



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

*CAMPUS* LAGOA DO SINO

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

MARIANA FERNANDA DE OLIVEIRA

**SIMULAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS NO  
ANEL VIÁRIO QUE CONECTA A RODOVIA RAPOSO TAVARES À RODOVIA  
ENGENHEIRO LAURI SIMÕES DE BARROS, EM CAMPINA DO MONTE  
ALEGRE (SP)**

BURI-SP

2025



MARIANA FERNANDA DE OLIVEIRA

**SIMULAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS NO  
ANEL VIÁRIO QUE CONECTA A RODOVIA RAPOSO TAVARES À RODOVIA  
ENGENHEIRO LAURI SIMÕES DE BARROS, EM CAMPINA DO MONTE  
ALEGRE (SP)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Graduação em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Rafael de Oliveira Tiezzi.

Buri-SP

2025



Oliveira, Mariana Fernanda de

Simulação da implementação de usinas fotovoltaicas no  
anel viário que conecta a rodovia Raposo Tavares à  
rodovia Engenheiro Lauri Simões de Barros, em  
Campina do Monte Alegre (SP) / Mariana Fernanda de  
Oliveira -- 2025.  
38f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,  
campus Lagoa do Sino, Buri  
Orientador (a): Rafael de Oliveira Tiezzi  
Banca Examinadora: Jorge Luis Rodrigues Pantoja Filho,  
Vinicius Rainer Boniolo, Rafael de Oliveira Tiezzi  
Bibliografia

1. Energia solar . 2. Áreas subutilizadas. I. Oliveira,  
Mariana Fernanda de. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**Folha de Aprovação**

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da candidata Mariana Fernanda de Oliveira, realizada em 02/07/2025:

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RAFAEL DE OLIVEIRA TIEZZI  
Data: 11/07/2025 23:40:06-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Profº Drº Rafael de Oliveira Tiezzi- Orientador

Universidade Federal de São Carlos

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** JORGE LUIS RODRIGUES PANTOJA FILHO  
Data: 19/07/2025 10:59:07-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Profº Drº Jorge Luis Rodrigues Pantoja Filho

Universidade Federal de São Carlos

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** VINICIUS RAINER BONIOLO  
Data: 12/07/2025 06:17:29-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Profº Me. Vinicius Rainer Boniolo

Universidade Federal de São Carlos



**CCN**  
Centro de Ciências  
da Natureza **UFSCar**

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ser o meu sustento em todos os momentos desta caminhada. Pela força concedida nos dias difíceis, pela serenidade diante dos desafios e pela graça de chegar até aqui. À Nossa Senhora, agradeço por guiar os meus passos com ternura e proteção, acolhendo minhas preces e me confortando em momentos de incerteza.

Aos meus pais e minha irmã, que são exemplo de esforço e dedicação. Obrigada por estarem presentes em cada passo dessa caminhada, oferecendo apoio e acolhimento. Essa conquista também é de vocês.

Ao meu noivo, que estive ao meu lado com paciência, incentivo e amor durante todo esse processo. Por acreditar em mim quando eu mesma duvidei, por me dar forças nos dias cansativos e por celebrar comigo cada pequena vitória. Você foi essencial nesse processo.

Aos meus amigos, que dividiram comigo sorrisos, cansaços, desabafos e aprendizados. Obrigada pela amizade, pela parceria e por tornarem tudo mais leve e acolhedor.

Ao meu orientador, agradeço pela paciência e valiosa orientação durante o desenvolvimento deste trabalho. Seu conhecimento e incentivo foi fundamental para o aprimoramento desta pesquisa e para o meu crescimento acadêmico.



## RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica no anel viário que conecta a Rodovia Raposo Tavares à Rodovia Engenheiro Lauri Simões de Barros, localizado no município de Campina do Monte Alegre (SP). A análise foi conduzida por meio de simulações no software *System Advisor Model* (SAM), desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), ferramenta amplamente utilizada para modelagem técnica e energética de sistemas fotovoltaicos. A proposta baseia-se no aproveitamento de áreas subutilizadas ao longo do anel viário, caracterizadas por já estarem terraplanadas, gramadas e desprovidas de uso produtivo ou habitacional. Tais características conferem a essas áreas condições favoráveis para a instalação de sistemas fotovoltaicos montados ao solo, com baixo impacto ambiental e reduzida necessidade de intervenções estruturais. A simulação considerou um sistema composto por módulos fotovoltaicos fixos, orientados para o norte, com baixo a médio aproveitamento da área total disponível. Os resultados indicaram uma geração anual estimada de 403.075 kWh, energia suficiente para abastecer aproximadamente 222 unidades residenciais, tomando como base o consumo médio residencial nacional. Os dados obtidos evidenciam que o uso de anéis viários para a implantação de usinas fotovoltaicas representa uma alternativa viável e estratégica para a diversificação da matriz energética brasileira. Além de contribuir para o avanço das fontes renováveis de energia, essa abordagem permite o uso e ocupação eficiente do solo urbano, muitas vezes ocioso, sem comprometer áreas agrícolas ou ambientalmente sensíveis. Adicionalmente, o estudo se caracteriza como um dos pioneiros no contexto brasileiro, uma vez que não há registros consolidados na literatura nacional que tratam da implementação de sistemas fotovoltaicos em anéis viários. Nesse sentido, o trabalho serve como ponto de partida para futuras pesquisas, que poderão aprofundar aspectos técnicos, econômicos, ambientais e regulatórios da proposta. A replicabilidade da metodologia em outras regiões com infraestrutura semelhante reforça seu potencial de aplicação em escala, contribuindo para a consolidação de um sistema energético mais limpo, resiliente e descentralizado no Brasil, em consonância com os princípios da sustentabilidade e da transição energética.

**Palavras-chave: energia renovável; economia circular; áreas subaproveitadas.**



## ABSTRACT

The aim of this study was to assess the potential for generating photovoltaic solar energy on the ring road that connects the Raposo Tavares highway to the Engenheiro Lauri Simões de Barros highway, located in the municipality of Campina do Monte Alegre (SP). The analysis was conducted using simulations in the System Advisor Model (SAM) software, developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL), a tool widely used for technical and energy modeling of photovoltaic systems. The proposal is based on taking advantage of underused areas along the ring road, characterized by being already terraced, grassed and devoid of productive or residential use. These characteristics give these areas favorable conditions for the installation of ground-mounted photovoltaic systems, with low environmental impact and reduced need for structural interventions. The simulation considered a system made up of fixed photovoltaic modules, oriented to the north, with low to medium use of the total area available. The results indicated an estimated annual generation of 403,075 kWh, enough energy to supply approximately 222 residential units, based on average national residential consumption. The data obtained shows that the use of ring roads to install photovoltaic plants represents a viable and strategic alternative for diversifying the Brazilian energy matrix. As well as contributing to the advancement of renewable energy sources, this approach allows for the efficient use and occupation of urban land, which is often idle, without compromising agricultural or environmentally sensitive areas. In addition, the study is a pioneer in the Brazilian context, since there are no consolidated records in the national literature dealing with the implementation of photovoltaic systems on ring roads. In this sense, the work serves as a starting point for future research, which could delve into the technical, economic, environmental and regulatory aspects of the proposal. The replicability of the methodology in other regions with similar infrastructure reinforces its potential for large-scale application, contributing to the consolidation of a cleaner, more resilient and decentralized energy system in Brazil, in line with the principles of sustainability and the energy transition.

**Keywords: renewable energy; circular economy; underutilized areas.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diferença das células de silício monocristalino e policristalino.....	13
Figura 2- Diagrama Base de um Sistema Solar Fotovoltaico.....	14
Figura 3- Histórico de Uso de Energia Solar no Brasil.....	15
Figura 4- Rodovia Jinan-Hefei e as placas fotovoltaicas na China.....	16
Figura 5 - Estudo de telhado fotovoltaico em área de descanso.....	17
Figura 6- Placas de energia solar fotovoltaicas em estudo nas rodovias da Alemanha.....	18
Figura 7- Foto aérea de usinas fotovoltaicas próximas a uma linha rodoviária.....	19
Figura 8- Painéis Solares em Teste para o Projeto Solar Roadways.....	20
Figura 9 - Localização da área de estudo para a simulação.....	21
Figura 10 - Delimitação da área para a simulação do dimensionamento da usina.....	22
Figura 11- Localização dos módulos fotovoltaicos na área 1.....	23
Figura 12- Localização dos módulos fotovoltaicos na Área 2.....	24
Figura 13 -Temperatura local.....	25
Figura 14- Irradiação e relação D/G local.....	26
Figura 15- Direção e velocidade dos ventos locais.....	27
Figura 16- Geração de energia ao longo dos meses.....	28
Figura 17- Geração horária ao longo do ano.....	29
Figura 18- Análise de perdas energéticas.....	30
Figura 19- Localização do anel viário em Itu (SP).....	33



**CCN**  
Centro de Ciências  
da Natureza **UFSCar**

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>10</b>
2.1. CRISE ENERGÉTICA GLOBAL E USO DE FONTES FÓSSEIS.....	10
2.2. ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS E O POTENCIAL DA ENERGIA SOLAR.....	11
2.3. TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA.....	12
2.3.1. Principais componentes do sistema fotovoltaico.....	12
2.4. PANORAMA GLOBAL E NACIONAL DE ENERGIA SOLAR.....	14
2.5. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM RODOVIAS INTERNACIONAIS.....	15
2.5.1. Iniciativas e Estudos na China.....	15
2.5.2. Iniciativas e Estudos na Alemanha.....	16
2.5.3. Iniciativas e Estudos em Outros Países.....	19
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>20</b>
3.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	20
3.2. METODOLOGIA.....	22
3.3. PRINCIPAIS DADOS DE ENTRADA PARA A SIMULAÇÃO.....	24
3.4. PARÂMETROS CLIMÁTICOS LOCAIS.....	25
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>27</b>
4.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA ÁREA 1.....	27
4.2. DISCUSSÕES SOBRE A ÁREA 1.....	30
4.3. RESULTADOS DA EXTRAPOLAÇÃO PARA A ÁREA 2.....	32
4.4. EXTRAPOLAÇÃO DOS RESULTADOS.....	32
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>36</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional tem provocado um aumento significativo da demanda por energia, o que acarreta em uma maior dependência da matriz energética baseada em combustíveis fósseis. Essa dependência, além de esgotar recursos não renováveis, contribui de forma significativa para a intensificação do efeito estufa, provocando alterações no clima em escala global.

