

UNIGUAÇU – UNIÃO DE ENSINO SUPERIOR DO IGUAÇU LTDA
FACULDADE UNIGUAÇU
ENGENHARIA CIVIL
PROJETO FINAL DE CURSO II

PAOLA LAZZARI

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E AMBIENTAL DE UM
SISTEMA FOTOVOLTAICO EM UMA EDIFICAÇÃO UNIFAMILIAR EM
SÃO MIGUEL DO IGUAÇU – PR**

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU - PR

2026

PAOLA LAZZARI

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E AMBIENTAL DE UM
SISTEMA FOTOVOLTAICO EM UMA EDIFICAÇÃO UNIFAMILIAR EM
SÃO MIGUEL DO IGUAÇU – PR**

Projeto de pesquisa apresentado como requisito para
aprovação na disciplina de Projeto Final de Curso I do
curso de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU.
Orientador(a): Prof. Me Gabriel Matsuda

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU - PR

2026



4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TERMO DE APROVAÇÃO

PAOLA LAZZARI

ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E AMBIENTAL DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM UMA EDIFICAÇÃO UNIFAMILIAR EM SÃO MIGUEL DO IGUAÇU – PR

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil apresentado, sob a orientação do professor Gabriel Matsuda, aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel no curso de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU, pela seguinte banca examinadora:

Professor Orientador Gabriel Matsuda
Faculdade UNIGUAÇU

Professora Jaqueline Orth
Faculdade UNIGUAÇU

Professor Paulo Fernandes
Faculdade UNIGUAÇU

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU, 02 DE JUNHO 2026.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, ao meu querido primo Giovani Amboni (In memoriam), cuja a presença e o apoio foram fundamentais para o início da minha carreira acadêmica. Aos meus pais, Espedito D. Lazzari e Magda B. Pasini, pelo amor incondicional e o apoio constante, a todos minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me sustentar em cada etapa desta caminhada, por me dar forças nos momentos difíceis e por nunca permitir que eu desistisse, mesmo diante dos maiores desafios.

Aos meus pais, Espedito e Magda, meu amor e gratidão eternos. Obrigada por serem meu alicerce, por cada palavra de incentivo, por todo esforço, carinho e apoio incondicional. Sem vocês, nada disso faria sentido.

Aos meus irmãos, Pâmela, Gustavo Fernando e Débora, obrigada por cada conversa, cada risada e por me ajudarem a distrair a cabeça quando mais precisei. Ter vocês por perto tornou esse processo mais leve e mais feliz.

E ao meu professor orientador, Gabriel Matsuda, muito obrigada pela paciência, dedicação e por compartilhar seu conhecimento com tanta generosidade. Sua orientação foi essencial para a construção deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

A todos vocês, meu mais sincero e profundo agradecimento.

EPÍGRAFE

“Com sabedoria se constrói a casa, e com discernimento se consolida. Pelo conhecimento os seus cômodos se enchem do que é precioso e agradável. O homem sábio é poderoso, e quem tem conhecimento aumenta a sua força”

Provérbios 24, 3-5.

RESUMO

Diante das alterações climáticas que impactam o desempenho das usinas hidrelétricas, principal fonte da matriz elétrica brasileira, e do elevado custo das tarifas convencionais de energia, a tecnologia fotovoltaica destaca-se como uma alternativa limpa, renovável e sustentável para a microgeração distribuída (MMGD). Assim, o objetivo deste estudo foi analisar o desempenho energético, econômico e ambiental de um sistema fotovoltaico instalado em uma residência unifamiliar. O trabalho foi desenvolvido por meio de uma abordagem quantitativa e descritiva, avaliando, ao longo de um período de 12 meses, a geração de energia elétrica do sistema, as variações sazonais associadas às condições meteorológicas locais e o perfil de consumo da edificação, que possui área de mais de 200 m² e é ocupada por três moradores. Os resultados contemplam uma análise comparativa entre a energia produzida e a demanda energética da residência, considerando a utilização de equipamentos eletrodomésticos, sistemas de climatização e bombeamento da piscina. Observou-se que o sistema fotovoltaico contribui significativamente para a redução da dependência da rede elétrica convencional, promovendo maior eficiência energética e redução dos custos associados ao consumo de eletricidade. Sob a perspectiva ambiental, o estudo quantifica a contribuição do sistema por meio da estimativa da redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂), correlacionando os resultados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7 e ODS 13) da Agenda 2030 da ONU. Conclui-se que a tecnologia fotovoltaica representa uma solução tecnicamente viável, economicamente eficiente e ambientalmente sustentável.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Microgeração distribuída. Sustentabilidade. Eficiência energética. Transição energética.

ABSTRACT

In the face of climate change that impacts the performance of hydroelectric plants, the main source of the Brazilian electricity matrix, and the high cost of conventional energy tariffs, photovoltaic technology stands out as a clean, renewable and sustainable alternative to distributed microgeneration (MMGD). Thus, the objective of this study was to analyze the energy, economic and environmental performance of a photovoltaic system installed in a single-family residence. The work was developed through a quantitative and descriptive approach, evaluating, over a period of 12 months, the generation of electricity in the system, the seasonal variations associated with local weather conditions and the consumption profile of the building, which has an area of more than 200 m² and is occupied by three residents. The results include a comparative analysis between the energy produced and the energy demand of the residence, considering the use of household appliances, air conditioning systems and pool pumping. It was observed that the photovoltaic system contributes significantly to the reduction of dependence on the conventional electricity grid, promoting greater energy efficiency and reducing the costs associated with electricity consumption. From an environmental perspective, the study quantifies the contribution of the system by estimating the reduction of carbon dioxide (CO₂) emissions, correlating the results to the Sustainable Development Goals (SDG 7 and SDG 13) of the UN 2030 Agenda. It is concluded that photovoltaic technology represents a technically viable, economically efficient and environmentally sustainable solution.

Keywords: Photovoltaic solar energy. Distributed microgeneration. Sustainability. Energy efficiency. Energy transition.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 JUSTIFICATIVA	133
3 OBJETIVOS.....	14
3.1 Objetivo geral.....	14
3.2 Objetivos específicos	14
4 REVISÃO DE LITERATURA	15
4.1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.....	15
4.1.1 Micro e Minigeração de Energia	17
4.2 RADIAÇÃO SOLAR.....	18
4.2.1 No Brasil	18
4.3 PLACAS FOTOVOLTÁICAS.....	19
4.3.1 Componentes do sistema	23
4.3.2 Tipos de sistemas.....	25
4.3.2.1 <i>On-grid</i>	26
4.3.2.2 <i>Off-grid</i>	26
4.3.3 Processo de instalação.....	27
4.4 CRESCIMENTO DA ENERGIA SOLAR	28
4.5 CUSTO BENEFÍCIO	30
4.6 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTAVEL	30
5 MATERIAL E MÉTODOS	32
5.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DA EDIFICAÇÃO.....	32
5.2 CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO.....	33
5.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTÁICO	34
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
6.1 ANÁLISE COMPARATIVA DE CONSUMO DE ENERGIA.....	38
6.2 INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE NA GERAÇÃO E CONSUMO.....	40
6.3 VIABILIDADE FINANCEIRA E COMPENSAÇÃO ENERGÉTICA.....	42
6.4 CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS E SUSTENTÁVEIS.....	48
6.5 COMPARATIVOS CO ₂ convencional x co ₂ EM PLACAS FOTOVOLTÁICAS.....	50
7 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição energética.....	17
Figura 2 - Matriz Energética 2024	18
Figura 3 - Radiação Solar interagindo com a Atmosfera Terrestre	20
Figura 4 - Mapa do potencial de geração solar fotovoltaica do Brasil	21
Figura 5 - Processo Czochralski de dissolução de Cristal.....	23
Figura 6 - Pannel de Silício Monocristalino	23
Figura 7 - Pannel de silício policristalino	24
Figura 8 - Filme fino de silício amorfo.	25
Figura 9 - Camadas do pannel fotovoltaico	26
Figura 10 - Variedades de inversores	27
Figura 11 - Sistema <i>on-grid</i>	28
Figura 12 - Sistema <i>off-grid</i>	29
Figura 13 - Localização da residência unifamiliar.....	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Consumo total de eletricidade no Brasil (TWh) entre 1970 e 2050.....	31
Gráfico 2 - Consumo mensal 12 meses.....	37
Gráfico 3 - Ranking dos Aparelhos.....	38
Gráfico 4 - Consumo Médio Diário.....	39
Gráfico 5 - Energia Consumida x Energia Injetada (Migrogeração Distribuida).....	41
Gráfico 6 - Porcentual de Imposto na conta.....	47
Gráfico 7 - Custo médio da Energia.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados mensais de consumo, faturamento e compensação energética da edificação residencial.	43
Tabela 2 - Comparativo das emissões de CO ₂ entre diferentes fontes de geração elétrica.....	50

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2024), mais de 750 mil sistemas de Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) foram instalados no território brasileiro, apenas em 2024, este dado indica uma crescente busca dos brasileiros por uma geração de energia própria que vêm se destacando no cenário atual como uma alternativa de redução de gastos e que minimizem o impacto ambiental.

