sendo 51,87% relativos exclusivamente a essa fonte, o que representa mais da metade do montante de potência instalada no período analisado (BRASIL, 2025).

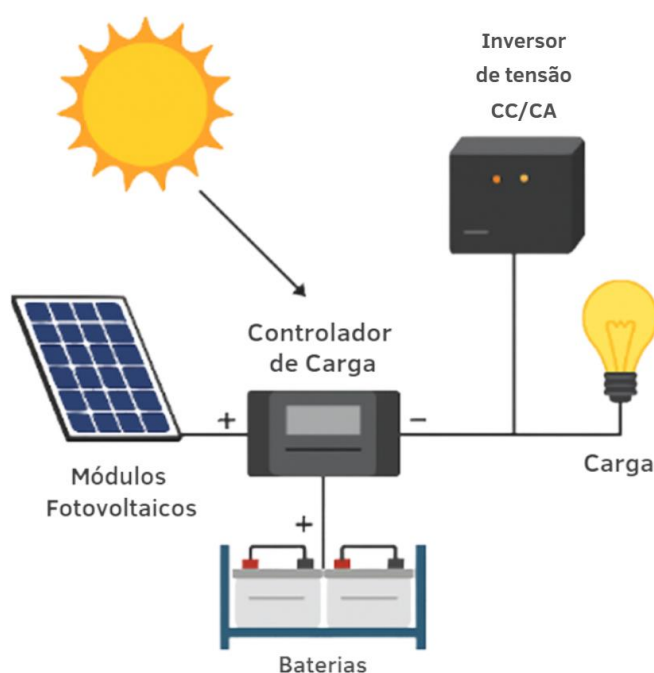


Fig. 2. Princípio de funcionamento do sistema fotovoltaico

Fonte: Elaboração própria.

A figura 2 mostra os principais componentes de um sistema fotovoltaico conectado a baterias e cargas de corrente alternada (AC). O processo inicia-se com a radiação solar que incide sobre o módulo fotovoltaico. Esse módulo converte a luz solar diretamente em eletricidade de corrente contínua (DC).

A energia gerada é então direcionada ao controlador de carga, responsável por regular a tensão e a corrente que vão para as baterias, garantindo o carregamento seguro e eficiente, além de evitar sobrecargas ou descargas excessivas.

Em seguida, a energia armazenada ou gerada em tempo real é enviada para um inversor DC/AC, que converte a corrente contínua (DC) em corrente alternada (AC), possibilitando o uso da eletricidade por cargas domésticas ou comerciais, como lâmpadas, eletrodomésticos e outros

2.2 Painéis fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos, também denominados módulos solares, constituem o elemento central de sistemas fotovoltaicos, sendo responsáveis pela conversão da radiação solar incidente em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Na prática, esses módulos são compostos por diversas células fotovoltaicas interconectadas e encapsuladas em materiais protetores que garantem durabilidade e resistência às condições ambientais. Atualmente, a tecnologia dominante no mercado global é baseada em silício cristalino, representando a maior parte da participação de mercado devido ao seu equilíbrio entre eficiência, confiabilidade e custo de produção, sobretudo nas variantes monocristalina e policristalina (PEREIRA et al., 2024).

Dentro da tecnologia de silício cristalino, os módulos monocristalinos são produzidos a partir de silício altamente purificados e oferecem, em geral, maior eficiência de conversão energética em comparação com os módulos policristalinos, cuja estrutura contém múltiplos cristais de silício e apresenta desempenho um pouco inferior em condições padrão de teste (PEREIRA et al., 2024).

Em termos de eficiência comercial, módulos de silício cristalino frequentemente alcançam valores entre 16 % e 22 %, variando conforme processo de fabricação e tecnologia de célula empregada (PMCID, 2020). Essas características tornam a tecnologia de silício cristalino a opção mais consolidada e amplamente utilizada em projetos.

Como alternativa às tecnologias cristalinas, os módulos de filme fino constituem um grupo diversificado de sistemas fotovoltaicos, caracterizados pela deposição de camadas

semicondutoras com espessuras significativamente inferiores às utilizadas em células cristalinas tradicionais. Entre as principais tecnologias destacam-se o silício amorfo, o telureto de cádmio e o disseleneto de cobre, índio e gálio, amplamente estudados em aplicações fotovoltaicas (SHARMA; JAIN, 2015). Embora, de modo geral, esses módulos apresentem eficiências inferiores às dos sistemas baseados em silício cristalino, com valores típicos abaixo de 20 % em aplicações comerciais, eles oferecem vantagens relevantes, como menor custo de produção, maior flexibilidade e redução no consumo de material semicondutor, favorecendo sua aplicação em contextos específicos, como a integração arquitetônica de edificações (SHOUKAT; RIZWAN; KHAN, 2020).

Além disso, o desempenho dos sistemas fotovoltaicos está diretamente associado a fatores operacionais, especialmente à temperatura dos módulos, que influencia de forma significativa a eficiência de conversão energética. Estudos experimentais indicam que o aumento da temperatura pode reduzir o desempenho elétrico dos módulos, evidenciando a importância da análise das condições térmicas em sistemas fotovoltaicos (NISHIOKA et al., 2003). Nesse contexto, novas abordagens tecnológicas, como células tandem e combinações de materiais, vêm sendo investigadas com o objetivo de aumentar a eficiência e a competitividade desses sistemas no mercado fotovoltaico.

O desempenho elétrico dos painéis fotovoltaicos é fortemente influenciado por condições ambientais, como irradiância solar, temperatura de operação, velocidade do vento e condições atmosféricas locais. A irradiância determina a quantidade de energia disponível para conversão, enquanto a temperatura exerce papel crítico na eficiência do módulo, uma vez que o aumento térmico provoca a redução da tensão de circuito aberto e, consequentemente, da potência máxima gerada (SKOPLAKI; PALYVOS, 2009; HASANUZZAMAN et al., 2016). Embora a corrente elétrica apresente leve incremento com o aumento da temperatura, a queda da tensão é predominante, resultando em perdas significativas de eficiência energética em ambientes de elevada temperatura ambiente (SANI; SULE, 2020).

2.3 Influência da temperatura na eficiência da produção de energia (PV)

A ampla popularização dos painéis fotovoltaicos e sua crescente utilização como alternativa descentralizada para a produção de energia elétrica são fatos amplamente reconhecidos. No entanto, a eficiência desses sistemas permanece limitada por fatores intrínsecos ao material semicondutor das células e, principalmente, pela sua temperatura de operação. O aumento da temperatura do módulo fotovoltaico provoca uma redução significativa

da tensão de circuito aberto, refletindo diretamente na potência gerada. De acordo com os resultados apresentados por Takyi e Nyarko (2020), a tensão de circuito aberto (V_{oc}) de módulos fotovoltaicos de silício monocristalino apresenta um coeficiente térmico da ordem de $-0,112 \text{ V/}^{\circ}\text{C}$, evidenciando uma relação aproximadamente linear entre o aumento da temperatura e a queda da tensão em nível de módulo. Como consequência direta, observa-se também a redução da potência máxima do módulo, estimada em aproximadamente $-0,312 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$ para um módulo de 50 W, o que corresponde a uma perda percentual em torno de $-0,6 \%$ por grau Celsius acima da temperatura de referência de 25°C , definida pelas Condições Padrão de Teste (STC), estabelecidas para uma irradiância de 1000 W/m^2 . Esses resultados reforçam a importância da temperatura como um dos principais fatores limitantes da eficiência dos sistemas fotovoltaicos em condições reais de operação.

Apenas uma fração da radiação solar incidente sobre os módulos fotovoltaicos é efetivamente convertida em energia elétrica, enquanto a maior parcela é dissipada na forma de calor. Estima-se que entre 6% e 20% da energia solar que atinge os módulos seja aproveitada como eletricidade, ao passo que o restante contribui para a elevação da temperatura de operação do módulo, resultando na redução de sua eficiência elétrica (HASANUZZAMAN et al., 2016). Para células de silício multicristalino, a eficiência pode decrescer em aproximadamente $0,45 \%$ por grau Celsius de aumento da temperatura (KALDELLIS; KAPSALI; KAVADIAS, 2014). Em razão desse comportamento térmico e de sua ampla utilização comercial, essa tecnologia fotovoltaica foi adotada como foco central do presente estudo.