De acordo com o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas de 2014, já era alertado que as mudanças climáticas são uma realidade crescente, alimentada principalmente pelas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), resultantes, em grande parte, da queima de combustíveis fósseis (Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas, 2014). O Sexto Relatório, publicado em 2022, reforça esse alerta ao evidenciar que o aquecimento global já ultrapassou 1,1 °C em relação aos níveis pré-industriais e que, sem reduções drásticas e imediatas nas emissões, o limite de 1,5°C será ultrapassado nas próximas décadas, trazendo consequências cada vez mais intensas e irreversíveis para o clima, os ecossistemas e a vida humana (Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas, 2022).

Diante desse cenário, as fontes de energia limpa e renovável têm ganhado destaque como alternativas viáveis e sustentáveis. Além de contribuírem para o suprimento da crescente demanda energética global, essas fontes apresentam baixa agressividade ambiental, favorecendo a preservação dos ecossistemas e a melhoria da qualidade de vida. O crescimento da participação das energias renováveis na matriz energética mundial, decorre, sobretudo, de sua crescente competitividade em relação às fontes convencionais, da volatilidade, dos preços dos combustíveis fósseis, da busca por maior segurança energética e do incentivo de políticas públicas voltadas à transição energética.

Dentre as fontes de energia renovável, a tecnologia solar fotovoltaica tem se destacado como uma das mais promissoras, apresentando o maior crescimento em capacidade instalada no mundo na última década (Nobre; Marengo, 2017). Esse avanço está diretamente relacionado aos compromissos internacionais assumidos por diversos países para mitigar as emissões de gases do efeito estufa, o que impulsionou políticas de incentivo e investimentos no setor. Como resultado, observou-se uma significativa redução nos custos dos módulos fotovoltaicos - fator determinante para a expansão da energia solar - associada ao

desenvolvimento tecnológico e aos ganhos de escala proporcionados pelo aumento da demanda global.

O Brasil se destaca por reunir condições naturais particularmente promissoras para essa fonte de energia renovável. Apesar da sua vasta extensão territorial e das diversidades climáticas regionais, o país dispõe de altos níveis de irradiação solar ao longo de praticamente todo o seu território, o que favorece de modo significativo o aproveitamento desse tipo de tecnologia. Esse potencial reforça a viabilidade técnica do uso de energia solar como alternativa estratégica para diversificar a matriz elétrica brasileira.

Uma das principais limitações associadas à geração de energia solar fotovoltaica é a necessidade de grandes áreas para a instalação dos sistemas, o que pode comprometer o uso do solo para atividades como agricultura ou desenvolvimento urbano. Diante disso, este trabalho propõe a simulação da implementação de usinas fotovoltaicas em anéis viários de rodovias, que seriam áreas subutilizadas, caracterizadas por já estarem terraplanadas, gramadas e desprovidas de uso produtivo ou habitacional.

A proposta se baseia na simulação do dimensionamento fotovoltaico no anel viário que conecta a Rodovia Raposo Tavares à Rodovia Engenheiro Lauri Simões de Barros, no município de Campina do Monte Alegre, estado de São Paulo, por meio do software *System Advisor Model* (SAM), desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). A partir dessa simulação, buscou-se não apenas estimar a capacidade instalada e o desempenho do sistema nesse local, mas também extrapolar os resultados obtidos para o anel viário no município de Itu, estado de São Paulo, que conecta a Rodovia Castello Branco à Rodovia Santos Dumont, permitindo uma análise do potencial energético em estruturas de maior porte. Além disso, a pesquisa visa compreender a viabilidade da utilização dessa proposta como solução complementar para a expansão da matriz energética renovável brasileira por meio do aproveitamento de áreas subutilizadas.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. CRISE ENERGÉTICA GLOBAL E USO DE FONTES FÓSSEIS**

As questões energéticas estão se tornando cada vez mais centrais no contexto político e econômico mundial, especialmente no que diz respeito à qualidade de vida das pessoas e à sustentabilidade do planeta, pois, assim como o ar e a água, a energia também se faz essencial à vida humana (Franco, 2013). Nas sociedades primitivas, a energia era quase gratuita, obtida

principalmente da lenha das florestas para aquecimento e atividades domésticas, como cozinhar. Com o aumento gradual do consumo de energia, novas fontes tornaram-se necessárias. Durante a Idade Média, as energias hidráulica e eólica começaram a ser utilizadas, mas em quantidades insuficientes para atender às necessidades das populações urbanas em crescimento. Já após a Revolução Industrial, a demanda por carvão, petróleo e gás aumentou significativamente, apesar dos elevados custos de produção e transporte até os centros consumidores (Goldember; Lucon, 2007).

De acordo com Diniz (2017), os combustíveis fósseis, que constituem a principal fonte de energia na atualidade mundial, estão sendo consumidos de maneira acelerada, sendo 85,9% do consumo mundial de fontes não renováveis (petróleo, carvão, gás natural e nuclear), em comparação com 14,1% provenientes de fontes renováveis (biocombustíveis, biomassa, hidrelétrica, geotérmica, solar, eólica, térmica, entre outras). Ademais, os combustíveis fósseis são uma das principais causas do aquecimento global. Diante do aumento contínuo da demanda por energia, das preocupações ambientais e da busca por maior eficiência energética, torna-se essencial explorar novas fontes de energia (Silva; Araújo, 2022).

## 2.2. ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS E O POTENCIAL DA ENERGIA SOLAR

Por mais que ainda seja possível encontrar novas fontes de energia não renováveis, como os campos de petróleo, estas possuem alto custo, além de serem obtidas em águas profundas e de não corresponderem às necessidades de todo o crescimento populacional e econômico. Contudo, observa-se que a energia solar possui alto potencial, em perspectivas de pesquisas e de mercado, para ser a principal substituta dos combustíveis fósseis pois, além de não ser poluente e ser uma fonte de energia renovável, é compacta e possui baixo custo de manutenção (Silva; Araújo, 2022).

A energia solar é abundante e pode ser aproveitada de diversas maneiras, como através de soluções arquitetônicas que maximizam a iluminação natural e o controle térmico, mas também, há a possibilidade de se utilizar sistemas de captação de energia solar para sua utilização posterior. Basicamente, a energia solar consiste no aproveitamento da luz e da energia emitida diariamente pelo sol para diversas atividades. Nesse processo, a energia é captada e, posteriormente, utilizada para aquecer água ou gerar eletricidade, recursos que utilizamos amplamente todos os dias. Ela é captada por meio de células fotovoltaicas, que convertem a energia solar diretamente em eletricidade (Scherer *et al.*, 2015).

### 2.3. TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

Segundo Scherer *et al.* (2015), o efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel, conhecido por descobrir o paramagnetismo do oxigênio líquido. Durante suas experiências eletroquímicas, Becquerel notou que a exposição à luz em eletrodos de platina ou prata gerava o efeito fotovoltaico, levando a criação da primeira célula fotovoltaica. Willoughby Smith, em 1873, também descobriu o efeito fotovoltaico no selênio de forma acidental.

Inicialmente, o alto custo de fabricação das células fotovoltaicas limitava seu uso prático a aplicações especiais, como sistemas autônomos de fornecimento de energia elétrica para satélites, onde o custo não era um fator limitante (Kimura, 2021). As células fotovoltaicas eram a opção mais conveniente e segura para gerar eletricidade no espaço devido à sua confiabilidade e baixo peso. Com o tempo, novas aplicações surgiram, como em estações remotas de telecomunicações. A crescente demanda por fontes alternativas de energia, especialmente após a crise do petróleo de 1973 e a possibilidade do esgotamento das reservas petrolíferas, impulsionou novas pesquisas sobre essa tecnologia (Kimura, 2021).

Um sistema fotovoltaico opera sem gerar ruído, evitando a poluição sonora e sem impactar negativamente o meio ambiente. Esses sistemas requerem mínima manutenção e seus painéis têm uma vida útil de aproximadamente 25 anos, necessitando apenas de limpezas anuais, o que resulta em um excelente custo-benefício (Lana *et al.*, 2020).

Já Gomes (2012), afirma que os métodos de armazenamento de energia solar são menos eficientes em comparação com os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), a energia hidrelétrica e a biomassa (como bagaço de cana e laranja). Adicionalmente, a produção de energia solar em larga escala exige uma área extensa, resultando em uma significativa perda de terreno que não poderá ser utilizado para plantio ou construção de outras estruturas.