No Brasil, as usinas hidrelétricas lideram a geração de energia, embora seja uma fonte renovável, a instalação de barragens pode causar impactos ambientais significativos, como o alagamento de grandes áreas. Diante desse cenário, a energia solar surge como uma excelente alternativa, pois, além de ser renovável, é uma fonte limpa que não causa danos ao meio ambiente (Kruger; Zanella; Barichello, 2023).

Os consumidores brasileiros passaram a ter a possibilidade de gerar a sua própria energia elétrica por meio de fontes renováveis, desde de abril de 2012 com a entrada da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012. Além disso, podem fornecer o excedente gerado para a rede de distribuição local, no caso do estado do Paraná, a COPEL. Este modelo é conhecido como Micro e Minigeração distribuída (MMGD) e Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) que trazem benefícios socioeconômicos (ANEEL, 2022).

Embora a implantação da energia fotovoltaica tenha um custo consideravelmente alto, esta tecnologia está sendo estudada para ser mais acessível para a população, já que o Brasil possui um território com um ótimo índice de irradiação solar (Silva; Araujo, 2022).

Dessa forma, este trabalho busca analisar a geração de energia de um sistema fotovoltaico ao longo de um ano em uma edificação residencial de porte médio, avaliando seu desempenho nas diferentes estações do ano e sua contribuição na redução de dióxido de carbono (CO₂).

2 JUSTIFICATIVA

Conforme dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2024), o Brasil alcançou 200 GW de capacidade instalada de geração elétrica, sendo aproximadamente 84,25% provenientes de fontes renováveis, com predominância da energia hidrelétrica. Embora essa matriz seja considerada favorável do ponto de vista energético, grandes empreendimentos hidrelétricos podem gerar impactos socioambientais, como alterações nos ecossistemas e interferências nas comunidades do entorno.

Nesse contexto, a busca por fontes de energia mais limpas, distribuídas e acessíveis tem se intensificado. A geração fotovoltaica destaca-se como alternativa relevante por utilizar uma fonte renovável, reduzir a dependência da rede elétrica convencional e possibilitar economia financeira ao consumidor por meio do sistema de compensação de energia elétrica previsto pela Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 (Figueiredo et al., 2024).

Além dos benefícios ambientais e econômicos, a expansão da energia solar tem impacto direto na área da engenharia civil, pois influencia o planejamento, o projeto e a operação de edificações mais eficientes energeticamente. Entretanto, para que essa tecnologia seja adotada de forma segura e economicamente viável, é fundamental compreender seu desempenho em condições reais de operação, considerando as variações climáticas e sazonais ao longo do ano.

Assim, este trabalho se justifica pela necessidade de avaliar o comportamento de um sistema fotovoltaico instalado em uma edificação residencial, fornecendo informações que possam auxiliar profissionais e usuários na tomada de decisão sobre a implantação dessa tecnologia. Os resultados obtidos contribuem para o entendimento da eficiência energética, da viabilidade econômica e das vantagens ambientais associadas ao uso da energia solar em edificações.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho energético, econômico e ambiental de um sistema de energia solar fotovoltaica aplicado a uma edificação residencial unifamiliar localizada na cidade de São Miguel do Iguaçu – Paraná.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Levantar e analisar o consumo de energia elétrica da edificação residencial ao longo de um período de 12 meses, identificando variações associadas ao perfil de ocupação e às condições climáticas.
- b) Avaliar o desempenho do sistema fotovoltaico ao longo do período analisado, considerando a geração de energia elétrica, as variações sazonais e sua relação com as condições meteorológicas locais.
- c) Comparar a energia gerada pelo sistema fotovoltaico com a demanda energética da edificação, considerando o perfil de consumo dos principais equipamentos eletrodomésticos da residência.
- d) Analisar as contribuições ambientais e sustentáveis da utilização da energia solar fotovoltaica em edificações residenciais, com destaque para a redução das emissões de CO₂, eficiência energética predial e relação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

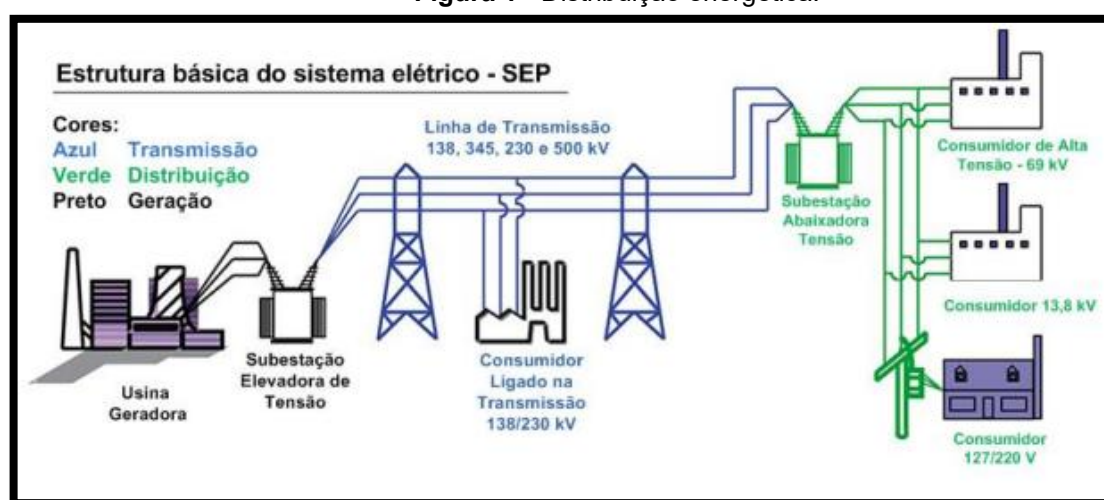
4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Diante das alterações climáticas decorrentes do aquecimento global, que vem se intensificando ao longo dos anos, diversos territórios enfrentam o desequilíbrio do volume das chuvas, impactando diretamente o desempenho das usinas hidrelétricas – principal fonte de energia do Brasil. Aliado, ao alto custo dos demais fontes de geração de energia tornou necessária a busca por uma alternativa energética mais viável e sustentável (Bortoloto *et al.*, 2017).

De acordo com Junior Oliveira e Marcos E. Borges (2024), no modelo convencional brasileiro a distribuição de energia elétrica consiste em um conjunto de redes encarregadas de receber a eletricidade proveniente das linhas de transmissão e viabilizar sua entrega ao usuário final, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Distribuição energética.

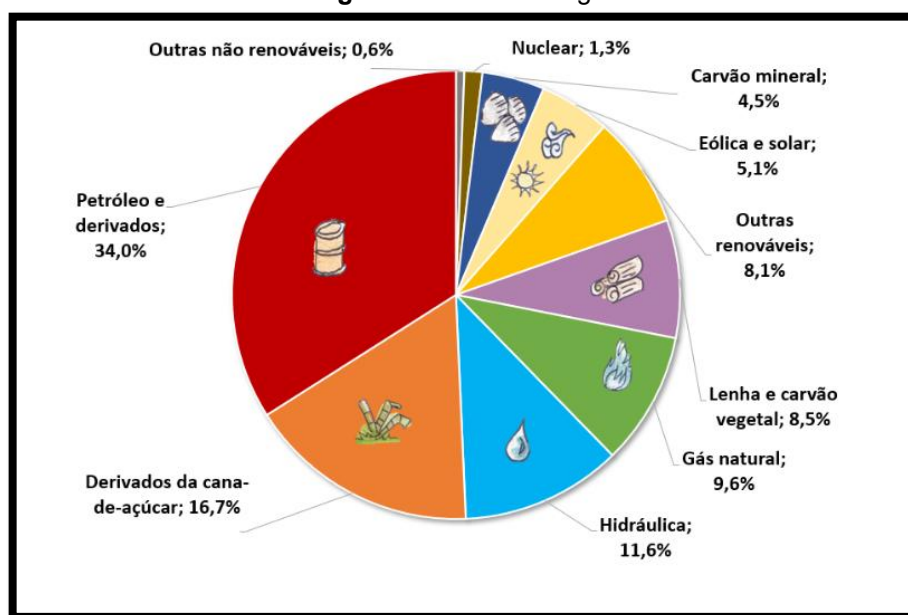


Fonte: Wilke, 2015.

Essa estrutura convencional é composta por redes de distribuição de alta, média e baixa tensão, além de subestações transformadores e medidores. A administração e conservação dessa infraestrutura são realizadas pelas concessionárias de energia elétrica, responsáveis por assegurar a continuidade do fornecimento, promovendo melhorias na rede e garantindo padrões de qualidade (Oliveira, 2024).

Nesse contexto, diante da necessidade da diversificação da matriz energética, como ilustrado na Figura 2, e a constante busca das alternativas mais sustentáveis, a energia fotovoltaica vem se ganhando destaque por ser uma fonte limpa e eficiente (EPE, 2026).

Figura 2 - Matriz Energética 2024.



Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2026.