Dentre os parâmetros elétricos fundamentais para a análise do comportamento térmico dos módulos fotovoltaicos, destacam-se a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto. Ambos são influenciados pelas variações da irradiância solar incidente e da temperatura ambiente, entretanto, a tensão de circuito aberto apresenta maior sensibilidade ao aumento da temperatura de operação do módulo. Observa-se que a elevação térmica provoca a redução de o que resulta em uma diminuição direta da potência elétrica máxima disponível (MATTEI et al., 2006). Dessa forma, os resultados discutidos na literatura corroboram que a tensão é o parâmetro elétrico mais afetado pelo aumento da temperatura, consolidando o entendimento de que o efeito térmico constitui um fator limitante relevante para o desempenho energético dos sistemas fotovoltaicos.

2.4 O papel das mudanças climáticas nesse contexto

As mudanças climáticas globais têm alterado de forma significativa os padrões de temperatura da superfície terrestre, com evidências de aquecimento observadas em diversas regiões do planeta nas últimas décadas. Os modelos climáticos globais do projeto CMIP6 indicam que as temperaturas próximas à superfície tendem a continuar aumentando de maneira consistente ao longo do século XXI, sob diferentes cenários de emissão. Esses resultados demonstram que o aquecimento observado não se trata de um fenômeno pontual, mas de uma tendência de longo prazo associada ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa e ao consequente forçamento radiativo do sistema climático (REBOITA et al., 2024).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e os métodos adotados para a análise comparativa proposta neste estudo, que relaciona a evolução projetada da geração de energia fotovoltaica no estado de Mato Grosso com o aumento da temperatura próxima à superfície ao longo do período analisado. O objetivo central desta etapa metodológica é avaliar, de forma integrada, como as projeções de crescimento da capacidade instalada de energia solar até 2050 se relacionam com os cenários de elevação da temperatura superficial e quais são os impactos potenciais desse aquecimento sobre a produção de energia elétrica de origem fotovoltaica.

A metodologia empregada foi estruturada em três etapas principais. Na primeira etapa, realizou-se o levantamento e a análise dos dados históricos de capacidade instalada de energia solar no estado de Mato Grosso, a fim de caracterizar a evolução recente da fonte fotovoltaica na região. Em seguida, com o apoio de ferramentas estatísticas, foram elaboradas projeções da produção de energia fotovoltaica até o ano de 2050, considerando as tendências observadas no período histórico. Por fim, as projeção do aumento da temperatura da superfície para o estado de Mato Grosso, aplicando-se uma relação entre temperatura e desempenho fotovoltaico para estimar a parcela de produção de energia potencialmente perdida em função do aumento térmico projetado.

3.1 Área de estudo Nacional

3.1.1 Delimitação geográfica Nacional e suas características

O Brasil possui uma das maiores extensões territoriais do planeta e apresenta elevada diversidade físico-ambiental em função de sua amplitude latitudinal, variações altimétricas e contrastes regionais de circulação atmosférica, o que se reflete em heterogeneidade climática e ecológica. Essa diversidade é frequentemente discutida na literatura a partir de abordagens de classificação climática e de análises espaciais, que demonstram como o território brasileiro abrange desde domínios equatoriais úmidos até áreas semiáridas e regiões subtropicais (ALVARES et al., 2014; LIMA et al., 2024). Em particular, mapas climáticos baseados na classificação de Köppen evidenciam a coexistência de múltiplos tipos climáticos no país, reforçando que a organização territorial brasileira deve ser compreendida sob uma perspectiva integrada entre clima, relevo, vegetação e distribuição espacial de usos da terra (ALVARES et al., 2014).

Do ponto de vista biogeográfico, a disposição territorial do Brasil inclui seis biomas (Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal), cuja distribuição espacial expressa diferentes regimes ambientais e históricos de ocupação e transformação do território. O monitoramento de uso e cobertura da terra em escala nacional destacam que esses biomas apresentam dinâmicas distintas e respondem de maneira desigual às pressões antrópicas, o que reforça a necessidade de caracterizações territoriais que considerem tanto a dimensão natural quanto as mudanças induzidas por atividades humanas (SOUZA JR. et al., 2020). Além disso, o avanço de bases cartográficas e infraestruturas de dados espaciais tem ampliado a capacidade de caracterizar e gerir o território em diferentes escalas, fornecendo suporte técnico para planejamento, monitoramento e gestão territorial no contexto brasileiro (SILVA, 2020).

3.1.2 Histórico de capacidade instalada de energia fotovoltaica

A matriz elétrica brasileira apresenta elevada diversificação tecnológica, com predominância histórica das usinas hidrelétricas, mas com crescimento expressivo de fontes renováveis alternativas ao longo das últimas décadas, especialmente a geração fotovoltaica. Os dados apresentados nesta análise referem-se exclusivamente à Geração Centralizada (GC) em operação no país, conforme a classificação da Agência Nacional de Energia Elétrica. Segundo essa mesma agência a capacidade instalada total de geração centralizada no Brasil ultrapassa 215 GW, sendo as usinas hidrelétricas (UHE) responsáveis por aproximadamente 47,8% da potência fiscalizada, seguidas pelas usinas termelétricas (UTE), com 22,7%, e pelas usinas eólicas (EOL), que representam cerca de 16,1% do total. As usinas fotovoltaicas centralizadas (UFV) já correspondem a aproximadamente 9,3%, conforme apresentado na figura 3, da

capacidade instalada nacional, evidenciando a consolidação dessa fonte no sistema elétrico brasileiro (ANEEL, 2025).

Tabela 1 - Capacidade instalada fiscalizada de geração de energia elétrica no Brasil

Tipo	Quantidade	Potência Fiscalizada (kW)	% Potência Fiscalizada
UHE	215	103.235.221	47,81
UTE	3.050	49.044.922	22,71
EOL	1.134	34.689.154	16,06
UFV	18.650	20.051.697	9,29
PCH	430	6.042.130	2,79
UTN	2	1.990.000	0,92
CGH	705	911.930	0,42
Total	24.186	215.947.053	100,00

Fig. 3. Matriz elétrica brasileira

Fonte: Adaptado de ANEEL (2026).

No âmbito da geração centralizada, a fonte solar fotovoltaica já apresenta participação relevante na matriz elétrica brasileira. Conforme os dados mais recentes da Agência Nacional de Energia Elétrica, as usinas fotovoltaicas centralizadas (UFV) totalizam aproximadamente 20,05 GW de potência instalada em operação, o que corresponde a cerca de 9,3% da capacidade instalada da geração centralizada no país. Embora expressiva, essa parcela representa apenas uma fração do potencial efetivamente instalado da fonte solar, uma vez que os dados de geração centralizada não contemplam a contribuição da Geração Distribuída (GD), cuja expansão tem ocorrido de forma acelerada nos últimos anos (ANEEL, 2025).

Ao se considerar conjuntamente a potência instalada da geração centralizada fotovoltaica e a potência proveniente da geração distribuída, a capacidade instalada total da fonte solar no Brasil ultrapassou 60 GW em 2025, consolidando-se como uma das principais fontes renováveis da matriz elétrica nacional.



Fig. 4. Distribuição geográfica. Geração distribuída proveniente de radiação solar

Fonte: Adaptado de ANEEL (2026).

3.1.3 Histórico do comportamento térmico

O comportamento térmico da superfície terrestre no Brasil tem sido amplamente investigado por meio de séries históricas observacionais e simulações climáticas, evidenciando uma tendência consistente de elevação das temperaturas médias ao longo das últimas décadas. Análises espaciais da temperatura média anual indicam que parte do território brasileiro apresenta valores elevados, com destaque para as regiões Norte e Centro-Oeste, onde predominam temperaturas médias superiores a 24 °C. A classificação climática de Köppen-Geiger e os dados observacionais mostram que esse padrão térmico resulta da combinação entre fatores geográficos, como latitude, continentalidade e altitude, e características atmosféricas regionais, como a circulação de massas de ar e a distribuição sazonal da precipitação (ALVARES et al., 2014; LIMA et al., 2024). A Figura 5 ilustra essa distribuição espacial da temperatura média anual no Brasil para o período de 1989 a 2019, evidenciando a heterogeneidade térmica do território nacional.