#### **2.3.1. Principais componentes do sistema fotovoltaico**

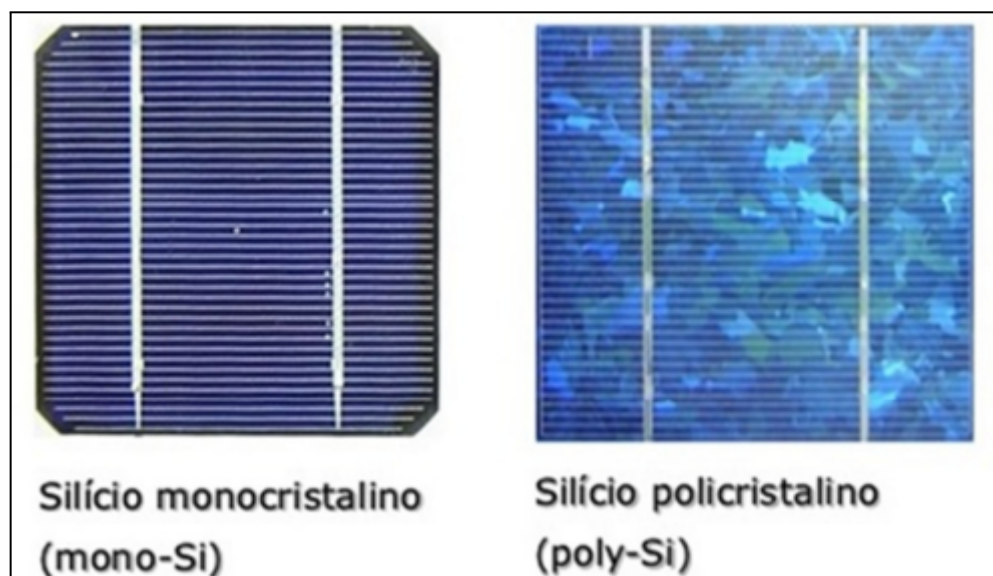
Um sistema fotovoltaico conectado à rede possui diversos elementos, como módulos fotovoltaicos (painéis solares), inversores, conversores, controlador de carga, cabos, conectores e dispositivos de medição (Villalva, 2010). No entanto, para os objetivos específicos deste estudo, os componentes mais relevantes a serem considerados são os painéis

solares e os inversores, uma vez que são os principais responsáveis pela captação da energia solar e a sua conversão em eletricidade utilizável.

Os painéis solares fotovoltaicos, também conhecidos como módulos fotovoltaicos ou placas solares, são os dispositivos responsáveis pela conversão direta da radiação solar em energia elétrica, por meio do chamado efeito fotovoltaico. Esses painéis são compostos por células fotovoltaicas, geralmente fabricadas com materiais semicondutores, como o silício, que possuem capacidade de absorver os fótons da luz solar e, com isso, liberar elétrons, originando uma corrente elétrica contínua. As células são organizadas em módulos fotovoltaicos, que podem ser interligados em série e/ou em paralelo, a fim de atender os requisitos específicos de tensão e corrente do sistema. A energia gerada pode ser utilizada para alimentar cargas elétricas localmente ou ser injetada na rede elétrica por meio de um sistema de inversores (Barcellos, 2023).

Os módulos fotovoltaicos de silício monocristalino são produzidos a partir de um único cristal de silício, dopado com Boro (tipo “p”) e, posteriormente, exposto a vapor de Fósforo (tipo “n”) em altas temperaturas, o que assegura alta eficiência e confiabilidade. Já os módulos de silício policristalino, embora fabricados com o mesmo material, apresentam menor eficiência devido à sua estrutura composta por múltiplos cristais, o que aumenta a presença de defeitos e reduz o desempenho do sistema. A Figura 1, representa a diferença das células de silício monocristalino e policristalino.

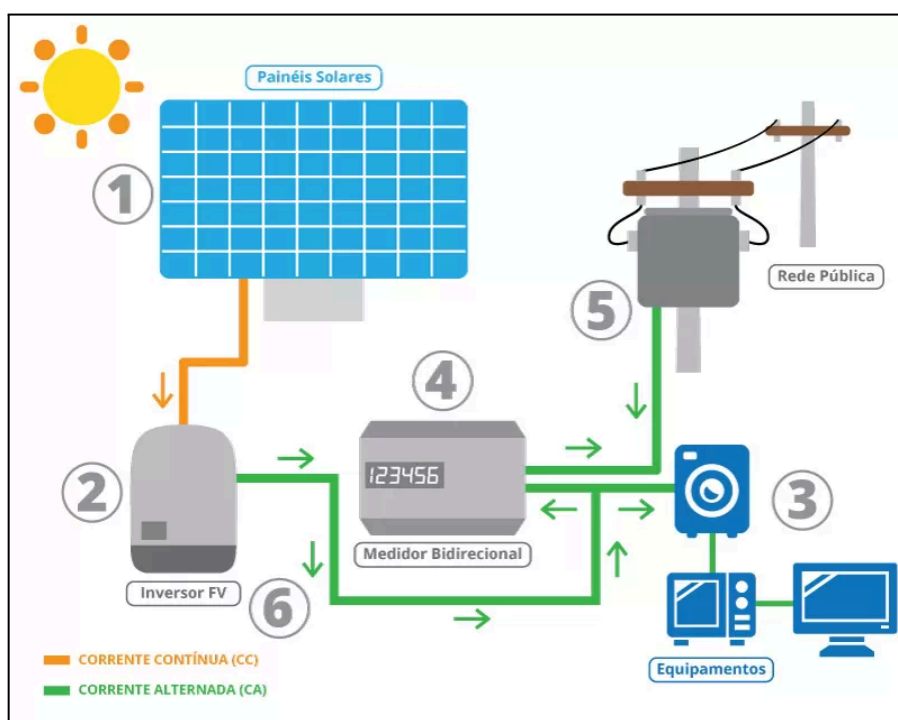
**Figura 1-** Diferença das células de silício monocristalino e policristalino.



Fonte- Almeida *et al.* (2015).

O inversor é o componente que está presente em todos os tipos de sistema, além do painel solar. Ele realiza a conversão de corrente contínua gerada pelo painel solar para corrente alternada, para que haja a conexão com a rede elétrica. Esse componente precisa ser definido de modo que evite perdas, dissipe menos potência e esteja em sincronia com a rede (Barcellos, 2023). A Figura 2 apresenta, de modo resumido, um diagrama base de um sistema solar fotovoltaico, com alguns de seus principais componentes.

**Figura 2-** Diagrama Base de um Sistema Solar Fotovoltaico.



Fonte- Armazém do Sol (2025).

#### 2.4. PANORAMA GLOBAL E NACIONAL DE ENERGIA SOLAR

A *European Photovoltaic Industry Association* (EPIA) projeta que, se o mercado continuar a crescer a uma taxa superior a 30% ao ano e, os custos diminuirão proporcionalmente, cerca de 26% da eletricidade mundial será de origem fotovoltaica em 2040. Segundo o Conselho Mundial da Energia, em 2100, 70% da energia consumida será proveniente do sol (Scherer *et al.*, 2015).

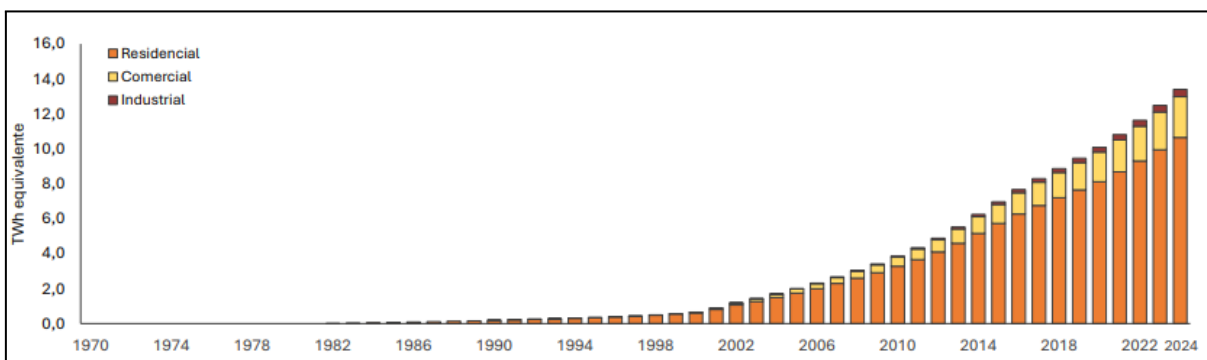
O Brasil possui uma matriz energética diversificada, com significativas reservas de fontes não renováveis (petróleo, gás natural, carvão, urânio, etc.) e variadas fontes renováveis, destacando-se o vasto potencial hidrelétrico, eólico, solar e de biomassa para a geração de energia elétrica. Apesar das diferentes características climáticas do país, a média anual de

irradiação global é bastante uniforme, com valores relativamente altos em todo o território. Um estudo feito em 2012 apresentou que a menor radiação solar global no Brasil ocorre em Santa Catarina (4,25 kWh/m<sup>2</sup>), ainda assim, cerca de quatro vezes superior à da Alemanha, líder mundial no aproveitamento de energia solar no ano em estudo (Kemerich *et al.*, 2016). Sabendo-se disso, Kimura (2021) afirma que devido à sua significativa capacidade de geração desse tipo de energia, o país está se aproximando cada vez mais perto de atingir seu máximo potencial para se tornar uma potência no mercado de energia fotovoltaica.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2024, que tem como base o ano de 2023, a geração de energia solar fotovoltaica cresceu cerca de 68,1% em relação ao ano de 2022, sendo a maior mudança apresentada na matriz energética brasileira. Além disso, tal fonte de energia também foi destaque no que diz respeito à capacidade instalada e micro e minigeração distribuída, indicando uma trajetória de crescimento em ritmo superior às outras fontes (Balanço Energético Nacional, 2024).

Essa tendência se manteve no ano seguinte: o BEN de 2025, que tem como base o ano de 2024, apontou um crescimento de geração solar fotovoltaica de 39,6%, além de um aumento de 28,1% na capacidade instalada, reforçando o papel crescente da fonte solar na matriz elétrica nacional, conforme é visualizado na Figura 3. (Balanço Energético Nacional, 2025).

**Figura 3-** Histórico de Uso de Energia Solar no Brasil.



Fonte- Balanço Energético Nacional (2025).