Essa modalidade de geração se baseia na conversão direta da radiação solar em eletricidade, um processo realizado pelas células fotovoltaicas, que operam com base no efeito fotovoltaico no qual a absorção da luz solar gera uma diferença de potencial no material semicondutor, permitindo o fluxo de elétrons, resultando na geração da energia (Almeida *et al.*, 2016).

Embora a matriz elétrica brasileira seja predominantemente renovável, ainda há emissão de dióxido de carbono (CO₂) associada à geração de energia elétrica, ainda que em baixos níveis, estimados em aproximadamente 0,0385 kgCO₂/kWh (Kronenberger *et al.*, 2025). Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica se apresenta como uma alternativa sustentável, contribuindo para a redução dessas emissões, uma vez que sua geração ocorre sem a queima de combustíveis fósseis.

4.1.1 Micro e Minigeração de Energia

No Brasil, o consumidor brasileiro tem a possibilidade de gerar a sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis, após a implementação da Resolução Normativa ANEEL de 2012, permitindo que o indivíduo injete o excedente na rede de distribuição local, garantindo a compensação do consumo futuro, através do sistema *on-grid*. Esse sistema também é conhecido como Microgeração e Minigeração de Energia elétrica (MMGD), promovendo economia financeira, sustentabilidade e consciência ambiental (ANEEL, 2022).

Essa normativa, serviu como base para a geração distributiva no Brasil, atualmente o marco legal da Geração Distribuída (GD) é a Lei Nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022 (Planalto, 2022). Esta Lei juntamente com ANEEL (2022) trouxeram mudanças importantes para GD, como:

- Consumidores continuam podendo gerar energia renovável e injetar o excedente na rede;
- Exigência de garantia de fiel cumprimento para geradores acima de 500kW, com critérios a ser definido pela ANEEL;
- Parâmetros técnicos para sistemas de armazenamento, garantindo a estabilidade da rede elétrica e o funcionamento correto do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE);
- Manutenção dos modelos de geração individual e coletiva, como autoconsumo remoto, condomínios e geração compartilhada;
- Criação do Programa de Energia Renovável Social (PERS), voltado para consumidores de baixa renda.

Com a vigência desta nova legislação, tornou-se necessário apresentar garantias de cumprimento para obter pareceres de acesso em novos empreendimentos. Dessa forma, é preciso apresentar essas garantias para projetos com potência instalada entre 500 kW e 1.000kW (Cupertino; Tomé; Costa, 2023).

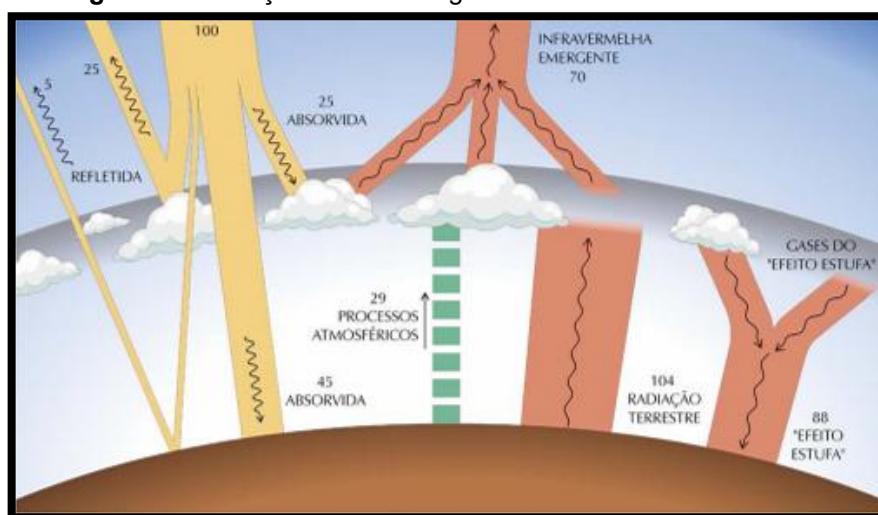
4.2 RADIAÇÃO SOLAR

A transmissão da energia solar para a Terra, é uma forma de energia eletromagnética que se move na velocidade da luz. A quantidade de radiação que chega até a superfície da Terra pode variar por vários motivos, fatores como a posição dos planetas no sistema solar, o clima e outras condições. Consequentemente, esses problemas resultam em três componentes, a radiação direta, difusa e refletida (Lemes, 2023).

A radiação direta é aquela que vem diretamente do disco solar sem alterar sua direção, exceto pelas mudanças causadas pela refração da atmosfera. A radiação difusa ocorre quando os raios solares são desviados por reflexão ou espalhamento na atmosfera, antes de atingirem o corpo, já a radiação refletida irá depender das características do solo e do ângulo do equipamento que capta a energia (Passos, 2021).

A seguir, na Figura 3 é possível ver o um exemplo de como ocorre esse reflexo de energia solar.

Figura 3 - Radiação Solar interagindo com a Atmosfera Terrestre.



Fonte: Lemes, 2023.

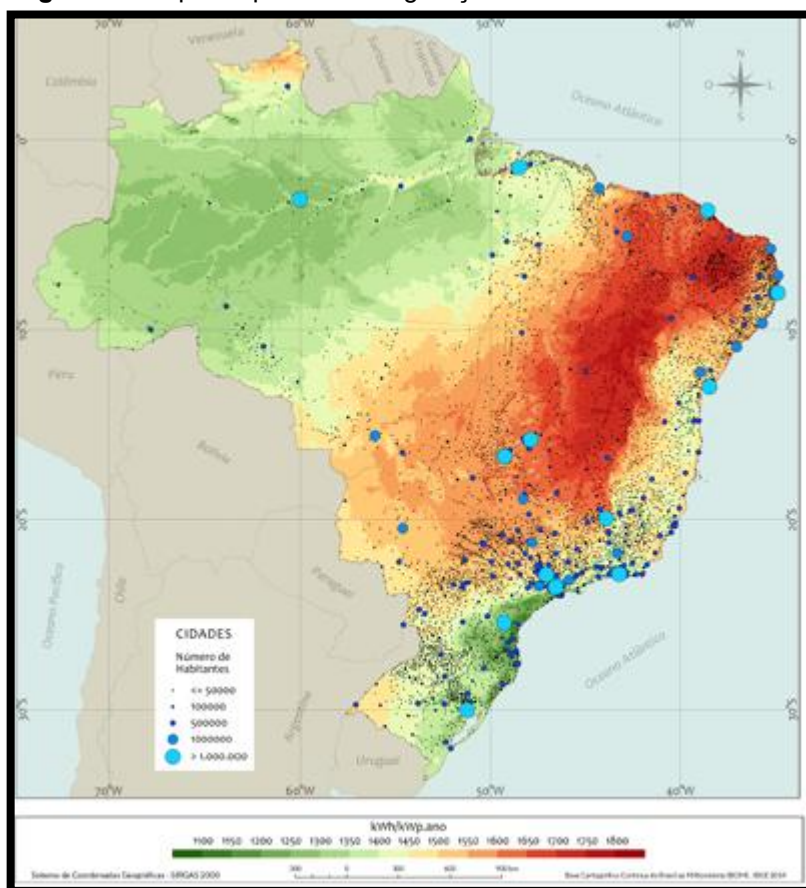
4.2.1 No Brasil

O Brasil está localizado em uma região com alta incidência de radiação solar ao longo de todo o ano, inclusive no inverno, o que favorece o aproveitamento da energia solar.

Além disso, é um dos maiores produtores mundiais de silício, material essencial para a fabricação de placas solares, e possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, tornando-se um país com grande potencial para a geração de energia solar (Ferreira, 2021).

Embora o Brasil apresente diferentes características climáticas, a irradiação solar média anual é relativamente alta e bem distribuída em todo o território, a região Sul é a que recebe os menores índices. O mapa, na Figura 4, mostra o rendimento energético anual máximo (Ribeiro, 2020).

Figura 4 - Mapa do potencial de geração solar fotovoltaica do Brasil



Fonte: Ferreira, 2021.

4.3 PLACAS FOTOVOLTÁICAS

No período entre 1851 e 1900 foram desenvolvidos coletores solares para o aquecimento de água e outros fluidos, sendo aplicados tanto em ambientes residenciais quanto em processos Industriais (Mauad; Ferreira; Trindade, 2017).

Logo depois, o uso de espelhos passou a ser adotado para elevar a temperatura dos fluidos, viabilizando o funcionamento de motores térmicos movidos pela luz solar, permitindo a geração de força motriz, ou seja, sendo capaz de produzir ou transmitir movimento. Além disso, no final do século XIX, foi descoberta a célula fotovoltaica, um dispositivo capaz de converter a luz solar diretamente em eletricidade, eliminando a necessidade de um motor térmico para a geração de energia (Mauad; Ferreira; Trindade, 2017).