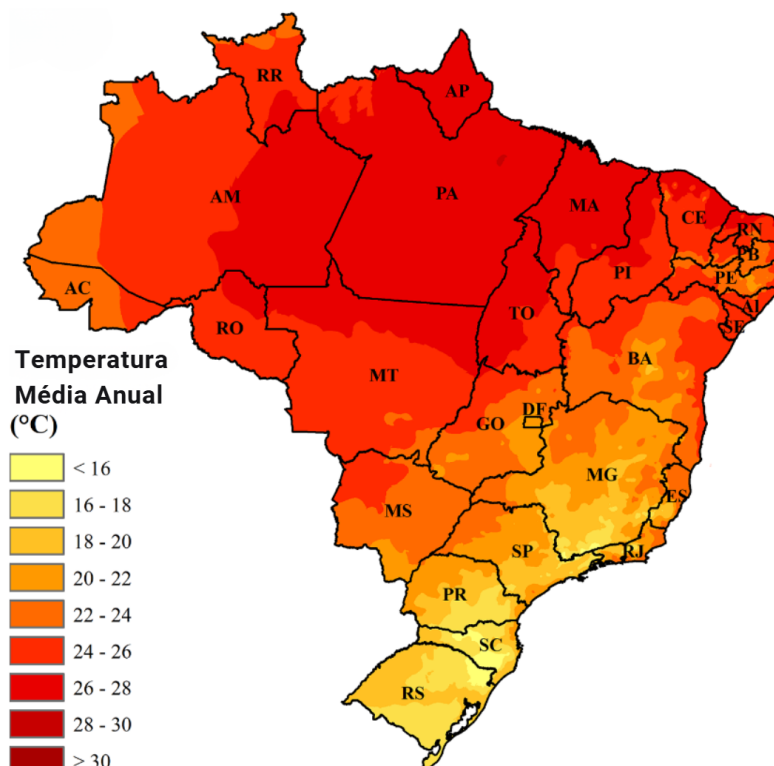


Fig. 5. Temperatura para as condições climáticas atuais de 1989 a 2019.

Fonte: Adaptado de Lima et al. (2024).

Além do padrão espacial, o histórico recente aponta para um aquecimento progressivo da temperatura próxima à superfície em praticamente todas as regiões do país. Resultados apresentados por Reboita et al. (2021, 2024), com base em dados observados e em modelos climáticos globais do CMIP6, indicam aumento consistente da temperatura média anual ao longo do final do século XX e início do século XXI, acompanhado pela maior frequência de dias quentes e de eventos extremos de calor.

3.2 Área de estudo estadual – Mato Grosso, como foco desse estudo

3.2.1 Delimitação geográfica estadual

O estado de Mato Grosso localiza-se na região Centro-Oeste do Brasil, inteiramente no Hemisfério Sul, ao sul da Linha do Equador, ocupando uma posição estratégica no interior do território nacional. Com uma extensão territorial de aproximadamente 903.208 km², Mato Grosso figura entre os maiores estados brasileiros em área e apresenta uma configuração

especial marcada pela continentalidade. O estado é composto por 141 municípios, tendo Cuiabá como capital administrativa, o que reforça sua relevância geográfica, econômica e ambiental no contexto nacional (IBGE, 2024).

Do ponto de vista físico-geográfico, Mato Grosso caracteriza-se por elevada heterogeneidade ambiental, uma vez que abriga três biomas brasileiros (Amazônia, Cerrado e Pantanal), distribuídos de forma espacialmente distinta ao longo do território estadual. Essa diversidade resulta em contrastes expressivos de relevo, cobertura vegetal e regimes climáticos, que influenciam diretamente o comportamento térmico regional.

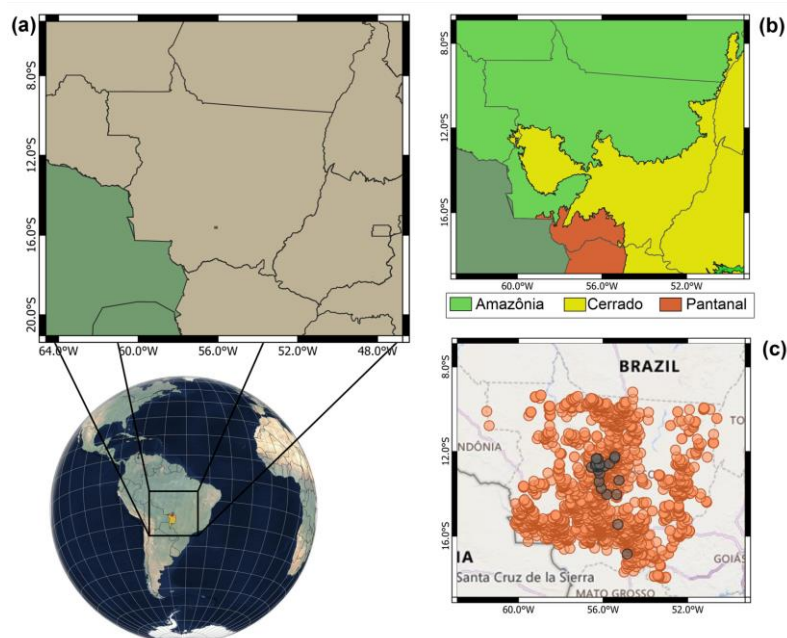


Fig. 6. (a) Localização geográfica do estado de Mato Grosso; (b) Distribuição dos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal no estado de Mato Grosso; (c) Distribuição espacial das unidades fotovoltaicas instaladas no estado. Fonte: Elaboração própria.

A distribuição da temperatura do ar no estado apresenta padrões coerentes com fatores como latitude, altitude e uso e cobertura da terra, evidenciando variações térmicas intraestaduais bem definidas (RAMOS et al., 2017). Essas características tornam Mato Grosso uma área de estudo particularmente relevante para análises que envolvem variáveis climáticas e ambientais em escala regional, especialmente em investigações voltadas ao comportamento térmico e às projeções de longo prazo.

3.2.2 Histórico de capacidade instalada de energia fotovoltaica

Considerando exclusivamente o estado de Mato Grosso, os dados mais recentes da Agência Nacional de Energia Elétrica indicam que a geração fotovoltaica centralizada (GC) é composta por 326 empreendimentos, totalizando uma potência instalada fiscalizada de 28,09 GW. Embora relevante do ponto de vista estrutural, essa parcela representa uma fração reduzida da capacidade fotovoltaica total instalada no estado, uma vez que não contempla a contribuição da geração distribuída (GD), cuja expansão tem sido significativamente mais expressiva nos últimos anos (ANEEL, 2026).

No que se refere à geração distribuída fotovoltaica, Mato Grosso contabiliza 213.685 unidades instaladas, correspondendo a uma potência instalada de 2,87 GW. Ao se consolidarem os valores de geração centralizada e distribuída, a capacidade instalada total de produção de energia fotovoltaica no estado de Mato Grosso atinge aproximadamente 2,91 GW. Observa-se, portanto, que a geração distribuída responde por mais de 99% da capacidade fotovoltaica instalada no estado, evidenciando o caráter descentralizado da expansão da fonte solar em Mato Grosso e reforçando a importância de análises que considerem o desempenho da geração fotovoltaica sob condições ambientais reais, especialmente em cenários de elevação da temperatura (ANEEL, 2026).

A análise da capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica nos municípios do estado de Mato Grosso evidencia uma distribuição espacial heterogênea, fortemente associada a fatores econômicos, demográficos, produtivos e de infraestrutura elétrica. Observa-se que a expansão da geração fotovoltaica ocorre em praticamente todo o território estadual, abrangendo desde municípios até localidades de menor população, o que reforça o caráter descentralizado dessa fonte energética, especialmente no contexto da geração distribuída.