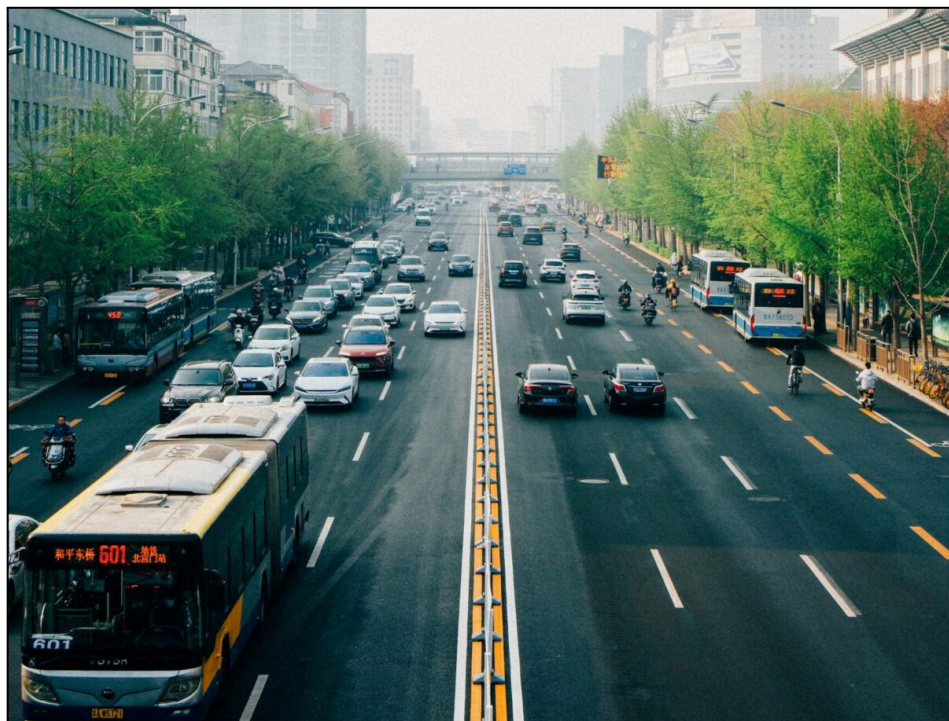
## 2.5. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM RODOVIAS INTERNACIONAIS

### 2.5.1. Iniciativas e Estudos na China

A rodovia Jinan-Hefei (G35), na China, foi projetada com o objetivo de operar com emissões líquidas zero de carbono, incorporando diversas soluções energéticas sustentáveis,

com destaque para o uso de sistemas fotovoltaicos integrados à infraestrutura viária. Foram instalados painéis solares em áreas de serviço, praças de pedágio, rampas de acesso e estruturas de estacionamento cobertas, como garagens fotovoltaicas, totalizando uma capacidade instalada de 30 MW. Estima-se que a geração anual será de aproximadamente 33 GWh, contribuindo diretamente para o suprimento energético de instalações operacionais e, até mesmo, para a recarga de veículos elétricos (Shaw, 2024). Na Figura 4, apresenta-se a rodovia citada acima, juntamente com a localização das placas fotovoltaicas.

**Figura 4-** Rodovia Jinan-Hefei e as placas fotovoltaicas na China.



Fonte- Ralph Diermann (2024).

### 2.5.2. Iniciativas e Estudos na Alemanha

Na Alemanha, foi implantado um telhado fotovoltaico sobre uma área de descanso como projeto-piloto de uma pesquisa colaborativa entre Alemanha, Áustria e Suíça. A iniciativa visa explorar a viabilidade da instalação de coberturas solares em rodovias, especialmente em locais estratégicos como túneis e áreas de parada. Embora o projeto exija o cumprimento de rigorosos requisitos de segurança para o tráfego, ele tem sido avaliado como promissor, apresentando diversas vantagens e sendo considerado relevante para o alcance da

neutralidade climática (Enkhardt, 2023). A Figura 5 apresenta o modelo de implantação do telhado fotovoltaico em rodovias.

**Figura 5** - Estudo de telhado fotovoltaico em área de descanso.



**Fonte** - Sandra Enkhardt (2023).

Em complemento, outro estudo realizado na Alemanha, analisou o potencial de geração de energia solar ao longo da extensão das rodovias do país. A pesquisa estimou que os aproximadamente 50.000 km de vias podem suportar entre 24 GW e 48 GW da capacidade instalada em usinas fotovoltaicas, com potencial adicional em estruturas como barreiras acústicas, áreas de estacionamento, barreiras verticais e edifícios situados em áreas de descanso (Diermann, 2024).

A Figura 6 apresenta o modelo de usina fotovoltaica analisado, com painéis instalados ao longo de toda a extensão do canteiro central, entre faixas de rolamento da rodovia.

**Figura 6-** Placas de energia solar fotovoltaicas em estudo nas rodovias da Alemanha.



**Fonte-** Ralph Diermann (2024).

Ademais, dentre os exemplos analisados na literatura internacional, o estudo conduzido por Mittelstadt *et al.* (2024) representa o que mais se assemelha ao objetivo deste trabalho, investigando a viabilidade da instalação de sistemas fotovoltaicos montados no solo ao longo de rotas de transporte na Alemanha, abrangendo estradas federais, rodovias e linhas ferroviárias. O estudo fornece evidências concretas sobre a viabilidade técnica, territorial e política desse tipo de implantação de usinas fotovoltaicas, reforçando que áreas marginais como acostamentos, faixas de domínio e bordas de infraestrutura viária podem ser aproveitadas de forma eficiente e energética para geração de energia solar. Na Figura 7 é possível observar um exemplo de usina próximo a áreas de rodovias, apresentado pelo estudo.

**Figura 7-** Foto aérea de usinas fotovoltaicas próximas a uma linha rodoviária.



Fonte- Mittelstadt *et al.* (2024).

### 2.5.3. Iniciativas e Estudos em Outros Países

Há também outros países que têm investido em soluções inovadoras para integrar a sustentabilidade à infraestrutura viária. Estados Unidos, França e Holanda, estão investindo em tecnologias de substituição ou sobreposição do asfalto por painéis fotovoltaicos, capazes de converter a radiação solar em eletricidade.

Nos Estados Unidos, o projeto *Solar Roadways* está em fase de testes. Os primeiros painéis foram instalados em uma área de descanso na cidade de Conway, cobrindo uma área de aproximadamente 22 metros quadrados. A energia gerada é suficiente para abastecer toda a estrutura local. Além disso, os painéis são equipados com lâmpadas de LED para sinalização viária e sistemas de aquecimento, que impedem o acúmulo de gelo em regiões frias. Os módulos são protegidos por um vidro rugoso, altamente resistente e com capacidade de suportar o peso de veículos pesados sem comprometer a segurança dos motoristas. A Figura 8 apresenta o modelo dos painéis em teste (Portal Solar, s.d.).

**Figura 8-** Painéis Solares em Teste para o Projeto *Solar Roadways*.



**Fonte-** Portal Solar (s.d.).

Na França, os esforços se concentram em estudos do recapeamento de rodovias existentes com painéis solares ultrafinos denominados *Wattway*, com apenas 7 mm de espessura. Essa tecnologia garante a resistência do tráfego intenso e níveis de aderência semelhantes aos do pavimento convencional. Segundo estimativas, cada quatro metros de estrada equipada pode fornecer energia suficiente para atender a uma residência média no país. O plano prevê a implementação de até 1.000 km de estradas solares (Portal Solar, s.d.).

A Holanda também tem explorado soluções por meio da empresa *SolaRoads*, que iniciou a aplicação de painéis solares em ciclovias na cidade de Amsterdã, como etapa experimental para posterior adaptação em rodovias (Portal Solar, s.d.).

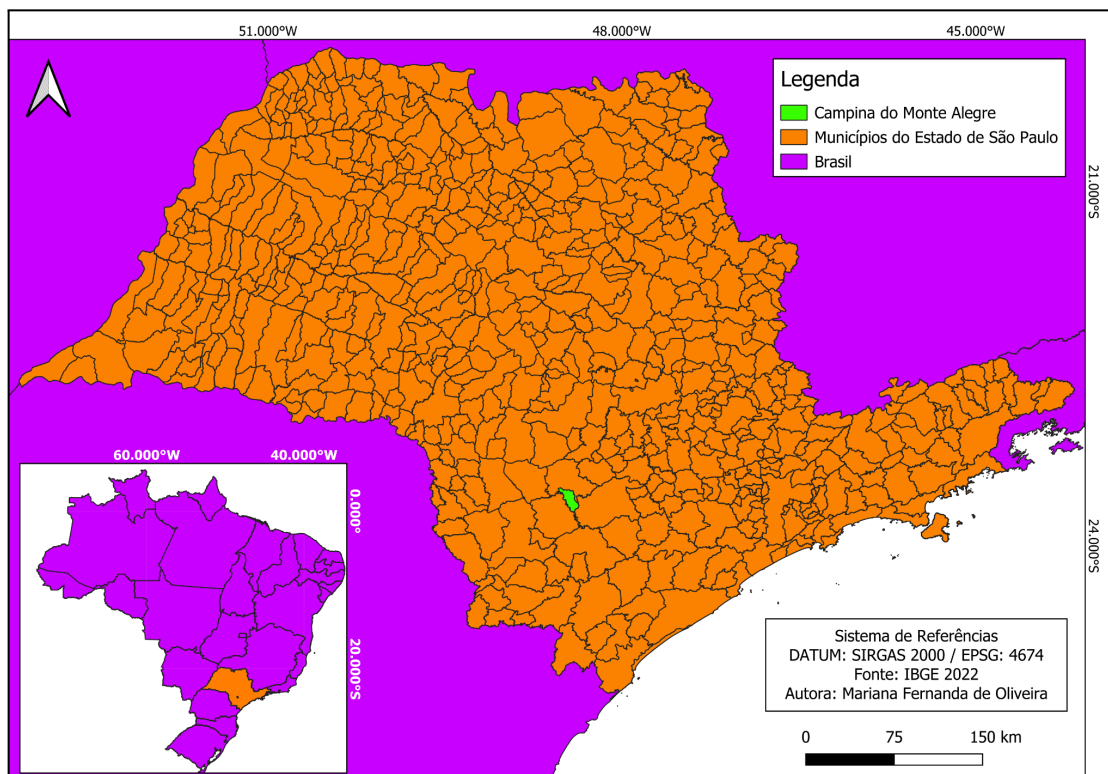
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo para a simulação (Figura 10) refere-se a um trevo viário, localizado no município de Campina do Monte Alegre, no estado de São Paulo. Possui coordenadas de latitude 23°32'00''S, longitude 48°26'01''W e altitude de 700 metros. O anel em estudo caracteriza-se pela sua conexão entre duas rodovias, sendo elas a Rodovia Raposo Tavares

(SP-270), da qual liga São Paulo à divisa com o Mato Grosso do Sul, possuindo 654 km de extensão e Rodovia Engenheiro Lauri Simões de Barros (SP-189) que é uma rodovia transversal do estado de São Paulo, atendendo os municípios de Salto, Campina do Monte Alegre, Aracaçu e Buri, possuindo cerca de 44,2 km de extensão. A Figura 9 apresenta a localização do município do trevo em estudo.