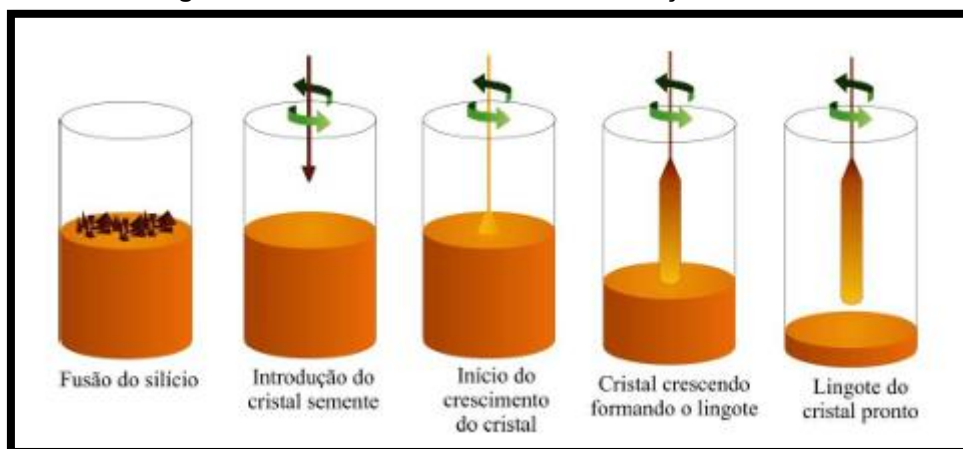
Segundo Bortoloto *et al.*, (2017), a energia fotovoltaica é definida como a eletricidade gerada a partir da conversão direta da radiação solar, um processo realizado por meio das células fotovoltaicas, as quais operam com base no efeito fotoelétrico ou fotovoltaico. A conversão elétrica ocorre devido à interação da radiação solar, luz e calor, com materiais semicondutores. Entre os principais efeitos envolvidos nesse processo, destacam-se o termoelétrico e o fotovoltaico.

O efeito termoelétrico ocorre quando a junção de dois metais gera uma diferença de potencial, enquanto o fotovoltaico consiste na conversão de energia dos fótons da luz solar em eletricidade (Bortoloto, *et al.*, 2017).

No Brasil, a maioria das células fotovoltaicas disponíveis no mercado são feitas de silício que pode ser encontrado em três formas principais: silício monocristalino, silício policristalino e silício amorfo. O silício, por sua vez, é classificado como um semicondutor essencial, pois possui uma faixa de energia específica chamada “gap de energia”, que corresponde à diferença entre a banda de valência (totalmente ocupada) e a banda de condução (inicialmente desocupada), este processo resulta na produção energética. Além disso, com o aumento da temperatura, a capacidade de condução elétrica do semicondutor também cresce (Machado; Miranda, 2015).

As células feitas de silício monocristalino são produzidas a partir de um único cristal de silício, chamado de cristal semente, por sua vez, este cristal é imerso em silício e derretido por meio de um processo conhecido como Czochralski, durante o crescimento do cristal são adicionado a pequenas quantidades de boro, o que resulta em um semicondutor, como ilustrado na Figura 5, (Machado; Miranda, 2015).

Figura 5 - Processo Czochralski de dissolução de Cristal.



Fonte: Machado e Miranda, 2015.

Em conjunto, a estrutura final do monocristalino pode ser observada na Figura 6, que destaca suas características e a posição cristalina no painel solar.

Figura 6 - Painel de Silício Monocristalino



Fonte: Rentel, 2021.

Por outro lado, as células de silício policristalino não passam pelo processo de Czochralski. Em vez disso, o silício líquido de alta pureza é resfriado, permitindo a formação de diversos cristais (Machado; Miranda, 2015).

Essas células possuem uma estrutura rígida, mas são suscetíveis a quebras, neste sentido, precisam ser agrupadas e encapsuladas dentro de um painel, formando assim o módulo fotovoltaico, o que garante maior resistência mecânica (MAUAD; Ferreira; Trindade, 2017).

Além disso, apresentam uma aparência heterogênea, com a tonalidade geralmente azulada. Na figura 7, é possível visualizar a estrutura desses cristais (Mauad; Ferreira; Trindade, 2017).

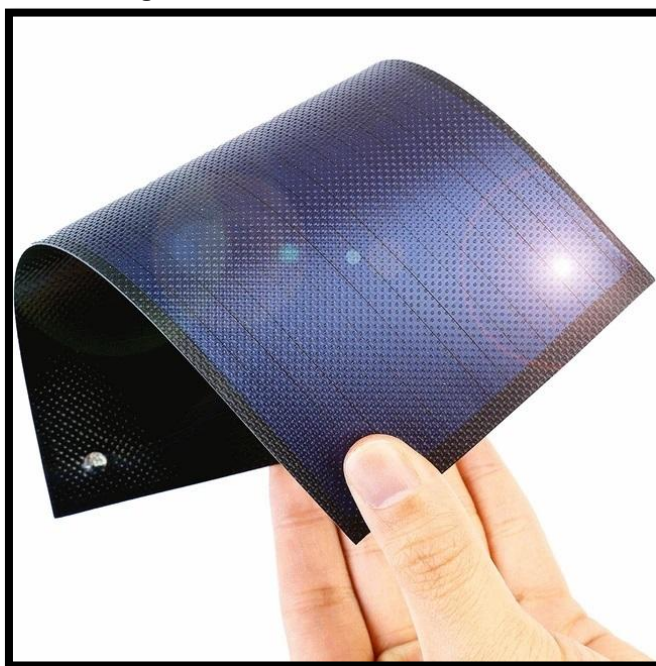
Figura 7 - Pannel de silício policristalino.



Fonte: Solst-Suporte, 2017.

Diferente das células monocristalinas e policristalinas, as células de silício amorfo são compostas por uma camada fina e desorganizada de silício, o que as torna mais flexíveis e leves. A Figura 8 evidencia estes aspectos. Por essas características elas fazem parte da categoria de filmes finos, cuja a fabricação tem sido amplamente estudada com o uso de diferentes materiais semicondutores e técnicas de deposição (Almeida *et al.*, 2016).

Figura 8 - Filme fino de silício amorfo.



Fonte: Mais Energia Solar, 2024.

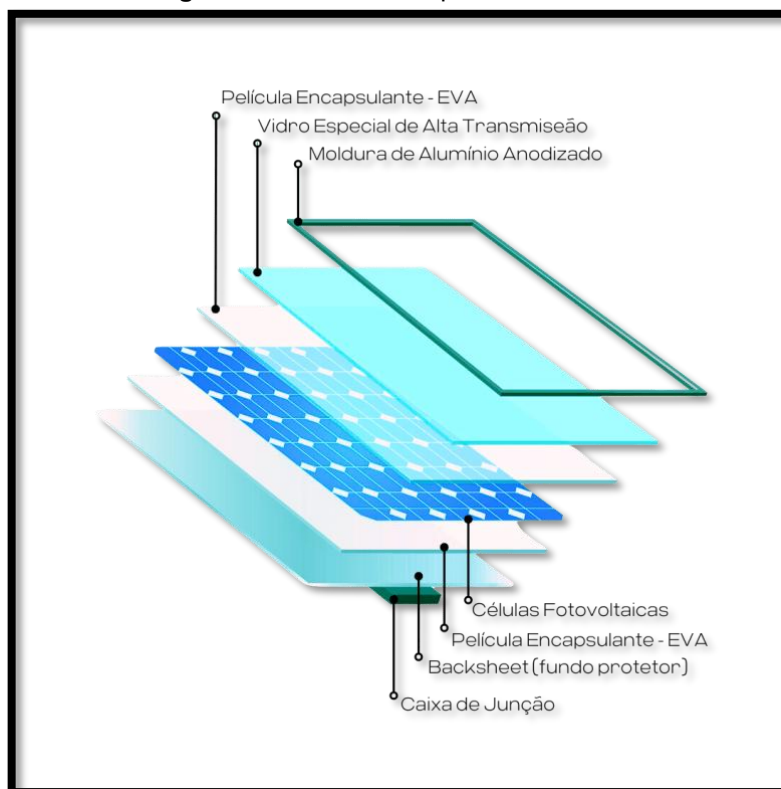
Em comparação com outras tecnologias fotovoltaicas, os filmes finos apresentam vantagens significativas, como o menor consumo de matéria prima e redução da demanda energética em sua produção, tornando o seu custo mais acessível (Almeida *et al.*, 2016).

4.3.1 Componentes do sistema

O sistema é composto por diversos componentes como o painel, o inversor e a bateria, os principais, que, quando integrados corretamente, permitem a conversão da radiação solar em energia elétrica utilizável para residências, empresas e indústrias (Almeida *et al.*, 2016).

O componente mais conhecido de um sistema de energia solar é o painel fotovoltaico, que é composto por um conjunto de células fotovoltaicas conectadas entre si, seja em série ou em paralelo, que fornecem tensões e correntes. Esse conjunto de módulos é denominado gerador fotovoltaico e representa a etapa inicial do sistema, sendo o principal responsável em captar a irradiação solar e converter em energia elétrica (Almeida *et al.*, 2016). A Figura 9 ilustra o diagrama de um módulo fotovoltaico plano, constituído por células de silício monocristalino.