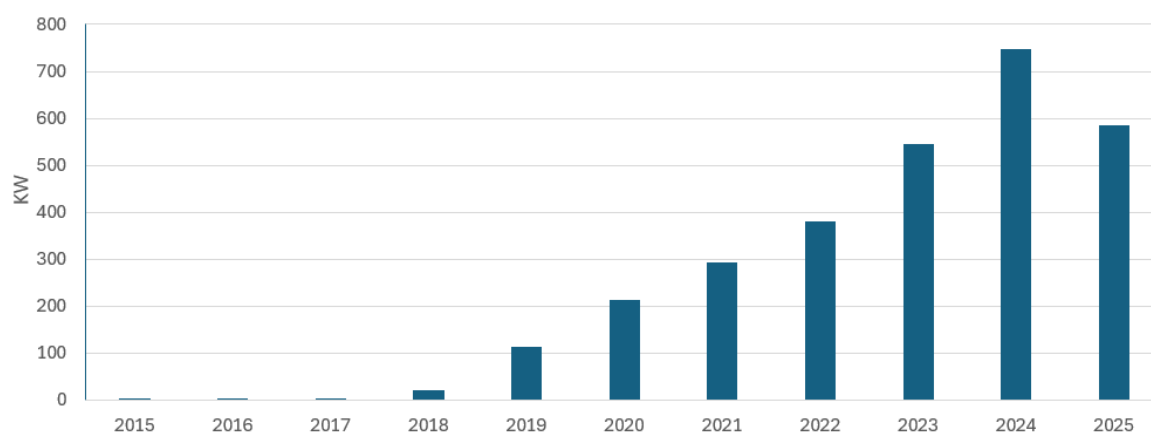


Fig. 7. Contribuição anual de kW na capacidade instalada (FV) em MT

Fonte: Adaptado de ANEEL (2026).

Os maiores valores de potência instalada concentram-se em municípios com maior dinamismo econômico e agroindustrial. Destacam-se Cuiabá (460.039 kW), Rondonópolis (178.630 kW), Várzea Grande (159.025 kW), Sinop (142.154 kW) e Sorriso (122.247 kW), que juntos representam uma parcela expressiva da capacidade fotovoltaica estadual. Esses municípios combinam alta densidade populacional, forte atividade comercial e industrial, além de significativa presença do agronegócio, setor que tem desempenhado papel central na adoção de sistemas fotovoltaicos, sobretudo para autoconsumo e redução de custos operacionais.

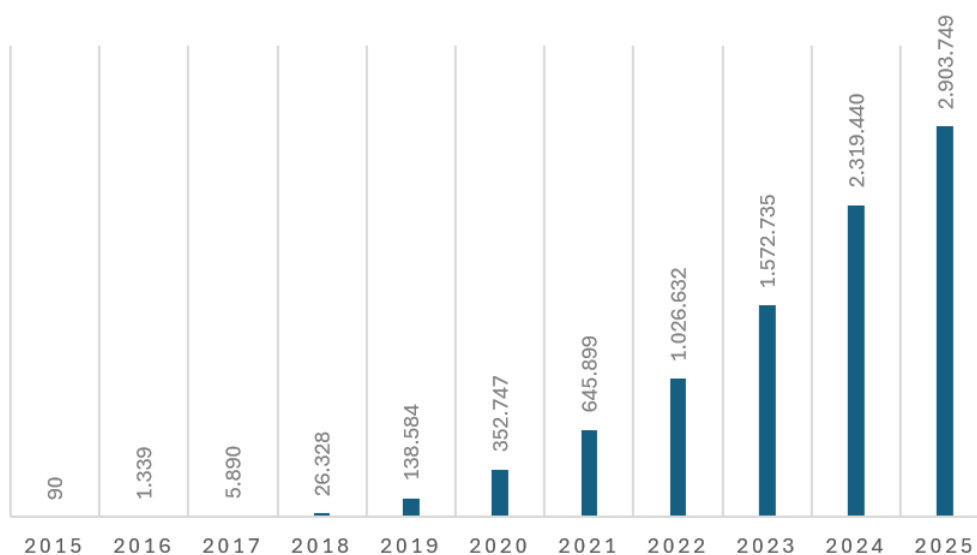


Fig. 8. Capacidade instalada (FV) em MT. Valores acumulados.

Fonte: Adaptado de ANEEL (2026).

Municípios de médio porte, como Tangará da Serra (85.662 kW), Lucas do Rio Verde (77.674 kW), Primavera do Leste (69.136 kW), Nova Mutum (65.577 kW) e Cáceres (63.289 kW), também apresentam valores elevados de potência instalada, indicando que a difusão da energia solar não se restringe às regiões metropolitanas, mas acompanha a interiorização do desenvolvimento econômico no estado. Em contrapartida, observa-se que municípios com menor população e menor atividade econômica, como Araguainha (340 kW), Boa Esperança do Norte (10 kW) e Serra Nova Dourada (382 kW), apresentam capacidades significativamente inferiores, refletindo limitações estruturais e menor demanda energética.

De forma geral, os dados demonstram que a energia fotovoltaica está amplamente disseminada nos 142 municípios mato-grossenses, com forte protagonismo da geração distribuída, evidenciando uma transição energética em curso no estado. Essa distribuição territorial diversificada torna Mato Grosso um caso particularmente relevante para avaliar os impactos de variáveis climáticas, como o aumento da temperatura superficial, sobre a eficiência e a produção de energia fotovoltaica, uma vez que os sistemas estão expostos a diferentes condições ambientais ao longo de um território extenso e climaticamente heterogêneo.

3.2.3 Histórico do comportamento térmico

No Centro-Oeste brasileiro, com destaque para o estado de Mato Grosso, a elevação térmica tende a ser mais pronunciada devido à combinação entre características físico-geográficas (continentalidade e marcada sazonalidade seca) e transformações intensas no uso e cobertura da terra, que modificam o balanço de energia na superfície. Evidências observacionais em escala municipal e regional apontam para aumento da temperatura de superfície em áreas urbanas e periurbanas (por exemplo, Cuiabá), compatível com processos de expansão urbana e alterações na cobertura vegetal, reforçando a sensibilidade térmica regional a mudanças antrópicas (SORIA et al., 2024). Os extremos climáticos no Centro-Oeste indicam tendências de intensificação de eventos de calor, com mudanças detectáveis em índices de temperatura e na ocorrência de extremos térmicos, sugerindo maior exposição regional a condições mais quentes ao longo do tempo (DOS SANTOS et al., 2023).

Além do sinal observado, projeções baseadas em modelos climáticos (CMIP6 e produtos derivados) apontam continuidade do aquecimento nas próximas décadas em regiões que abrangem Cerrado, Pantanal e áreas de transição Amazônia–Cerrado, onde Mato Grosso se

insere de forma expressiva. Resultados de simulações e projeções climáticas para biomas brasileiros indicam elevação da temperatura e alterações associadas em variáveis de superfície (como evapotranspiração de referência), com intensificação especialmente no período seco — aspecto crítico para a dinâmica térmica regional (SABINO et al., 2024; REBOITA et al., 2021; REBOITA et al., 2024). Assim, o histórico e as projeções de aquecimento em Mato Grosso constituem base fundamental para a análise de impactos sobre sistemas sensíveis à temperatura e para as comparações desenvolvidas nos capítulos subsequentes.

3.3 Procedimentos de análise e tratamento de dados

Os dados empregados neste estudo têm como principal fonte as bases oficiais da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável pela disponibilização e sistematização das informações referentes à capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil. Foram utilizados dados atualizados de capacidade instalada de energia fotovoltaica, contemplando tanto a geração centralizada (GC) quanto a geração distribuída (GD), com recorte espacial para o estado de Mato Grosso e desagregação em nível municipal, conforme apresentado nos capítulos anteriores. Complementarmente, os dados relativos à temperatura próxima à superfície terrestre e às suas projeções futuras foram obtidos a partir de artigos científicos publicados em periódicos indexados, selecionados nas bases SciELO, Scopus, Web of Science e na Biblioteca Virtual de Periódicos CAPES.

As variáveis analisadas neste estudo concentram-se na capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica, expressa em quilowatts (kW), e na temperatura média próxima à superfície terrestre, por serem diretamente relacionadas ao desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Os dados de capacidade instalada referem-se ao período histórico mais recente disponibilizado pela ANEEL, abrangendo a evolução da geração fotovoltaica no estado de Mato Grosso até o ano de 2025, enquanto as informações de temperatura baseiam-se em séries históricas e projeções, com foco no comportamento térmico observado nas últimas décadas. A partir dessas bases, adotou-se como horizonte futuro de análise a extrapolação dos dados até o ano de 2050, permitindo avaliar cenários prospectivos de crescimento da geração solar e os impactos potenciais do aumento da temperatura superficial sobre a produção de energia fotovoltaica ao longo do período projetado.