**Figura 9** - Localização da área de estudo para a simulação.



**Fonte** - Própria Autoria (2025).

A escolha do trevo localizado na entrada da estrada de Campina do Monte Alegre como área referência para a simulação foi devido a sua disponibilidade de espaço livre sem utilização, o que facilita para a instalação dos módulos fotovoltaicos, além de que, como visualizado na Figura 10, a área possui facilidade de acesso, devido a sua proximidade com rodovias e com a rede de distribuição de energia. Outro fator importante, foi a proximidade do local com o campus Lagoa do Sino da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), isso permite que o projeto simulado esteja alinhado com a realidade local, incluindo possíveis visitas e análise crítica do estudo.

Apesar de existirem áreas mais amplas disponíveis nas proximidades, a seleção para a simulação considerou fatores como declividade do terreno, segurança viária e viabilidade

logística de acesso e manutenção. Dessa forma, a rotatória foi desconsiderada como área potencialmente útil devido à sua declividade estar no mesmo nível da rodovia, o que representa um fator de risco para a ocorrência de acidentes. Por esses motivos, optou-se por delimitar apenas as áreas destacadas em amarelo na Figura 10, que totalizam uma área de simulação de 4.339,56 m<sup>2</sup>.

**Figura 10** - Delimitação da área para a simulação do dimensionamento da usina.



Fonte - Google Earth (2025).

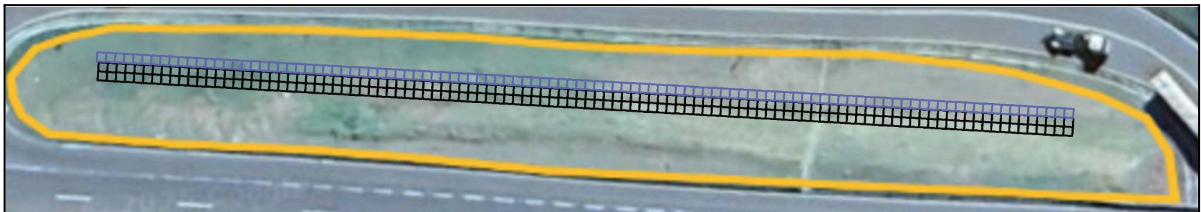
### 3.2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho consiste na simulação do desempenho de um sistema fotovoltaico aplicado ao anel viário que conecta a Rodovia Raposo Tavares à Rodovia Engenheiro Lauri Simões de Barros, no município de Campina do Monte Alegre (SP). Para isso, utilizou-se o software *System Advisor Model* (SAM), uma ferramenta gratuita, desenvolvida pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) desenvolvida para análise técnico-econômica de tecnologias energéticas. Com ele, pode-se realizar modelagem de diferentes tipos de sistemas de geração renovável, incluindo a tecnologia fotovoltaica, que será o foco deste estudo.

Inicialmente, foi realizada a simulação da usina na área destacada localizada na porção superior da imagem, que totaliza uma área de 2.464,77 m<sup>2</sup> e possui comprimento aproximado

de 143 metros. Para o desenvolvimento do sistema, foram utilizados módulos fotovoltaicos com dimensões de 2,30 metros de altura por 1,15 metros de largura. Nessa área, optou-se pela instalação de 100 módulos duplos conectados em série, configurando ao fim em duas fileiras de 100 módulos, conforme observado na Figura 11.

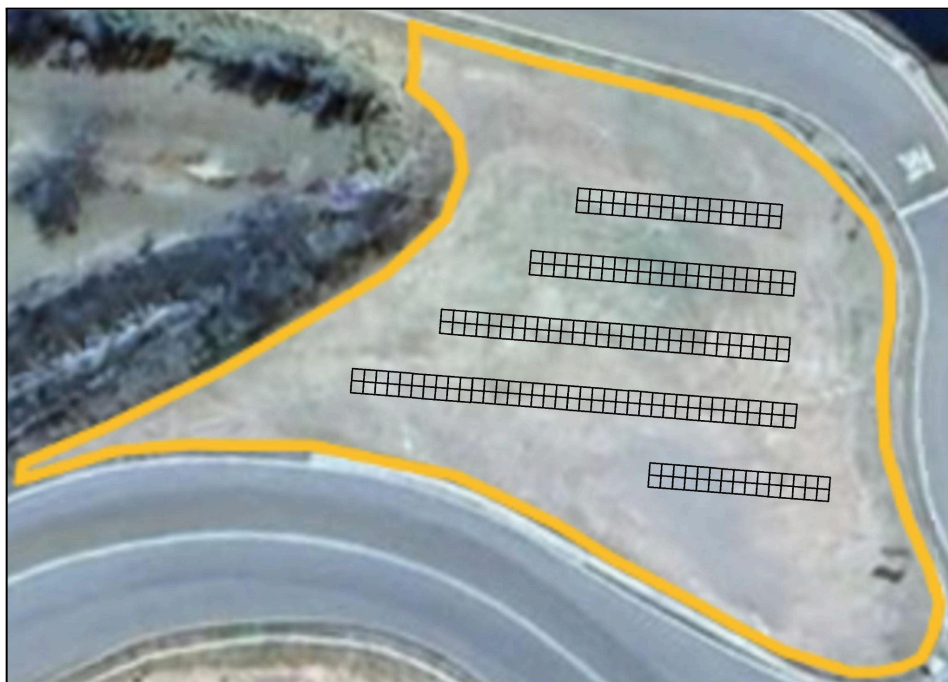
**Figura 11-** Localização dos módulos fotovoltaicos na área 1.



**Fonte** - Própria autoria (2025).

A área 2 conta com aproximadamente 120 módulos duplos, de mesma dimensão que os utilizados para a outra área, organizados em 5 grupos compostos por duas fileiras cada, totalizando em 240 módulos distribuídos em uma área de 1.874,49 m<sup>2</sup>. Para essa área, os dados da simulação realizada na Área 1 serão extrapolados, com um acréscimo de 20% nos resultados, visto que a quantidade de módulos é 20% superior. Considerou-se ainda, que ambas as áreas estão localizadas próximas uma da outra e, devido ao espaçamento ser superior a 4 metros entre as fileiras, conforme visualizado na Figura 12, a interferência de sombreamento será mínima, razão pela qual essa influência foi desconsiderada.

**Figura 12-** Localização dos módulos fotovoltaicos na Área 2.



**Fonte** - Própria autoria (2025).

### 3.3. PRINCIPAIS DADOS DE ENTRADA PARA A SIMULAÇÃO

Para a simulação, foi selecionado o módulo fotovoltaico JA Solar JAM75D30-545/MB, fabricado com silício monocristalino e tecnologia bifacial, amplamente utilizado no mercado comercial brasileiro por sua elevada eficiência. Embora existam outros modelos comumente empregados em aplicações residenciais ou de menor escala, este módulo é o mais indicado para projetos estruturados, de médio a grande porte, por aliar desempenho elevado à confiabilidade técnica. Visando atender aos limites técnicos do sistema, especialmente a tensão máxima de entrada do inversor (1100 V), optou-se por organizar os módulos em strings de 20 unidades conectadas em série.

O sistema total é composto por 100 módulos duplos dispostos em duas linhas (superior e inferior), totalizando 200 módulos, distribuídos em 10 geradores independentes. Com essa configuração, a tensão por *string* se mantém em torno de 900 V, representando aproximadamente 80% da capacidade máxima do inversor, o que garante uma margem de segurança adequada para compensar variações de temperatura que possam elevar a tensão dos módulos em condições reais de operação.

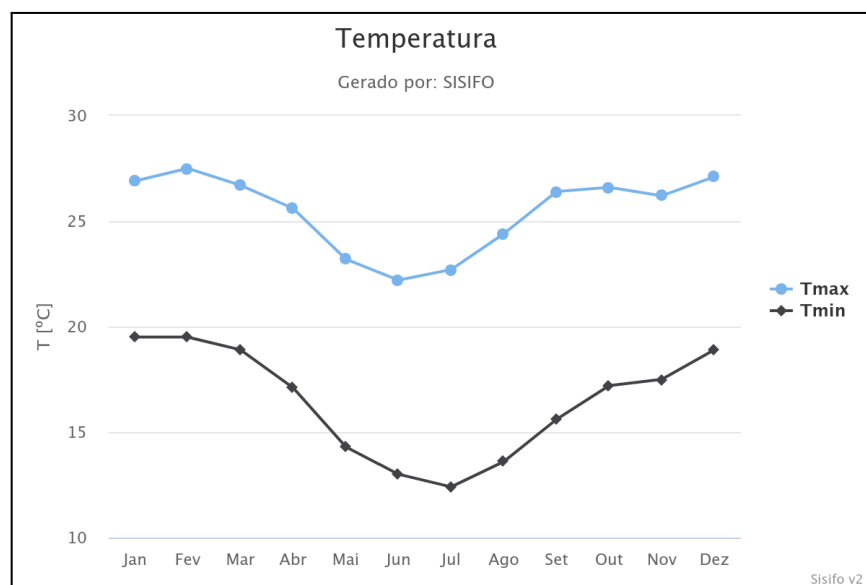
Além da tensão, também foi observado o limite de corrente do inversor escolhido - o Inversor Solar Fotovoltaico Trifásico PHB de 85 kW, que suporta até 20 A de corrente de entrada. A distribuição dos módulos em 10 geradores permite que a corrente total permaneça dentro da faixa operacional do equipamento, assegurando a compatibilidade eletrotécnica e o desempenho confiável do sistema.