Figura 9 - Camadas do painel fotovoltaico.



Fonte: Sunergia, 2024.

Diante das camadas do painel o vidro de alta transmissão permite a entrada da radiação solar e protege o sistema, enquanto o encapsulante em EVA garante a fixação e o isolamento das células fotovoltaicas, responsáveis pela geração de energia elétrica. Na parte posterior, o backsheet atua como proteção contra umidade e agentes externos. O conjunto é envolvido por uma moldura de alumínio anodizado, que confere resistência, e possui uma caixa de junção para a conexão elétrica do sistema (Sunergia, 2024).

4.3.1.2. Inversor

É um equipamento que tem a função de converter a energia gerada pelos painéis de corrente contínua para corrente alternada. Esse dispositivo também garante a segurança do sistema e mede a quantidade de energia produzida pelos painéis solares. (Mauad; Ferreira; Trindade, 2017). Há diversos modelos de inversores disponíveis no mercado, como demonstrado na Figura 10.

Figura 10 - Variedades de inversores.



Fonte: Passos, 2021.

Pode ser definida como um dispositivo eletroquímico responsável pelo armazenamento da energia elétrica, permitindo seu uso posterior em momentos em que a geração de energia, como a solar, não está disponível. Ela atua como uma fonte de energia auxiliar, garantindo o fornecimento contínuo de eletricidade mesmo durante interrupções no sistema principal ou em horários sem a radiação solar (Almeida, *et al.* 2016).

4.3.2 Tipos de sistemas

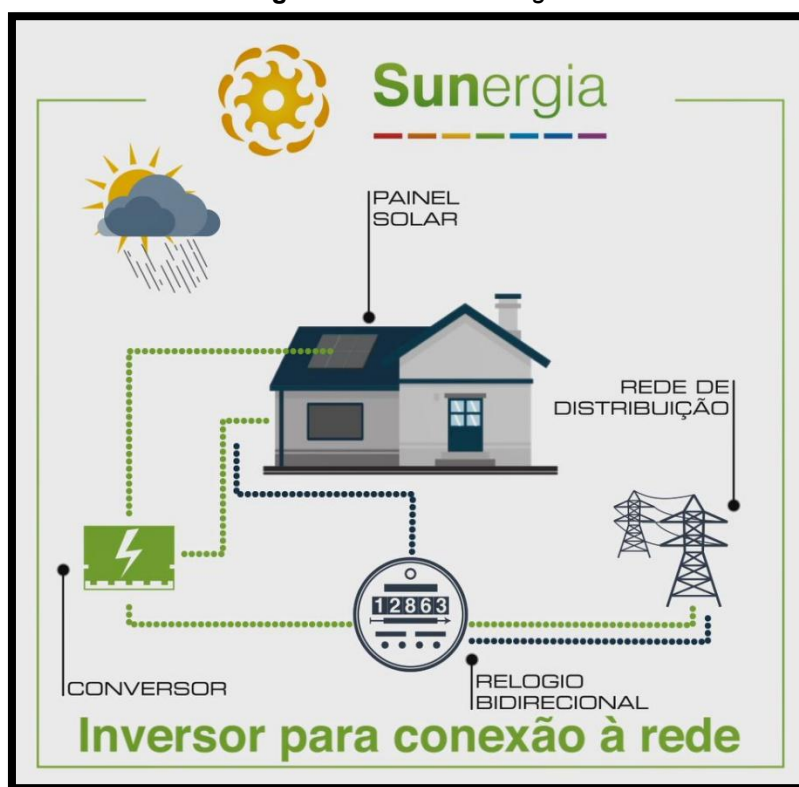
Os sistemas podem ser classificados em *on-grid* e *off-grid*, em função das características e componentes específicos para geração e consumo.

4.3.2.1. *On-grid*

No sistema *on-grid*, a geração de energia está conectada à rede elétrica pública, permitindo que a energia produzida pelos painéis seja injetada na rede e convertido em créditos energéticos. Esse sistema não necessita de bateria, pois toda a energia gerada é consumida diretamente pelas cargas ou é injetada na rede elétrica,

é possível ver o esquema deste sistema na Figura 11, ilustrada abaixo (Bortoloto, et al., 2017).

Figura 11 - Sistema *on-grid*.

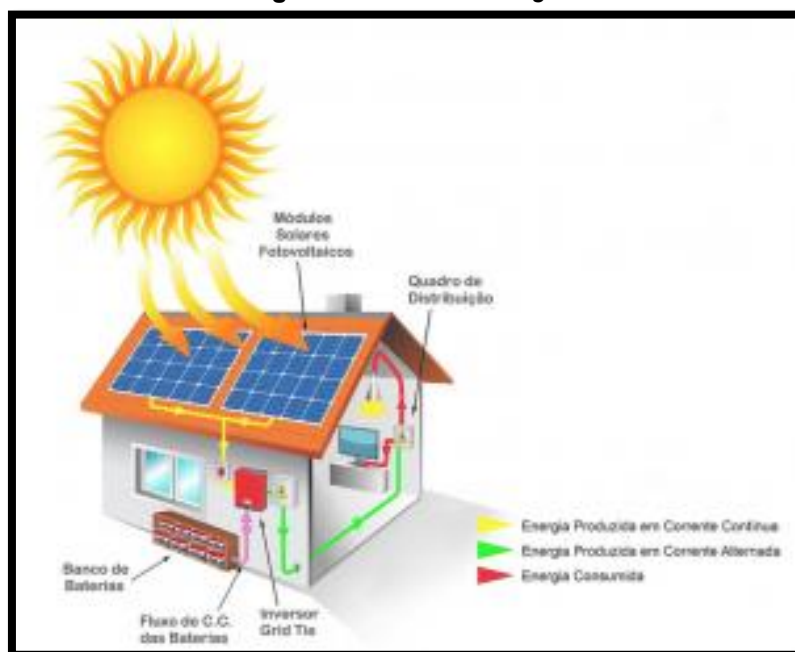


Fonte: Sunergia, 2019.

4.3.2.2. *Off-grid*

O sistema *off-grid*, também chamado de sistema autônomo, foi desenvolvido para operar sem a dependência da rede elétrica convencional. Nesse tipo de sistema, um controlador de carga direciona a energia gerada para um banco de baterias, ou para um inversor de tensão, nesses instrumentos são armazenadas a energia produzida e garantir que o consumidor terá energia mesmo em dias que não tem sol ou no período a noite. Nesses momentos, o banco de baterias fornece a energia necessária para o inversor e para os aparelhos que estão conectados ao sistema, exemplificado na Figura 12 (Nascimento, 2019).

Figura 12 - Sistema *off-grid*.



Fonte: Solis Smart, 2023.

Em suma, a escolha entre os sistemas *on-grid* e *off-grid* deve considerar fatores como a disponibilidade da rede elétrica pública e a necessidade de armazenamento de energia. Enquanto o sistema *on-grid* permite o retorno de energia para a rede pública reduzindo assim os custos com eletricidade, o sistema *off-grid* proporciona autonomia energética, sendo ideal para locais isolados.

Dessa forma, entender as características e os componentes de cada sistema é essencial para garantir eficiência e sustentabilidade na geração de energia solar.

4.3.3 Processo de instalação

A etapa prática da instalação começa com a fixação da estrutura de suporte, geralmente de alumínio ou aço, sobre o telhado, em residenciais, ou em estrutura em solo, geralmente em áreas rurais. Depois, os módulos fotovoltaicos são instalados e conectados em série e/ou paralelo, os cabos utilizados devem ser apropriados para corrente contínua (CC) e resistentes à radiação UV (ELETROBRAS, 2014).

Após isso, é realizada a instalação do inversor, equipamento responsável por converter a corrente contínua, gerada pelos painéis, em corrente alternada (CA), compatível com os aparelhos elétricos e a rede da concessionária. O sistema, então,

é interligado ao quadro de distribuição, com os devidos dispositivos de proteção (Alves, 2019).

Por fim, o sistema passa por uma vistoria final e deve ser homologado junto à concessionária de energia, no caso do estado do Paraná é a COPEL, para que o excedente gerado possa ser injetado na rede elétrica e convertido em créditos energéticos, conforme a Resolução Normativa N° 1.059/2023 da ANEEL.

A instalação de sistemas fotovoltaicos exige profissionais capacitados e deve seguir todas as normas técnicas e de segurança elétrica, garantindo eficiência energética, durabilidade e sustentabilidade ambiental.

4.4 CRESCIMENTO DA ENERGIA SOLAR

Segundo Mendonça (2024), a energia solar tem se destacado significativamente no Brasil, alcançando mais de 34 Gigawatt (GW) de capacidade instalada e representando mais de 15% da matriz energética do país. A geração distribuída, que inclui sistemas menores em residências e comércios, também contribui de forma relevante para este total.