Uma vez que os dados originais foram extraídos de uma fonte segura ligada a maior agência de energia elétrica nacional, restava agora um modelo estatístico para extrapolar esses dados durante os anos seguintes até a data pretendida, que é 2025. Assim o modelo ARIMA

(AutoRegressive Integrated Moving Average) foi o escolhido, esse é uma extensão do modelo ARMA (AutoRegressive Moving Average), sendo especialmente indicado para séries que apresentam tendência ao longo do tempo e, portanto, não estacionariedade. Enquanto o modelo ARMA é aplicado a séries estacionárias, o modelo ARIMA incorpora o termo de integração (d), que corresponde ao processo de diferenciação da série, permitindo torná-la estacionária antes da modelagem propriamente dita. Dessa forma, o ARIMA mostra-se adequado para a análise e projeção da capacidade instalada de energia fotovoltaica, variável que apresenta crescimento contínuo ao longo do tempo.

No modelo ARIMA (p, d, q), o parâmetro p representa a ordem do componente autorregressivo, responsável por capturar a dependência entre o valor atual da série e seus valores defasados; o parâmetro d corresponde ao grau de integração, associado ao número de diferenciações necessárias para tornar a série estacionária; e o parâmetro q refere-se à ordem do componente de médias móveis, que modela a influência dos erros aleatórios passados sobre o valor corrente da série. A correta definição desses parâmetros é fundamental para garantir a adequação estatística e a capacidade preditiva do modelo.

A análise preliminar da série em nível evidenciou um crescimento contínuo e acentuado da capacidade instalada, conforme apresentado na figura 9, característica típica de séries acumulativas de infraestrutura energética, indicando a presença de tendência determinística e, consequentemente, a não estacionariedade da série. Diante desse comportamento, procedeu-se à diferenciação de primeira ordem, conforme recomendado por Box et al. (2016). Essa transformação mostrou-se suficiente para remover a tendência presente na série original, estabilizando sua média e definindo o grau de integração como $d = 1$, sem a necessidade de diferenciações adicionais, as quais poderiam introduzir ruído excessivo e comprometer a interpretabilidade da série.

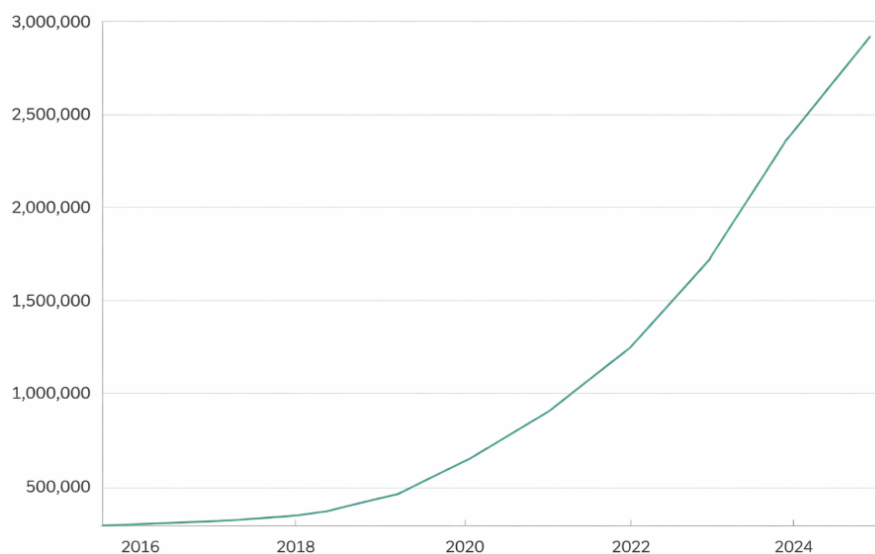


Fig. 9. Crescimento contínuo da capacidade instalada de geração solar em MT

Fonte: Elaboração própria.

Uma vez obtida a série estacionária, procedeu-se à identificação dos componentes autorregressivo e de médias móveis. A análise da estrutura de dependência temporal da série diferenciada não evidenciou correlações persistentes que justificassem a inclusão de termos autorregressivos, resultado compatível com aplicações empíricas de modelos ARIMA em séries anuais do setor elétrico brasileiro. Em consonância com o princípio da parcimônia estatística, optou-se pela definição de $p = 0$ (AMARO et al., 2017). Por outro lado, observaram-se flutuações irregulares nos incrementos anuais da capacidade instalada, associadas a choques exógenos, tais como alterações regulatórias, políticas de incentivo e variações nos custos das tecnologias fotovoltaicas. A inclusão de um termo de média móvel de primeira ordem ($q = 1$) mostrou-se adequada para capturar a dependência entre os erros de previsão em períodos consecutivos, conforme discutido por Box et al. (2016).

Dessa forma, o modelo especificado para a série temporal da capacidade instalada de energia fotovoltaica no estado de Mato Grosso foi o ARIMA (0,1,1). Essa apresenta estrutura mostrou-se adequada para representar a dinâmica temporal da série, subsidiando a geração de projeções consistentes de médio e longo prazo até o horizonte de 2050.

A abordagem metodológica adotada para a análise dos dados de temperatura superficial segue o rigor científico necessário para as projeções climáticas em escala regional, fundamentando-se na utilização de dados provenientes de Modelos de Circulação Global

(Global Climate Models – GCMs), vinculados ao Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). Esses modelos representam o estado da arte na simulação do sistema climático terrestre, permitindo a avaliação de cenários futuros a partir de diferentes trajetórias de emissão de gases de efeito estufa. O emprego dessas bases de dados possibilita a incorporação de incertezas e variabilidades inerentes ao sistema climático, garantindo maior robustez às análises desenvolvidas.

O objetivo da utilização dessas projeções é prover uma base de dados climáticos consistente e refinada, capaz de subsidiar a avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre sistemas energéticos sensíveis às condições térmicas, como a geração fotovoltaica. Nesse contexto, foram utilizadas projeções de temperatura média próxima à superfície associadas ao cenário SSP5, caracterizado por altas emissões, permitindo a análise de condições mais severas de aquecimento ao longo do século XXI. Essa abordagem possibilita a integração entre variáveis climáticas e energéticas, fornecendo suporte técnico para a avaliação do desempenho futuro da geração solar no estado de Mato Grosso.

Para o processamento e extração de dados geoespaciais, utilizou-se a plataforma Google Earth Engine (GEE). A arquitetura em nuvem do GEE permite a manipulação eficiente de séries temporais extensas, eliminando gargalos de infraestrutura local. A extração das variáveis meteorológicas foi realizada por meio do acesso direto ao repositório de dados hospedado na plataforma, garantindo a integridade das séries temporais necessárias para a caracterização do clima histórico e das projeções futuras sobre o território mato-grossense.

As projeções climáticas foram derivadas do dataset *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6). Este conjunto de dados fornece projeções globais de clima refinadas espacialmente para uma resolução de $0,25^\circ$ (~25 km), o que é essencial para capturar nuances regionais conforme preconizado por Reboita et al. (2024). A utilização do NEX-GDDP-CMIP6 justifica-se pela aplicação de técnicas de *bias correction* (correção de viés). Conforme discutido na literatura (DIAS; REBOITA, 2021; REBOITA et al., 2024), os modelos globais puros frequentemente apresentam um "viés frio" (*cold bias*) ou "viés seco" (*dry bias*) em porções centrais da América do Sul, falhando em representar a magnitude real do calor na região Centro-Oeste. O *downscaling* estatístico presente nesta base de dados corrige tais distorções, permitindo que o sinal climático global seja traduzido para a

escala regional de Mato Grosso com a precisão exigida pela modelagem de recursos energéticos.

A seleção dos modelos climáticos baseou-se nos subdomínios geográficos definidos por Reboita et al. (2024), onde Mato Grosso está inserido na intersecção entre a Região 1 (AMZ) e a Região 5. Foram selecionados os modelos TaiESM1, CMCC-CM2-SR5 e CMCC-ESM2.