### 3.4. PARÂMETROS CLIMÁTICOS LOCAIS

O município de Campina do Monte Alegre está inserido em uma região de clima subtropical, com biomas predominantes de Cerrado e Mata Atlântica (Prefeitura de Campina do Monte Alegre, 2025). Para a obtenção de dados climáticos mais detalhados e específicos do local, foi utilizada a ferramenta SISIFO - ferramenta de simulação voltada ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e aplicações em irrigação solar.

Com relação a temperatura, observados na Figura 13, vê-se que a temperatura mínima varia entre 12,3 °C a 19,7 °C, enquanto a temperatura máxima varia entre 21,6 °C a 27°C. Esses valores representam médias de anos típicos dentro de uma distribuição estatística e são obtidos por meio de modelos amplamente reconhecidos internacionalmente, baseados em dados consolidados. No entanto, não há informação clara sobre quais anos específicos foram utilizados no cálculo dessas médias.

**Figura 13** -Temperatura local.

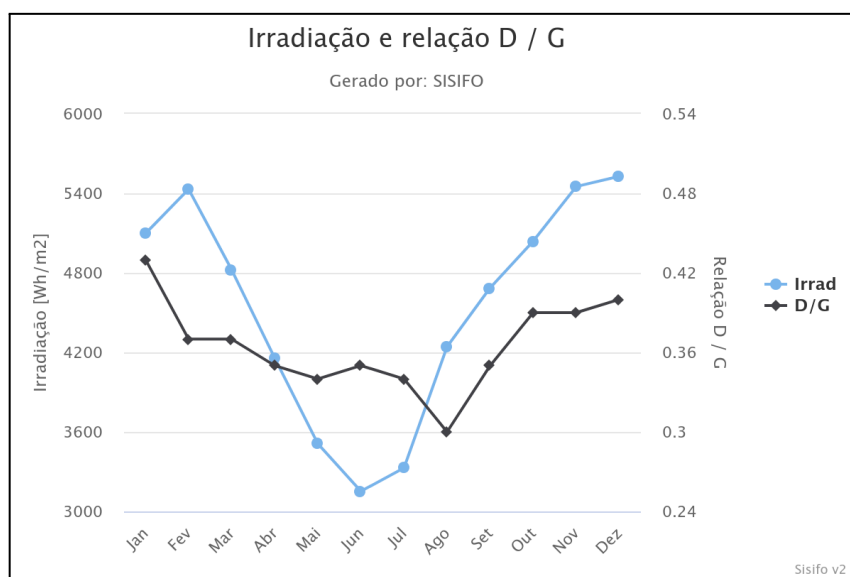


Fonte -SISIFO (2025).

Em relação à irradiância global mensal típica - representada pela linha azul na Figura 14 - observa-se que os maiores valores ocorrem nos meses de novembro, dezembro e fevereiro, com picos superiores a 5.400 Wh/m<sup>2</sup>. Por outro lado, os menores níveis de irradiância são registrados no período entre maio e julho, sendo o valor mínimo obtido em junho, com aproximadamente 3.200 Wh/m<sup>2</sup>. Esse comportamento está associado às características típicas do inverno, marcado por menor disponibilidade de radiação solar e a redução da duração do fotoperíodo.

A razão D/G típica, que expressa a fração da radiação global composta por radiação difusa, apresenta seus maiores valores nos meses de dezembro e janeiro, indicando maior presença de nebulosidade e dispersão atmosférica. O menor valor dessa relação é observado em agosto, refletindo a predominância de radiação direta, com céu limpo e condições atmosféricas favoráveis à geração fotovoltaica.

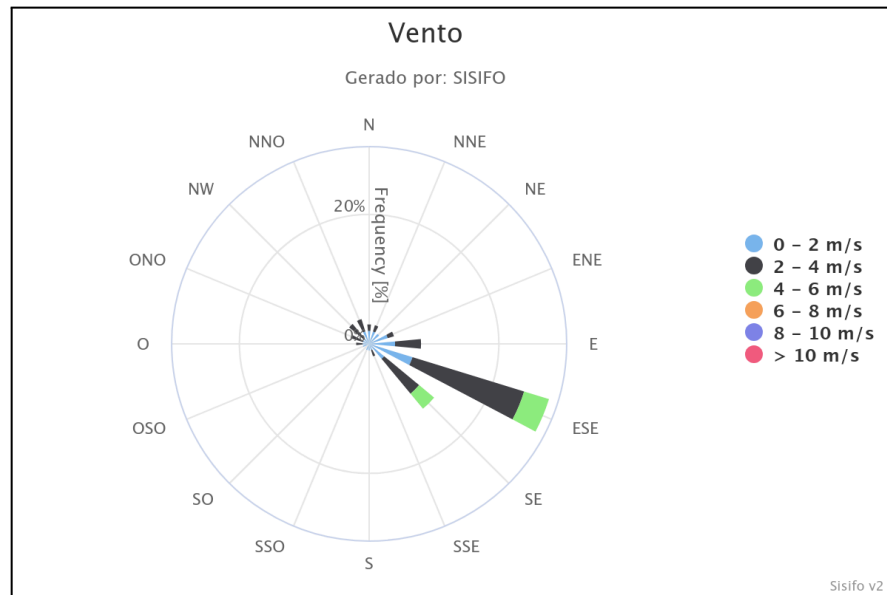
**Figura 14-** Irradiação e relação D/G local.



Fonte -SISIFO (2025).

A área em estudo apresenta ventos predominantes vindos da direção Leste-Sudeste (ESE), seguida pelas direções Sudeste (SE) e Leste (E). A frequência de ocorrência dos ventos nessas direções atinge valores superiores a 20%, o que indica padrão predominante de circulação atmosférica. Em relação à velocidade, constata-se que os ventos predominantes apresentam velocidades que variam entre 0 a 6 m/s, conforme apresentado na rosa dos ventos da Figura 15.

**Figura 15-** Direção e velocidade dos ventos locais.



**Fonte** -SISIFO (2025).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA ÁREA 1

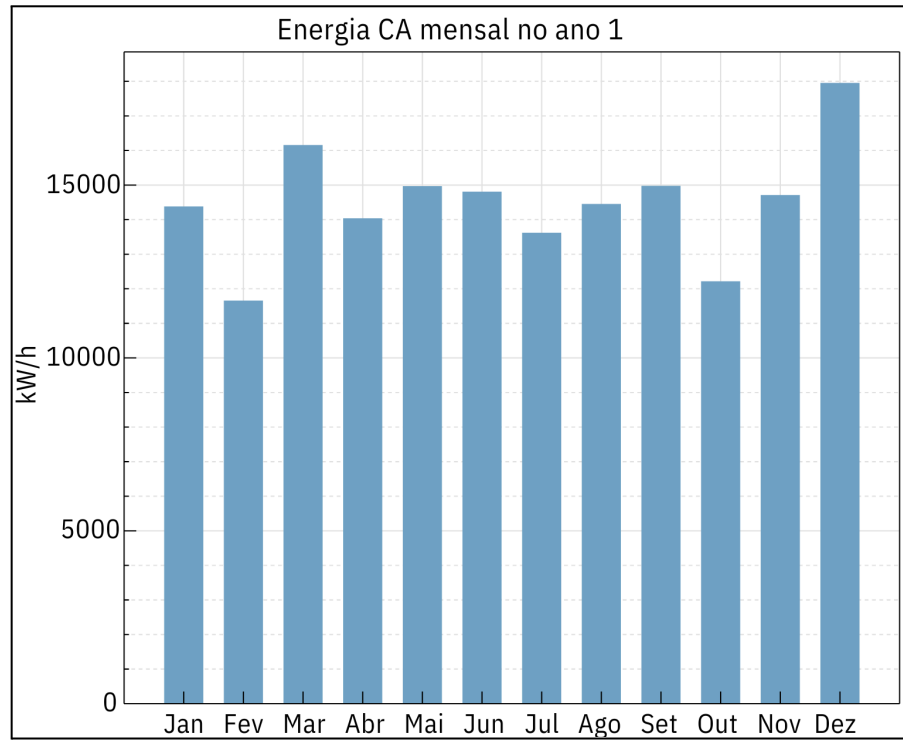
Como resultado da simulação da primeira área, obteve-se os dados observados na Tabela 1 e nas Figuras seguintes (16 e 17).