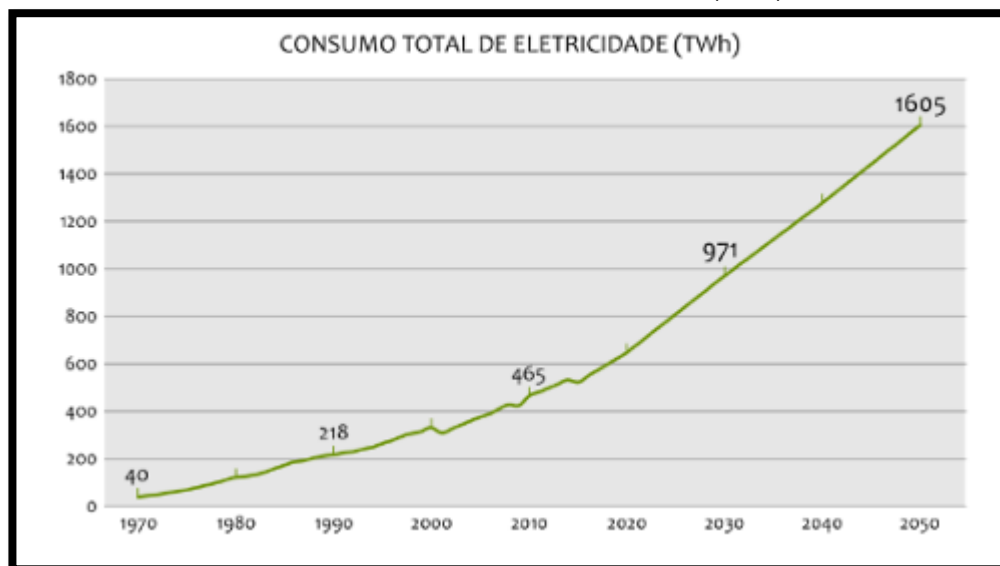
O ano de 2019 marcou o início de um crescimento acelerado da energia solar no Brasil. Atualmente esse crescimento permanece, muito por conta da popularização das placas solares em residências e comércios. Essas instalações são responsáveis, pela maior parte, da energia gerada por essa fonte no Brasil, o que mostra o quão relevante a energia solar se tornou. Um dos grandes benefícios dessa forma de geração é que ela é descentralizada, ou seja, não gera custos para o governo, na verdade, ele ainda se beneficia ao receber a energia produzida por essas instalações conectadas à rede elétrica (Mendonça, 2024).

De acordo com os dados da ANEEL (2025), a adesão aos sistemas de micro e minigeração distribuída de energia elétrica teve um crescimento significativo no ano de 2024, quando houve uma ampliação de 8.845,5 Megawatt (MW) de potência. No período, foram instalados 782.897 sistemas de MMGD no país, dos quais a grande maioria (782.864) é composta por painéis solares fotovoltaicos.

Além disso, o número de unidades consumidoras que utilizam os excedentes e créditos da energia gerada também aumentou ao longo do ano. O Gráfico 1 ilustra a projeção realizada pelo Ministério de Minas Energia, que, com base na série histórica

do consumo de eletricidade no Brasil, estima um aumento de aproximadamente 200% na demanda elétrica até 2050 (Ferreira *et al.*, 2021).

Gráfico 1 - Consumo total de eletricidade no Brasil (TWh) entre 1970 e 2050.



Fonte: Ferreira *et al.*, 2021.

Atualmente, o Brasil possui 3,1 milhões de sistemas conectados à rede de distribuição de energia elétrica, totalizando aproximadamente 35,6 GW de potência instalada. Isso representa um crescimento de 4,7% entre 2024 e o início do primeiro bimestre de 2025. Esse avanço foi impulsionado, em grande parte, pelo aumento das instalações fotovoltaicas em janeiro de 2025, quando um número significativo de novos sistemas entrou em operação, refletindo a crescente adesão à geração distribuída e os incentivos para a energia solar do país (ANEEL, 2025).

Em suma, a energia solar fotovoltaica está em direcionamento de expansão no Brasil, diversificando-se e se consolidando como uma alternativa viável. Esse crescimento é impulsionado por diversos fatores, como a redução dos preços dos equipamentos, o crescente interesse dos investidores, os avanços tecnológicos e as políticas de incentivo. Todos esses elementos vêm contribuindo para fortalecer a energia solar dentro da matriz energética nacional, tornando-se uma opção cada vez mais acessível e sustentável (Mendonça, 2024).

4.5 CUSTO BENEFÍCIO

No Brasil, o incentivo a geração distribuída de energia renovável ocorre por meio de regulamentações, benefícios fiscais, isenções tributárias e financiamentos bancários. Com o objetivo de fortalecer esse setor, o governo federal lançou, em 2015, o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), consolidando políticas voltadas à expansão e eficiência do uso do sol como fonte energética (Pereira, 2019).

De acordo com Castro (2016), o ProGD, tem o objetivo de promover o crescimento da geração de energia elétrica de forma distribuída, utilizando fontes renováveis em residências, indústrias, entre outros. Essa é uma tendência global e tem se mostrado uma maneira importante de ampliar e diversificar a oferta de energia.

Entre as iniciativas regulatórias, destaca-se a criação da tarifa branca pela ANEEL, por meio da Resolução Normativa nº 733/2016, que estabelece valores reduzidos para o consumo de eletricidade em períodos de baixa demanda, enquanto nos horários de maior consumo as tarifas são mais elevadas, beneficiando especialmente empresas que adaptam seu uso de energia nesse modelo (Mendonça, 2024).

Dessa forma, tanto o consumo direto quanto ao do retorno na rede podem representar uma economia em relação ao modelo tarifário convencional. Além disso, essa política estimula mudanças no padrão do consumo, incentivando o uso da eletricidade em horários estratégicos (Mendonça, 2024).

4.6 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTAVEL

Segundo Da Silva (2018), Agenda 2030 para Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) foi aprovada em dezembro de 2015 pela Assembleia Geral das Nações Unidas. E serve como um guia de ações estratégicas para que os 193 países que a apoiaram possam alcançar um crescimento econômico, social e ambiental mais sustentável.

Essa agenda inclui dezessete objetivos principais, chamados Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), o foco principal é colocar a dignidade e a igualdade das pessoas no centro do desenvolvimento. Neste trabalho, será dada

ênfase aos ODS 7 e ODS 13 que tratam diretamente de questões relacionadas a energia limpa, industrialização sustentável, redução das desigualdades, urbanização responsável e ações contra as mudanças climáticas (Da Silva, 2018)

O objetivo da ODS 7 é garantir que todas as pessoas tenham acesso a uma energia que seja barata, sustentável e renovável. Isso significa promover o acesso universal a energia limpa para todos, preferencialmente proveniente de fontes renováveis (Gomes; Ferreira, 2018).

A ODS 13, realça a importância de ações urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos, destacando a necessidade de fortalecer a resiliência e a capacidade de adaptação dos países aos riscos do clima e implementar políticas nacionais específicas para lidar com as mudanças do clima. Outro objetivo é garantir acesso universal à energia limpa, acessível e sustentável, promovendo o uso de fontes renováveis com o apoio da cooperação internacional na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias (Gomes; Ferreira, 2018).

5 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido por meio de uma abordagem quantitativa e descritiva, com o objetivo de analisar o desempenho energético de um sistema fotovoltaico instalado em uma edificação residencial unifamiliar localizada no município de São Miguel do Iguaçu – Paraná. A pesquisa contemplou a avaliação da geração de energia elétrica ao longo de um período de 12 meses, considerando as variações sazonais de produção energética, o consumo da edificação e a contribuição ambiental do sistema por meio da redução estimada das emissões de dióxido de carbono (CO₂).

A metodologia foi estruturada em etapas, envolvendo o levantamento das características da edificação e do sistema fotovoltaico, coleta de dados de geração e consumo energético, análise comparativa entre a energia produzida e consumida, além da estimativa dos benefícios econômicos e ambientais decorrentes da utilização da energia solar fotovoltaica.

5.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DA EDIFICAÇÃO

O estudo foi realizado em uma edificação residencial unifamiliar localizada na região central do município de São Miguel do Iguaçu, situado na região Oeste do estado do Paraná.

Segundo Limberger et al. (2007), o clima predominante na região é classificado como subtropical úmido, caracterizado por verões quentes e elevada incidência de precipitações, enquanto os períodos de inverno apresentam temperaturas mais amenas e redução relativa da umidade. A temperatura média anual varia entre 18 °C e 22 °C, condições que favorecem a incidência de radiação solar ao longo do ano e contribuem para o desempenho de sistemas fotovoltaicos.

A Figura 13 apresenta a localização da edificação analisada, destacando a implantação da residência objeto deste estudo.

Figura 13 - Localização da residência unifamiliar.



Fonte: Satélite Google Maps 2026.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO

A edificação analisada neste estudo consiste em uma residência unifamiliar de padrão construtivo médio, localizada na região central do município de São Miguel do Iguaçu – Paraná. O imóvel possui área total de lote correspondente a 350 m² e área construída de 201,96 m².

A residência é ocupada por três moradores e apresenta características compatíveis com edificações residenciais urbanas de médio porte. A edificação é composta por três quartos, duas salas, cozinha, área de lavanderia, escritório, porão, quatro banheiros e área de lazer contendo piscina.