A fundamentação para a escolha destes GCMs repousa nos seguintes critérios técnicos:

- **TaiESM1:** Identificado como um dos modelos de desempenho superior no ranking conjunto para a América do Sul (REBOITA et al., 2024). Este modelo demonstrou baixo erro relativo e alta correlação espacial na simulação de variáveis meteorológicas fundamentais.
- **Família CMCC (CMCC-CM2-SR5 e CMCC-ESM2):** Estes modelos foram selecionados por sua performance destacada na representação da temperatura próxima à superfície nas porções centrais da América do Sul. A escolha baseia-se na capacidade desses modelos em minimizar o viés sistemático e representar adequadamente o ciclo anual de temperatura no centro oeste brasileiro, superando as limitações comuns de outros membros do *ensemble* CMIP6 (REBOITA et al., 2024).

A análise operacionaliza dois Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (*Shared Socioeconomic Pathways*), diferenciados pelo nível de forçamento radiativo projetado até o final do século:

- **SSP2-4.5:** Cenário intermediário (*middle of the road*), onde as emissões de gases de efeito estufa seguem tendências históricas com esforços moderados de mitigação.
- **SSP5-8.5:** Cenário de altas emissões (*fossil-fuel-powered development*), representando um futuro de desenvolvimento intensivo em combustíveis fósseis e elevado forçamento radiativo. O horizonte temporal de análise compreende o intervalo de **2010 a 2090**, permitindo a avaliação da variabilidade climática desde o período histórico recente até o final do século XXI.

O fluxo de processamento de dados foi estruturado para isolar as tendências climáticas de longo prazo das flutuações sazonais. O procedimento seguiu as seguintes etapas:

1. **Extração e Agregação:** Extração dos dados diários de temperatura do NEX-GDDP-CMIP6, seguida pela agregação para médias mensais e anuais.
2. **Métricas Estatísticas e Suavização:** Aplicação da metodologia de Rupp et al. (2013) para o cálculo de médias decadais. Esta técnica é fundamental para filtrar o ruído interanual e destacar o **sinhal antropogênico** da tendência climática (*linear trend*).
3. **Análise de Ciclo Anual:** Cálculo da amplitude do ciclo anual para monitorar possíveis mudanças na sazonalidade térmica, o que impacta diretamente o planejamento da manutenção e operação de parques fotovoltaicos.

As afirmações técnicas relativas ao desempenho, viés (*bias*) e ranqueamento dos modelos CMIP6 para a América do Sul estão creditadas a **Reboita et al. (2024)** e **Dias e Reboita (2021)** . A terminologia técnica empregada, incluindo conceitos de *ensemble* , forçamento radiativo e *downscaling* , segue estritamente o léxico da climatologia dinâmica contemporânea.

3.4 Parâmetros fotovoltaicos adotados

Para a aplicação prática neste estudo, adotou-se um conjunto padronizado de parâmetros fotovoltaicos com o objetivo de estabelecer uma relação direta entre o aumento da temperatura superficial da Terra na região de Mato Grosso e as perdas de desempenho elétrico dos sistemas fotovoltaicos ao longo do período analisado. Seguindo a abordagem experimental empregada por Takyi e Nyarko (2020), foi considerado um módulo fotovoltaico monocristalino com potência nominal de 50 W, operando sob irradiância de 1000 W/m², em conformidade com as Condições Padrão de Teste (STC), amplamente utilizadas na literatura para análises comparativas de desempenho. A escolha dessa potência nominal também se justifica por permitir a normalização dos resultados e por facilitar a extrapolação dos efeitos térmicos para sistemas de maior porte, conforme discutido por Hasanuzzaman et al. (2016).

Adicionalmente, foi adotado um coeficiente térmico de tensão de $-0,112 \text{ V/}^{\circ}\text{C}$, conforme determinado experimentalmente por Takyi e Nyarko (2020), refletindo a sensibilidade da tensão elétrica do módulo às variações térmicas. A partir desse coeficiente, estabeleceu-se a relação entre o aumento da temperatura acima de 25 °C e a consequente redução da potência elétrica máxima disponível, assumindo comportamento aproximadamente linear, conforme indicado por análises consolidadas na literatura especializada (SKOPLAKI; PALYVOS, 2009). Dessa forma, para cada incremento de 1 °C na temperatura de operação do

módulo acima das condições padrão, considera-se uma perda sistemática de potência, permitindo a quantificação dos impactos térmicos associados ao aquecimento projetado da superfície terrestre na região de estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir das projeções da capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica no estado de Mato Grosso, em comparação com o comportamento da temperatura superficial na mesma região e ao longo do mesmo período amostral. A partir dessa abordagem, realiza-se uma análise comparativa entre dois cenários distintos: o primeiro considera a produção de energia fotovoltaica sob a hipótese de estabilidade térmica ao longo do período analisado, enquanto o segundo incorpora as alterações projetadas na temperatura da superfície terrestre e seus efeitos sobre a produção de energia elétrica.

Para facilitar a interpretação e a comparação dos resultados, os dados referentes a cada variável foram inicialmente apresentados de forma individualizada, por meio de representações gráficas. Em seguida, procedeu-se à análise conjunta dessas informações, permitindo avaliar de maneira integrada a influência das variações térmicas sobre a capacidade de geração de energia fotovoltaica na região de estudo.

4.1 Projeção de capacidade instalada de energia de origem fotovoltaica – Período histórico até 2050

Este item apresenta a evolução da capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica, contemplando o período histórico e as projeções até o ano de 2050. Inicialmente, são analisados os dados observados, evidenciando a dinâmica de crescimento da fonte solar no estado de Mato Grosso. Na sequência, são apresentadas as projeções obtidas por meio de modelagem de séries temporais, permitindo a estimativa do comportamento futuro da expansão da fonte. Essa abordagem possibilita a construção de cenários prospectivos consistentes, fundamentais para a compreensão da evolução do sistema energético. Por fim, os resultados servem de base para a análise integrada com as variáveis climáticas consideradas neste estudo.

4.2 Projeção de temperatura superficial em mato grosso

Conforme apresentado na Figura 10, observa-se a evolução da capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica no estado de Mato Grosso ao longo do período histórico entre 2015 e 2025, expressa em gigawatts (GW). O gráfico evidencia um crescimento acelerado e contínuo da fonte solar no estado, especialmente a partir de 2019, refletindo a consolidação da tecnologia fotovoltaica no contexto energético regional. Esse comportamento está alinhado com o cenário nacional de expansão da energia solar, impulsionado pela redução dos custos dos módulos, avanços tecnológicos e aprimoramentos regulatórios no setor elétrico brasileiro. A trajetória observada até 2025 indica que a fonte solar passou de uma participação marginal para um papel relevante na matriz elétrica estadual, acompanhando tendências identificadas em outras regiões do Brasil (PEREIRA et al., 2017).

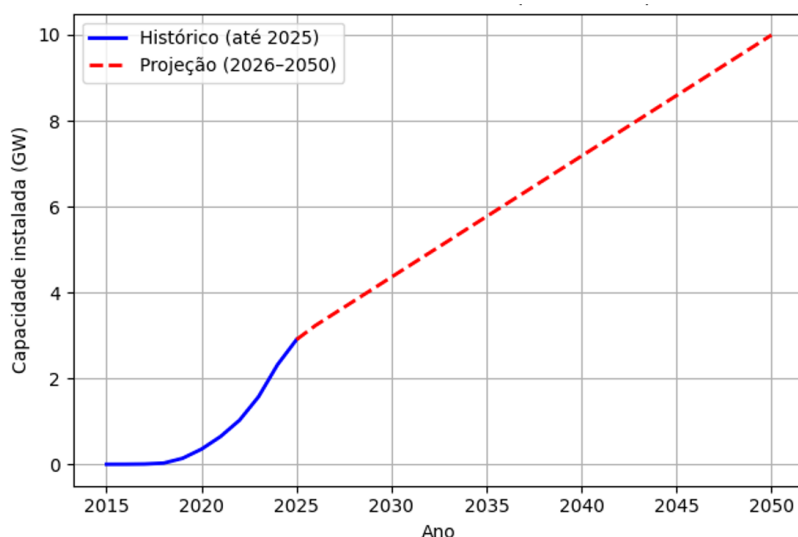


Fig. 10. Evolução histórica e projeção da capacidade instalada de energia fotovoltaica no estado de Mato Grosso (2025 – 2050)

Fonte: Elaboração própria.