**Tabela 1** - Resultados da simulação da área 1.

Métrica	Valor
Energia CA anual no ano 1	184.475,00 kWh
Fator de capacidade CC no ano 1	19,3 %
Rendimento energético no ano 1	1.692 kWh/kW
Taxa de desempenho no ano 1	0.8

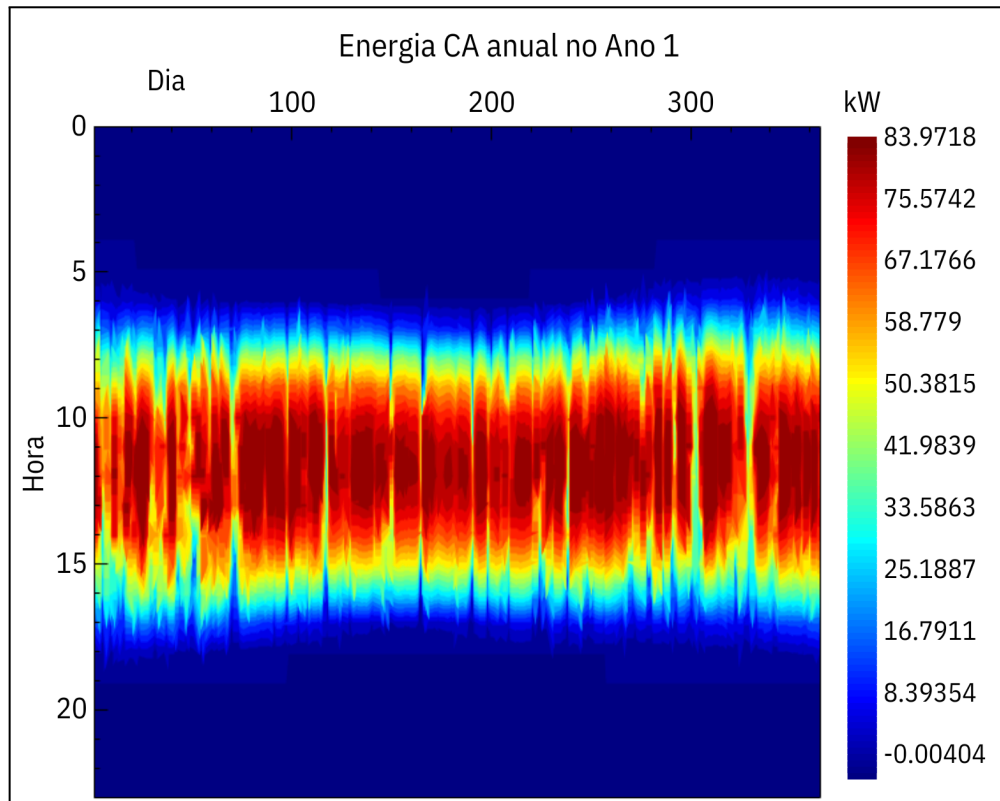
**Fonte** - SAM (2025).

**Figura 16-** Geração de energia ao longo dos meses.



**Fonte -** SAM (2025).

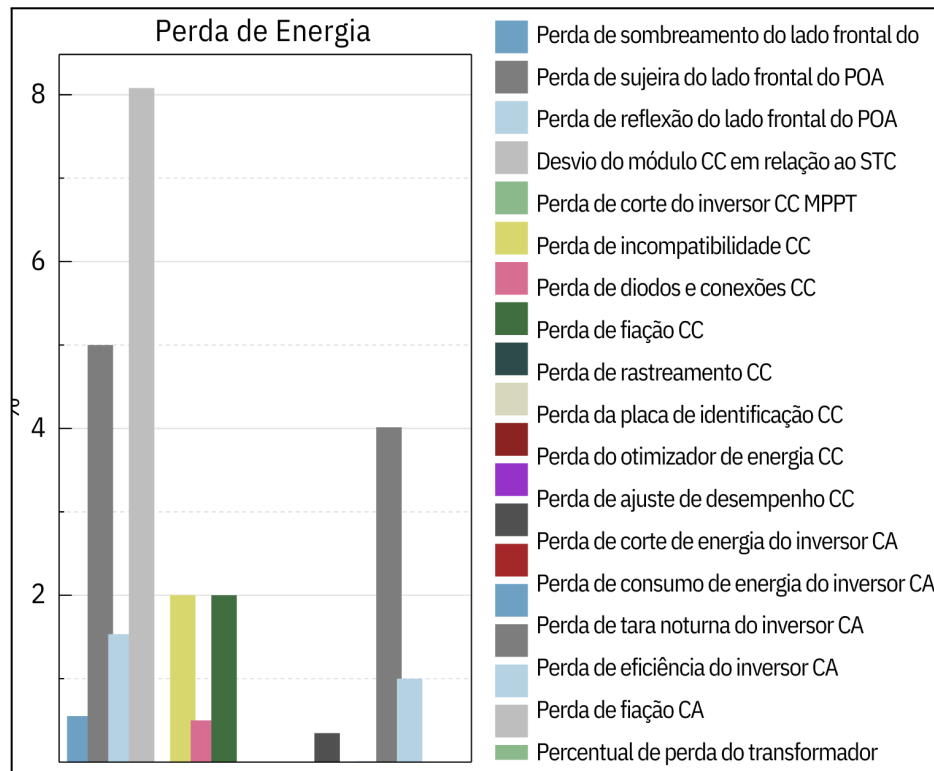
**Figura 17-** Geração horária ao longo do ano.



Fonte - SAM (2025).

A partir dos gráficos apresentados pelas Figuras 16 e 17, observa-se que a geração de energia solar apresenta variações sazonais ao longo do ano, influenciadas por fatores climáticos e pela disponibilidade de radiação solar. No primeiro ano de análise, os meses com maior produção de energia foram dezembro e março, refletindo maior incidência de radiação solar nestes períodos. Por outro lado, fevereiro e outubro apresentaram os menores índices de geração, provavelmente em função de condições meteorológicas menos favoráveis, como maior cobertura de nuvens ou ocorrência de chuvas.

**Figura 18-** Análise de perdas energéticas.



Fonte - SAM (2025).

A Figura 18 acima detalha as principais perdas de energia, o que permite o entendimento dos mecanismos técnicos que influenciam a performance do sistema. As maiores perdas estão relacionadas ao desvio do módulo CC do STC, ou seja, a diferença entre o desempenho real dos módulos fotovoltaicos no campo (CC) e o desempenho declarado em condições padrão de teste (STC), correspondendo a aproximadamente 8%. Após isso, há perdas por sujeira na parte frontal do painel, correspondendo a 5% e, com 4%, há a perda por eficiência do inversor AC. Com isso, é possível observar que a geração de energia fotovoltaica é fortemente influenciada não apenas por fatores sazonais, mas também por perdas técnicas e condições ambientais locais.

#### 4.2. DISCUSSÕES SOBRE A ÁREA 1

Considerando que cada módulo fotovoltaico ocupa uma área aproximada de 2,645 m<sup>2</sup>, com base em suas dimensões (2,3 m x 1,15 m), e que foram instalados 200 módulos na Área 1, tem-se uma área total ocupada de aproximadamente 529 m<sup>2</sup>. Isso representa cerca de 21%

da área total disponível de 2.464,77 m<sup>2</sup>, indicando um aproveitamento subtutilizado do espaço físico.

Fedrico *et al.* (2025) apresentam que o consumo médio de energia elétrica nas residências brasileiras é de cerca de 152,2 kWh/mês, o que corresponde a 1.826,4 kWh/ano. Com base nesse valor e sabendo que a simulação realizada foi que anualmente seriam gerados 184.475 kWh, é possível concluir que a geração de energia da área 1 seria suficiente para abastecer 101 residências.

Os resultados obtidos nesta simulação correspondem a uma configuração de capacidade mínima, adotada para fins de teste e validação de parâmetros técnicos básicos. No entanto, com um planejamento estratégico do layout dos módulos e maior densidade de instalação, seria possível aumentar significativamente o aproveitamento da área e, conseqüentemente, elevar a capacidade de geração do sistema, otimizando o investimento e a eficiência do projeto.

Além disso, um dos pontos considerados como vantagem competitiva no sistema em análise é a possibilidade de utilizar a própria rede de distribuição de energia como forma de armazenamento, funcionando como uma espécie de “bateria” para todo o sistema. Como os anéis viários, em sua maioria, estão localizados próximos a essas redes, essa característica se mostra especialmente vantajosa. Isso porque, em grandes usinas fotovoltaicas, o uso de baterias físicas se torna inviável devido ao alto custo financeiro.

#### 4.3. RESULTADOS DA EXTRAPOLAÇÃO PARA A ÁREA 2

A geração de energia solar fotovoltaica é influenciada por diversos fatores, entre eles a latitude e a temperatura média local. Usinas localizadas mais próximas à linha do Equador tendem a receber maior incidência solar, porém, também apresentam temperaturas mais elevadas, o que pode reduzir a eficiência dos painéis fotovoltaicos. Outro aspecto relevante é a disponibilidade de área útil para a instalação dos painéis: quanto maior a área, maior o potencial de geração de energia.

Considerando que as áreas analisadas apresentam condições geográficas e climáticas semelhantes, devido à proximidade entre elas, foram adotados valores equivalentes de produtividade energética. A única diferença foi relacionado a área 2, cujo potencial energético foi estimado com um aumento de 20%, em função da maior quantidade de painéis instalados. Dessa forma, a produção anual projetada para essa área é de 221.370 kWh.

Esse volume de energia seria capaz de atender, em média, cerca de 121 residências, considerando o consumo médio anual de uma residência brasileira. Ressalta-se que esse resultado considera um aproveitamento de 33,8% da área total disponível para a instalação de sistemas fotovoltaicos, o que indica um uso também mínimo da área, respeitando uma distância de 10 metros das bordas.

#### 4.4. EXTRAPOLAÇÃO DOS RESULTADOS

No município de Itu, estado de São Paulo, identifica-se a presença de um anel viário com área total de 279.985,78 m<sup>2</sup>, o qual apresenta potencial para aproveitamento na geração de energia solar fotovoltaica. A localização da área em questão está representada na Figura 19.

**Figura 19-** Localização do anel viário em Itu (SP).



Fonte - Google Earth (2025).

Apesar de possíveis diferenças nas condições climáticas e geográficas locais, foram consideradas as mesmas características da área 1. Isso porque o objetivo dessa extrapolação é apenas estimar, de forma simplificada, o potencial energético em um anel viário de grande porte.

Sendo assim, com base na extrapolação proporcional ao tamanho da área dos resultados obtidos por meio da simulação da Área 1, estima-se que o potencial de geração elétrica para a área destacada seja de aproximadamente 21 GWh por ano. Essa quantidade de energia seria suficiente para suprir o consumo de cerca de 11.500 unidades residenciais.