As características construtivas e funcionais da residência influenciam diretamente o perfil de consumo energético da edificação, especialmente em função da utilização contínua de equipamentos eletrodomésticos, sistemas de iluminação, climatização, bombeamento e demais dispositivos elétricos necessários para o funcionamento cotidiano da residência.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTÁICO

A edificação analisada possui um sistema de microgeração distribuída conectado à rede elétrica convencional (on-grid), destinado à compensação parcial do consumo energético residencial por meio da conversão da radiação solar em energia elétrica.

O sistema fotovoltaico foi instalado em fevereiro de 2020 por empresa especializada da região, apresentando potência instalada total de 4,0 kW. O sistema é composto por 18 módulos fotovoltaicos conectados a um inversor da marca Renovigi, modelo RENO-4K-HC, responsável pela conversão da corrente contínua (CC), produzida pelos módulos, em corrente alternada (CA) compatível com a rede elétrica da concessionária.

De acordo com as especificações técnicas do fabricante, o inversor apresenta potência nominal de saída de 4000 W em corrente alternada, potência máxima de 4400 W e tensão nominal de operação de 220 Vca, operando em frequência de 60 Hz. O equipamento possui grau de proteção IP66, característica que garante resistência à poeira e à umidade, permitindo operação adequada em diferentes condições climáticas.

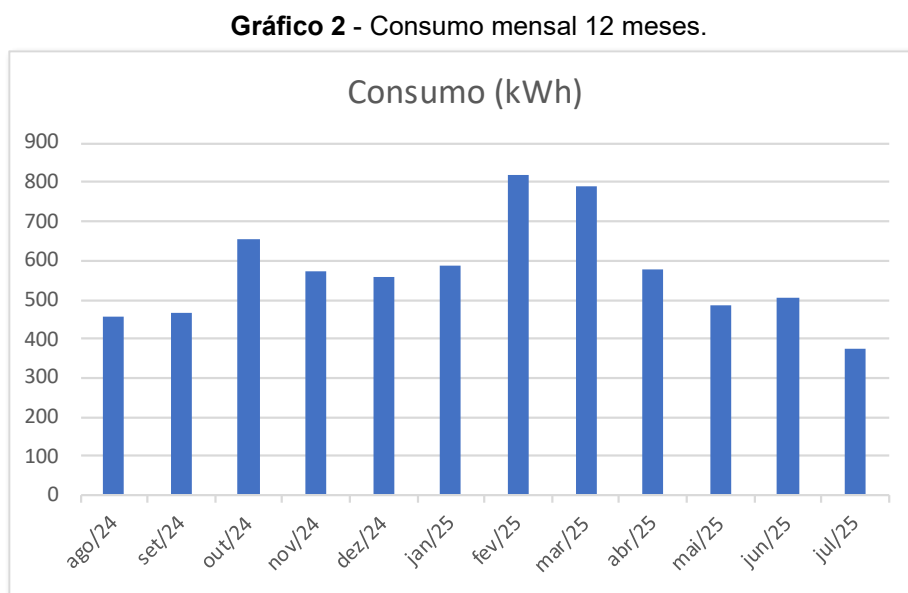
O equipamento apresenta faixa de tensão MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) entre 90 e 520 V, permitindo o rastreamento contínuo do ponto de máxima potência dos módulos fotovoltaicos e contribuindo para a otimização da geração energética ao longo do dia.

A coleta dos dados referentes à geração energética foi realizada por meio da plataforma de monitoramento do sistema fotovoltaico, complementada pelas informações presentes nas faturas de energia elétrica disponibilizadas pela concessionária COPEL. Os dados analisados compreenderam o período entre agosto de 2024 e julho de 2025.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O levantamento dos dados energéticos da edificação foi realizado por meio da análise das faturas de energia elétrica disponibilizadas pela concessionária Companhia Paranaense de Energia (COPEL), considerando um período de 12 meses compreendido entre agosto de 2024 e julho de 2025.

Os dados obtidos permitiram avaliar o comportamento do consumo energético residencial ao longo do período analisado, identificando variações mensais associadas às mudanças sazonais, às condições climáticas e ao perfil de ocupação da residência, conforme apresentado no Gráfico 2.



Fonte: Autor, 2026.

O maior consumo energético foi registrado no mês de fevereiro de 2025, totalizando 821 kWh, enquanto o menor consumo ocorreu em julho de 2025, com 376 kWh. O consumo médio anual da residência foi de aproximadamente 571 kWh/mês.

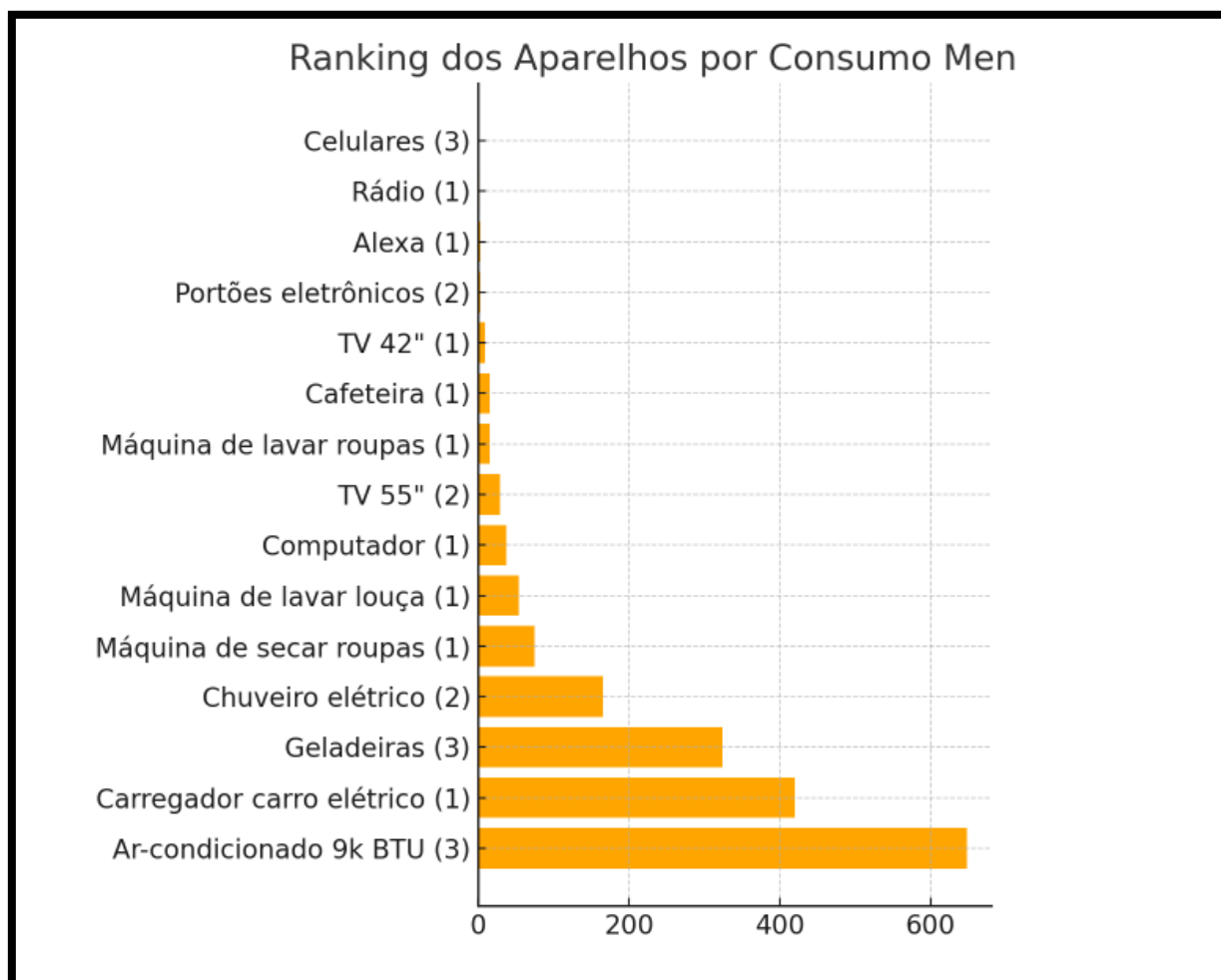
O aumento expressivo observado nos meses de verão está diretamente relacionado à maior permanência de moradores e hóspedes na residência durante o período de férias, ocasionando utilização mais intensa de equipamentos eletrodomésticos e sistemas de climatização. Esse comportamento é característico de regiões subtropicais do Oeste do Paraná, onde as elevadas temperaturas influenciam diretamente o desempenho térmico das edificações, aumentando significativamente a

demanda por sistemas de refrigeração artificial e, conseqüentemente, o consumo energético residencial.

Com o objetivo de compreender o perfil de consumo energético da edificação, foi realizada uma estimativa da participação dos principais equipamentos eletrodomésticos presentes na residência, considerando a potência nominal dos aparelhos e o tempo médio diário de utilização.