Ainda na Figura 10, são apresentadas as projeções da capacidade instalada de energia fotovoltaica para o período de 2026 a 2050, obtidas a partir da aplicação do modelo ARIMA às séries temporais históricas. Os resultados projetados indicam a manutenção de uma tendência de crescimento contínuo ao longo do horizonte analisado, sugerindo a persistência dos fatores estruturais que têm sustentado a expansão da fonte solar em Mato Grosso. Projeções semelhantes têm sido reportadas na literatura científica para o setor energético, indicando que modelos de séries temporais são ferramentas adequadas para a estimação do comportamento

futuro da capacidade instalada quando associadas a séries com forte tendência de crescimento (BOX et al., 2016). Dessa forma, a projeção apresentada reforça a expectativa de ampliação significativa da participação da energia fotovoltaica no estado até meados do século XXI, fornecendo subsídios para a análise dos impactos climáticos e térmicos sobre a produção de energia elétrica, desenvolvida nas etapas subsequentes deste estudo.

4.3 Análise da comparação entre os cenários propostos

Uma vez definidos os dados de capacidade instalada projetada até o ano de 2050, torna-se possível discutir os resultados obtidos para as projeções de temperatura com base nos cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Esses cenários representam diferentes trajetórias futuras de desenvolvimento socioeconômico, níveis de emissão de gases de efeito estufa e intensidade do aquecimento global, permitindo avaliar distintos impactos sobre os sistemas de geração fotovoltaica.

O cenário SSP2-4.5 é caracterizado como uma trajetória intermediária de desenvolvimento, frequentemente denominado “caminho do meio”. Nesse cenário, considera-se a continuidade das tendências atuais de crescimento econômico e populacional, associada à implementação gradual de políticas de mitigação climática e à redução lenta das emissões atmosféricas ao longo das próximas décadas. Como resultado, as emissões tendem a se estabilizar progressivamente até o final do século, produzindo um forçamento radiativo aproximado de 4,5 W/m² em 2100. Dessa forma, esse cenário projeta um aumento médio da temperatura global entre aproximadamente 2 °C e 3 °C em relação ao período pré-industrial, sendo considerado um cenário intermediário de aquecimento climático.

Em contrapartida, o cenário SSP5-8.5 representa uma trajetória de elevadas emissões de gases de efeito estufa, associada à forte dependência de combustíveis fósseis, elevada demanda energética global e baixa adoção de políticas ambientais restritivas. Nesse contexto, as emissões atmosféricas continuam aumentando de forma significativa ao longo do século, resultando em um forçamento radiativo de aproximadamente 8,5 W/m² até o ano de 2100. Consequentemente, esse cenário projeta um aumento mais acentuado da temperatura global, podendo ultrapassar valores entre 4 °C e 5 °C em relação ao período pré-industrial, sendo frequentemente associado a impactos climáticos mais severos.

Observa-se, na Figura 11, que o cenário SSP5-8.5 apresenta projeções de temperatura significativamente superiores às observadas no cenário SSP2-4.5, conforme destaca Reboita et al. (2024), evidenciando o efeito direto das diferentes trajetórias de emissão atmosférica sobre o comportamento térmico futuro. A partir da análise desses dois cenários, torna-se possível avaliar os impactos térmicos sobre o desempenho dos sistemas de geração fotovoltaica.

Considerando que módulos fotovoltaicos podem apresentar perdas de eficiência de até $-0,6\%$ por grau Celsius acima da temperatura de referência de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, estabelecida pelas Condições Padrão de Teste (STC), conforme observado por Takyi e Nyarko (2020), verifica-se que os sistemas instalados no estado de Mato Grosso já operam, nas condições atuais, sob temperaturas superiores ao valor de referência. Esse comportamento implica perdas naturais de potência, as quais tendem a se intensificar diante dos cenários futuros de aumento da temperatura superficial.

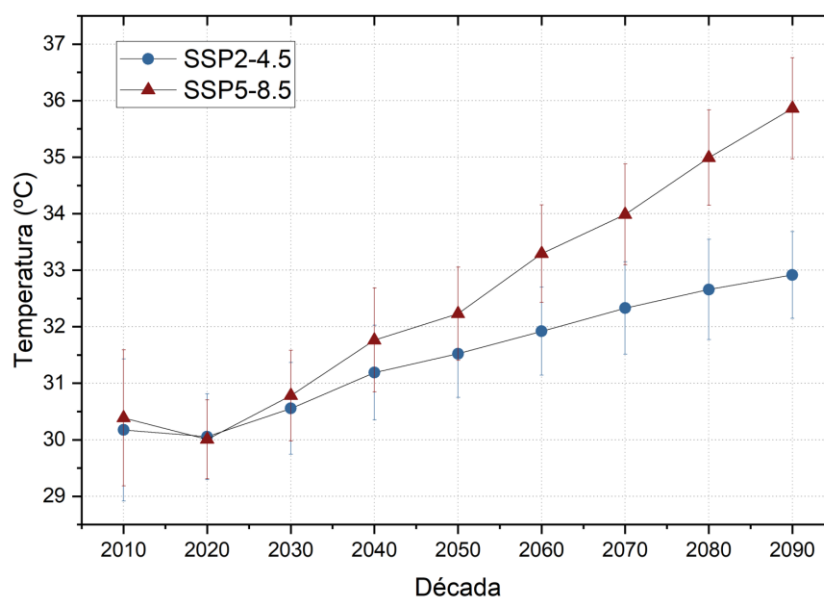


Fig. 11. Projeções decadais da temperatura média de superfície ($^{\circ}\text{C}$) para o estado de Mato Grosso, no período de 2010 a 2090, sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Cada ponto representa a média decadal do exemplo composto pelos modelos CMCC-CM2-SR5, CMCC-ESM2 e TaiESM1. As barras de erro correspondem ao intervalo de confiança de 95% estimado por bootstrap percentílico com 1000 reamostragens. Fonte: Elaboração própria.

A partir da conversão da potência instalada total em uma quantidade equivalente de módulos com potência unitária padrão de 50 W , foi possível estimar a perda percentual de potência associada às condições térmicas projetadas. Essa abordagem permite evidenciar, de

forma quantitativa, os efeitos do aumento da temperatura superficial sobre a produção total estimada de energia fotovoltaica em Mato Grosso. Os resultados indicam que, no cenário SSP2-4.5, caracterizado como uma trajetória intermediária de desenvolvimento, as perdas de eficiência dos sistemas fotovoltaicos tendem a ocorrer de forma gradual ao longo do período analisado. Nesse cenário, a perda percentual projetada pode atingir aproximadamente 3,86 % até o ano de 2050, demonstrando que o aumento da temperatura superficial exerce influência direta sobre a capacidade efetiva de geração de energia solar no estado de Mato Grosso.

	SSP2-4.5	SSP5-8.5
O Perfil do Cenário	"O Caminho do Meio" - Esforços moderados de mitigação e estabilização de emissões.	"Desenvolvimento Fóssil" – Altas emissões contínuas, impulsionadas pela dependência em combustíveis fósseis.
Perdas projetadas	3,86 %	4,33 %
Projeção de Aquecimento	+2°C a 3°C acima da base pré-industrial.	+4°C a 5°C (Aquecimento severo).

Fig. 12. Análise da comparação entre os cenários propostos.

Fonte: Elaboração própria.

Entretanto, ao analisar o cenário SSP5-8.5, associado a elevadas emissões de gases de efeito estufa, forte dependência de combustíveis fósseis e menor adoção de políticas de mitigação climática, observa-se um impacto significativamente mais expressivo sobre o desempenho fotovoltaico. Nesse caso, as perdas projetadas podem atingir aproximadamente 4,33 % até 2050, evidenciando que cenários de maior aquecimento global tendem a intensificar os efeitos térmicos negativos sobre a eficiência dos módulos fotovoltaicos.