Segundo o Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022), a média de habitantes por domicílio no Brasil é de 2,79, uma diminuição frente ao censo de 2010, onde essa quantidade era de 3,31 habitantes por domicílio. Com base nesse dado, estima-se que o potencial de energia gerada neste anel rodoviário analisado seria suficiente para atender uma população superior a 32 mil habitantes. Ainda de acordo com o Censo de 2022, o Brasil conta com 5.570 municípios, dos quais 4.521 possuem população inferior a 32 mil habitantes. Isso significa que o referido potencial energético poderia suprir a demanda de mais de 80% dos municípios brasileiros (IBGE, 2022).

É importante destacar que este cálculo foi realizado de forma bastante conservadora, considerando estimativas mínimas, com aproveitamento de apenas 21% da área total, percentual do qual poderia facilmente ser ampliado para 50% em casos de anéis viários com melhores condições de declividade do terreno e extensão da área. Grande anéis viários, como o apresentado na Figura 19, abrangem áreas muito extensas e que se localizam a uma distância segura da faixa de rolamento, o que amplia significativamente o seu potencial para a geração de energia. Dessa forma, os valores reais de geração podem ser substancialmente superiores aos extrapolados neste estudo preliminar. Para uma estimativa mais precisa, recomenda-se a consideração dos resultados provenientes de estudos específicos sobre esse potencial, dos quais, atualmente, estão em fase de elaboração.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente estudo demonstrou o potencial técnico de aproveitamento de áreas subutilizadas, como anéis viários, para a implantação de usinas solares fotovoltaicas, representando uma solução inovadora e estratégica diante das limitações associadas à disponibilidade de grandes extensões de terra. A proposta se mostra particularmente viável ao considerar que essas áreas já contam com infraestrutura básica, como terraplanagem e acesso viário, o que contribui para a redução de custos com obras civis e facilita a logística de instalação.

Os resultados obtidos por meio da simulação no município de Campina do Monte Alegre indicam que, mesmo em áreas consideradas pequenas, como a de um anel viário local, é possível alcançar uma geração significativa de energia elétrica suficiente para abastecer até 222 residências, de 403.075 kWh/ano. A replicação deste modelo ao longo da malha rodoviária estadual e federal representa uma oportunidade concreta de expansão da geração



solar distribuída, com impactos positivos na diversificação da matriz energética nacional, na promoção da economia circular e na valorização de espaços inutilizados.

Cabe ressaltar que esta abordagem configura-se como pioneira no Brasil, uma vez que não há registros técnicos consolidados que proponham de forma estruturada a ocupação de anéis viários para geração fotovoltaica. Isso reforça a importância do presente trabalho como ponto de partida para pesquisas futuras, que poderão aprofundar a análise da viabilidade econômica, identificar áreas prioritárias para implantação, avaliar restrições legais, ambientais e de segurança, bem como considerar diferentes tecnologias de painéis e estratégias de armazenamento.

Por fim, conclui-se que a implantação de usinas fotovoltaicas em áreas de anéis viários de rodovias representa uma alternativa promissora e estratégica para a consolidação de um sistema energético mais limpo, resiliente e descentralizado no Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Eliane *et al.* **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: revisão bibliográfica. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.** 2015. Disponível em: <<https://revista.fumec.br/index.php/eol/article/view/3574>>. Acesso em: 14 jul. 2025.

ARMAZÉM DO SOL. **Energia Fotovoltaica.** Uma energia limpa, inesgotável e gratuita. 2025. Disponível em: <<https://www.armazemosol.com.br/energia-fotovoltaica/>>. Acesso em: 14 jul. 2025.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Relatório Síntese 2024.** Ano base 2023. 2024. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2024\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf)>. Acesso em: 19 jun. 2024.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Relatório Síntese 2025.** Ano base 2024. 2025. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2025\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf)>. Acesso em: 20 maio 2025.

BARCELLOS, Matheus Lima Barreto de Souza. **ANÁLISE DA VIABILIDADE DE INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR PAINÉIS SOLARES EM UMA RESIDÊNCIA FAMILIAR.** 2023. 122 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2023. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/21425/1/MLBSBarcellos.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2025.

DINIZ, Hélio Augusto Goulart. **ESTUDO COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA BOMBA DE CALOR ASSISTIDA POR ENERGIA SOLAR OPERANDO COM CONDENSADORES POR IMERSÃO E COAXIAL.** 2016. 209 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/53116/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20Mestrado%20-%20H%c3%a9lio.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2024.

DIERMANN, Ralph. **As rodovias nacionais e federais da Alemanha podem abrigar 54 GW de energia fotovoltaica.** 2024. Disponível em: <<https://www.pv-magazine.com/2024/11/20/germanys-national-federal-highways-could-host-54-gw-of-pv/>>. Acesso em: 12 maio 2025.

ENKHARDT, Sandra. **Alemanha lança protótipo de sistema fotovoltaico rodoviário de 33 kw.** 2023. Disponível em: <<https://www.pv-magazine.com/2023/06/29/germany-launches-33-kw-prototype-highway-pv-system/>>. Acesso em: 12 maio 2025.



FEDRIGO, Natália Sens *et al.* **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**. 2025. Disponível em:

<<https://labeee.ufsc.br/pt-br/node/480#:~:text=Observou%2Dse%20que%20o%20consumo,h%C3%A1%20grande%20varia%C3%A7%C3%A3o%20no%20pa%C3%ADs>>. Acesso em: 20 maio 2025.

FRANCO, Arthur Portilho. **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**: contextualização e perspectivas para sua massificação no brasil. 2013. Disponível em:

<<https://www.solenerg.com.br/wp-content/uploads/2013/02/TCC-Arthur.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2024.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energia e meio ambiente no Brasil**. 2007. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/ea/a/tk9tsKdqdkSy3CzMf58V9bw/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 25 jun. 2024.

GOMES, Caio Peixoto. **Energia Solar**: Utilização como fonte de energia alternativa. 2012. Disponível em:

<<https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/view/2411>>. Acesso em: 26 jun. 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2022**: resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em:

<<https://censo2022.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 20 maio 2025.

KEMERICH, Pedro Daniel da Cunha *et al.* **Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo**. 2016. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/16132/pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2024.

KIMURA, Davi Kazuaki Coelho. **APLICAÇÕES DA ECONOMIA CIRCULAR PARA PROJETOS E SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**. 2021. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Gestão de Energia e Eficiência Energética, Faculdade de Tecnologia de Campinas, Campinas, 2021. Disponível em:

<[https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/9474/1/Tecnologiaemgestaodeenergiaeeficienciaenergetica\\_2\\_2021\\_Davi%20Kimura\\_Aplicacaoda%20economia%20circular%20para%20projetos%20e%20sistemas%20fotovoltaicos..pdf](https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/9474/1/Tecnologiaemgestaodeenergiaeeficienciaenergetica_2_2021_Davi%20Kimura_Aplicacaoda%20economia%20circular%20para%20projetos%20e%20sistemas%20fotovoltaicos..pdf)>. Acesso em: 25 jun. 2024.

LANA, Thiago Rocha *et al.* **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**: revisão bibliográfica. 2020. Disponível em:

<<https://ojs.periodicos.unis.edu.br/index.php/mythos/article/view/467/377>>. Acesso em: 01 jul. 2024.

MITTELSTADT, Nora *et al.* **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2024. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-and-sustainable-energy-reviews>>. Acesso em: 05 maio 2025.



NOBRE, Carlos A.; MARENGO, José A.. **Mudanças Climáticas em Rede Um olhar interdisciplinar**: contribuições do instituto nacional de ciência e tecnologia para mudanças climáticas. São José dos Campos: Canal 6, 2017. 612 p. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Stoecio-Maia/publication/324411872\\_Seguranca\\_Alimentar/links/5accbc340f7e9bcd519bcf1f/Seguranca-Alimentar.pdf#page=151](https://www.researchgate.net/profile/Stoecio-Maia/publication/324411872_Seguranca_Alimentar/links/5accbc340f7e9bcd519bcf1f/Seguranca-Alimentar.pdf#page=151)>. Acesso em: 14 maio 2025.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Mudanças Climáticas**: relatório de síntese. 2014. Disponível em: <[https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf)>. Acesso em: 05 maio 2025.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS. **Mudanças Climáticas 2022**: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. 2022. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>>. Acesso em: 06 maio 2025.

PORTAL SOLAR. **Conheça as rodovias que geram energia solar**. Portal Solar, s.l., [s.d.]. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/conheca-as-rodovias-que-geram-energia-solar>>. Acesso em: 14 jul. 2025.

Prefeitura de Campina do Monte Alegre. **Dados do município**. 2025. Disponível em: <<https://www.campinadomontealegre.sp.gov.br/pagina/2/dados-do-municipio#:~:text=A%20%C3%A1rea%20da%20cidade%20%C3%A9,op%C3%A7%C3%A3o%20de%20entretenimento%20para%20turistas>>. Acesso em: 25 maio 2025.

SCHERER, Lara Almeida *et al.* **FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA**: energia solar. 2015. Disponível em: <<https://home.unicruz.edu.br/seminario/anais/anais-2015/XX%20SEMIN%C3%81RIO%20INTERINSTITUCIONAL%202015%20-%20ANAIS/Graduacao/Graduacao%20-%20Resumo%20Expandido%20-%20Exatas,%20Agrarias%20e%20Ambientais/FONTE%20ALTERNATIVA%20DE%20ENERGIA%20ENERGIA%20SOLAR.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2024.

SILVA, Heitor Marques Francelino da; ARAÚJO, Francisco José Costa. **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL**: uma revisão bibliográfica. 2022. Disponível em: <<https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/4654/1751>>. Acesso em: 19 jun. 2024.

SHAW, Vicente. **Primeira rodovia com zero carbono da China inclui energia fotovoltaica, abrindo caminho para transporte sustentável**. 2024. Disponível em: <<https://www.pv-magazine.com/2024/12/24/chinas-first-zero-carbon-highway-includes-pv-paving-way-for-sustainable-transport/>>. Acesso em: 14 maio 2025.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica**. 2010. 292 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/781324>>. Acesso em: 10 maio 2025.