5 CONCLUSÕES

Este estudo permitiu analisar, de forma integrada, a evolução da capacidade instalada de geração fotovoltaica no estado de Mato Grosso e sua relação com o aumento da temperatura superficial projetado para as próximas décadas. Os resultados evidenciam um crescimento expressivo e contínuo da energia solar até 2050, consolidando essa fonte como elemento estratégico na matriz energética regional. Entretanto, verificou-se que o aumento da

temperatura, conforme cenários climáticos do CMIP6, tende a impactar negativamente o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, ainda que de forma gradual.

A aplicação do modelo ARIMA (0,1,1) mostrou-se adequada para a projeção da capacidade instalada, enquanto a incorporação de parâmetros térmicos permitiu estimar perdas de eficiência associadas ao aquecimento. Observou-se que, mesmo em condições atuais, os sistemas já operam acima da temperatura de referência, resultando em perdas mensuráveis que se intensificam ao longo do tempo. Dessa forma, conclui-se que, embora a expansão da energia fotovoltaica seja robusta, a consideração dos efeitos climáticos torna-se fundamental para o planejamento energético de longo prazo, reforçando a necessidade de estratégias de mitigação e adaptação no contexto da transição energética

6 REFERÊNCIAS

Nishioka K, Hatayama T, Uraoka Y, Fuyuki T, Hagihara R, Watanabe M. Field test analysis of PV system output characteristics focusing on module temperature. **Solar Energy Materials and Solar Cells** 2003;75:665–71.

Huang BJ, Lin TH, Hung WC, Sun FS. Performance evaluation of solar photovoltaic/ thermal systems. **Solar Energy** 2001;70(5):443–8

REBOITA, Michelle Simões; AMBRIZZI, Tércio; SILVEIRA, Vagner Anabor; ROCHA, Rosmeri Porfírio da. Avaliação da precipitação e simulação de temperatura próxima à superfície por modelos CMIP6 na América do Sul. **Pesquisa Ambiental: Clima**, v. 3, n. 2, p. 025011, 2024.

Matriz elétrica brasileira registra maior expansão da história em 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2025/janeiro/matriz-eletrica-brasileira-registra-maior-expansao-da-historia-em-2024>>.

Kaldellis J K, Kapsali M and Kavadias K A 2014 Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. **Experience obtained from outdoor measurements in Greece Renew. Energy** 66 612–24

HASANUZZAMAN, M. A. et al. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 776–789, 2016.

MATTEI, M.; NOTTON, G.; CRISTOFARI, C.; MUSELLI, M.; POGGI, P. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. **Renewable Energy**, v. 31, n. 4, p. 553–567, 2006.

GUERRA, Noemi et al. Operation and physics of photovoltaic solar cells: an overview. **I+ D Tecnológico**, v. 14, n. 2, p. 84-95, 2018.

FERON, Sarah; CORDERO, Raúl R.; LABBE, Fernando. Rural electrification efforts based on off-grid photovoltaic systems in the Andean Region: Comparative assessment of their sustainability. **Sustainability**, v. 9, n. 10, p. 1825, 2017.

TAKYI, G.; NYARKO, F. K. Investigation of the Effect of Temperature Coefficients on Mono-Crystalline Silicon PV Module Installed in Kumasi, Ghana. **Journal of Power and Energy Engineering**, v. 08, n. 09, p. 20, 21 set. 2020.

SERAT, Zainullah. Optimizing renewable energy systems for 100% clean energy target: A comparative study of solar, hydro, pumped hydro, and battery storage technologies. **Journal of Energy Storage**, v. 104, p. 114441, 2024.

LUDIN, Norasikin Ahmad et al. Sustainability and Life-Cycle Cost Analysis of Solar Photovoltaic-Generation Systems in ASEAN Countries. **Energy Sustainability and Climate Change in ASEAN**, p. 277-302, 2021.

Shoukat, A., Rizwan, M. R. & Khan, W. S. (2020). *Monocrystalline Silicon Solar Cells*. In **Materials for Solar Cell Technologies I** (pp. 148–175)

LIMA, Ariane A. et al. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, p. e20190191, 2019.

SANI, Muhammad; SULE, Abdulmumin. Effect of temperature on the performance of photovoltaic module. **International Journal of Innovative Science and Research Technology**, v. 5, n. 9, p. 670-676, 2020.

Aldo Vieira Da Rosa. (2005):”Fundamentals of renewable energy processes,” Elsevier Academic press:pp 85, 88, 95-96.

SANI, Muhammad; SULE, Abdulmumin. Effect of temperature on the performance of photovoltaic module. **International Journal of Innovative Science and Research Technology**, v. 5, n. 9, p. 670-676, 2020.

REBOITA, Michelle Simões et al. Avaliação da precipitação e simulação de temperatura próxima à superfície por modelos CMIP6 na América do Sul. **Pesquisa Ambiental: Clima**, v. 3, n. 2, p. 025011, 2024.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations*. **Solar Energy**, [S. l.], v. 83, n. 5, p. 614–624, 2009.

PEREIRA, Gabriela N. et al. Tecnologias de células fotovoltaicas utilizadas em módulos comerciais e suas principais características: uma revisão. **Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS**, 2024. DOI: 10.59627/cbens.2024.2379

A Comprehensive Overview of Photovoltaic Technologies and Their Efficiency for Climate Neutrality. **Sustainability**, MDPI, v. 15, 2024.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

LIMA, R. F.; et al. Climate Change Assessment in Brazil: Utilizing the Köppen-Geiger (1936) climate classification. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2024.

SILVA, L. S. L.; et al. Brazilian NSDI ten years later: current overview, new perspectives and challenges. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 2020.

SOUZA JR., C. M.; et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, 2735, 2020.

DOS SANTOS, L. O. F.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S.; et al. Trends in precipitation and air temperature extremes and their relationship with sea surface temperature in the Brazilian Midwest. **Atmosphere**, v. 14, n. 3, art. 426, 2023. DOI: 10.3390/atmos14030426.

SABINO, M.; et al. Reference evapotranspiration in climate change scenarios in Mato Grosso State, Brazil. *Water*, v. 11, n. 7, art. 91, 2024.

SORIA, Lucyla Silva; MENGUE, Vagner Paz; COMERLATO SCOTTÁ, Fernando. Análise geográfica da distribuição de temperatura da superfície, cobertura vegetal e sua relação com indicadores socioeconômicos – Cuiabá/MT. **Sociedade & Natureza, Uberlândia**, v. 36, e71486, 2024.

IBGE. **IBGE | Portal do IBGE | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: jan. 2026.

RAMOS, H. da C.; DALLACORT, R.; NEVES, S. M. A. da S.; DALCHIAVON, F. C.; SANTI, A.; VIEIRA, F. F. Precipitação e temperatura do ar para o Estado de Mato Grosso utilizando krigagem ordinária. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, p. 1–15, 2017.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C.; LJUNG, G. M. Time series analysis: forecasting and control. 5. ed. **Hoboken: John Wiley & Sons**, 2016.

AMARO, R. S. et al. Análise da demanda mensal de energia elétrica no estado do Rio Grande do Sul utilizando modelos Box-Jenkins. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 24, n. 3, p. 561–573, 2017.

SILVA, E. A.; SILVA, M. E. Aplicação de modelos ARIMA na análise de séries temporais: aspectos metodológicos. **Revista Brasileira de Saúde Materno Infantil**, Recife, v. 13, n. 2, p. 143–152, 2013.

DIAS, Cássia Gabriele; REBOITA, Michelle Simões. Assessment of CMIP6 simulations over tropical South America. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1282–1295, 2021.

REBOITA, M. S.; FERREIRA, G. W. S.; RIBEIRO, J. G. M.; ALI, S. Assessment of precipitation and near-surface temperature simulation by CMIP6 models in South America. *Environmental Research: Climate* , v. 3, n. 2, 025011, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ad3fdb>.

RUPP, D. E. ABATZOGLOU, J. T.; HEGEWISCH, K. C.; MOTE, P. W. Evaluation of CMIP5 20th century climate simulations for the Pacific Northwest USA. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , v. 118, n. 19, p. 10884-10906, 2013.