Os resultados obtidos, apresentados no Gráfico 3, demonstraram que os maiores responsáveis pelo consumo energético residencial foram os sistemas de ar-condicionado, o carregador do veículo elétrico e os equipamentos de refrigeração.

Gráfico 3 - Ranking dos Aparelhos.

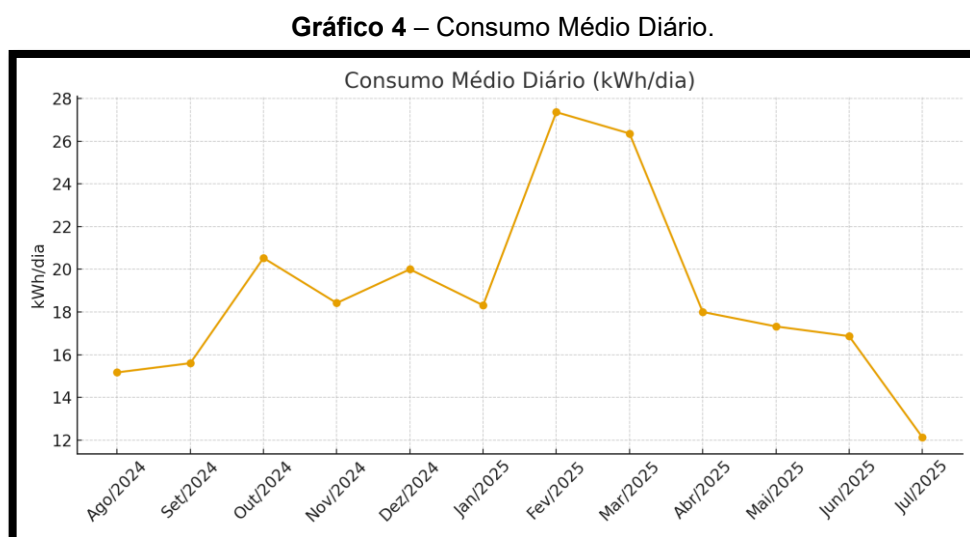


Fonte: Autor, 2026.

A análise permitiu identificar a influência direta dos hábitos de consumo e do tempo de funcionamento dos equipamentos sobre a demanda energética total da residência, evidenciando a importância de estratégias de eficiência energética associadas à geração fotovoltaica.

Além da análise do consumo energético mensal, foi realizado o cálculo do consumo médio diário da edificação, considerando o número de dias faturados em cada período analisado. Essa abordagem permite avaliar de forma mais precisa o comportamento energético da residência ao longo do ano, minimizando distorções associadas às diferenças no número de dias entre os meses.

O Gráfico 4 apresenta a variação do consumo médio diário da edificação entre agosto de 2024 e julho de 2025.



Fonte: Autor, 2026.

Os resultados demonstram significativa variação do consumo energético diário ao longo do período analisado, evidenciando influência direta das condições climáticas, do perfil de ocupação da residência e da utilização dos equipamentos eletrodomésticos.

Os maiores consumos médios diários foram observados nos meses de fevereiro e março de 2025, atingindo aproximadamente 27 kWh/dia e 26 kWh/dia, respectivamente. Esse comportamento está associado principalmente ao aumento da utilização de sistemas de climatização durante os períodos de temperaturas mais

elevadas, além da maior permanência de moradores e visitantes na residência durante o verão.

Por outro lado, o menor consumo médio diário foi registrado em julho de 2025, com aproximadamente 12 kWh/dia, refletindo a redução da demanda energética da residência durante o período de inverno e menor utilização de equipamentos de refrigeração.

Os dados obtidos evidenciam a importância de estratégias voltadas à eficiência energética em edificações residenciais, especialmente em regiões de elevada variabilidade térmica, contribuindo para o desenvolvimento de construções mais sustentáveis e energeticamente eficientes.

Além disso, os resultados evidenciam a importância do desempenho térmico e da eficiência energética em edificações residenciais, especialmente em regiões de clima subtropical, nas quais a necessidade de climatização artificial exerce influência significativa sobre o consumo energético. Nesse contexto, os resultados observados apresentam relação direta com os princípios estabelecidos pela ABNT NBR 15575, norma brasileira de desempenho de edificações habitacionais, que estabelece critérios relacionados ao conforto térmico, desempenho energético e qualidade ambiental das edificações residenciais.

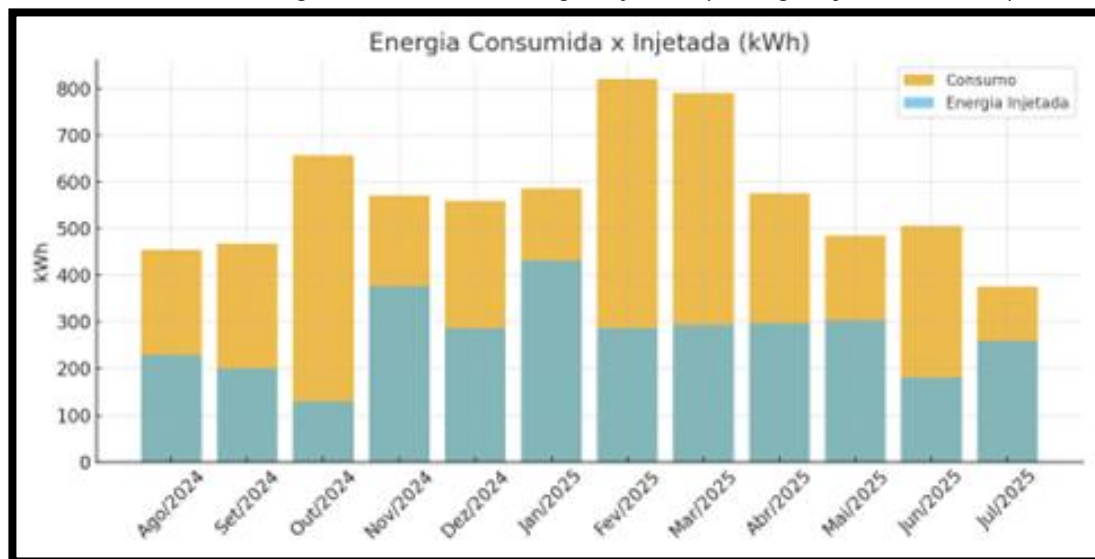
Estudos recentes destacam que a NBR 15575 tem sido amplamente utilizada em análises de desempenho térmico e eficiência energética de edificações, especialmente por meio de simulações computacionais e avaliações relacionadas ao comportamento térmico das construções frente às condições climáticas locais (Gonçalves et al., 2024; Vettorazzi et al., 2025).

6.1 ANÁLISE COMPARATIVA DE CONSUMO DE ENERGIA

Para esta análise, foram considerados os valores mensais de consumo de energia elétrica da edificação, expressos em quilowatt-hora (kWh), bem como os valores referentes à energia injetada na rede elétrica pelo sistema fotovoltaico, representando a geração excedente compensada junto à concessionária de energia elétrica.

O Gráfico 5 apresenta a comparação entre a energia consumida pela residência e a energia injetada na rede ao longo do período analisado, compreendido entre agosto de 2024 e julho de 2025.

Gráfico 5 - Energia Consumida x Energia Injetada (Microgeração Distribuída)



Fonte: Autor, 2026.

A partir da análise dos dados, observa-se que a energia injetada apresentou variações ao longo dos meses, refletindo diretamente o comportamento do sistema fotovoltaico frente às condições climáticas e aos índices de radiação solar disponíveis em cada período do ano.

Em determinados meses, a energia injetada representou parcela significativa da demanda energética da edificação, demonstrando a capacidade do sistema em reduzir a dependência da energia proveniente da rede distribuidora convencional. Destaca-se o mês de janeiro de 2025, no qual a energia injetada atingiu 432 kWh, correspondendo aproximadamente a 73% do consumo mensal da residência. Esse resultado evidencia elevado desempenho do sistema fotovoltaico durante o período de maior incidência solar e maior disponibilidade de irradiância.

Por outro lado, no mês de outubro de 2024 foi registrada a menor contribuição relativa do sistema, com injeção de aproximadamente 130 kWh, representando cerca de 19% do consumo energético mensal da edificação. Esse comportamento pode estar associado à redução temporária da radiação solar incidente, influenciada por condições climáticas como aumento da nebulosidade e ocorrência de precipitações.

Além disso, observa-se que mesmo em períodos de elevada geração fotovoltaica, o consumo energético da residência permaneceu relativamente elevado, especialmente nos meses de verão, em função da maior utilização de sistemas de climatização e equipamentos eletrodomésticos.

De maneira geral, os resultados demonstram que o sistema fotovoltaico contribuiu significativamente para a compensação parcial do consumo energético da residência ao longo de todo o período avaliado, evidenciando a viabilidade da microgeração distribuída em edificações residenciais urbanas.

Os resultados observados neste tópico servem de base para a análise da influência sazonal sobre o comportamento do consumo energético e da geração fotovoltaica, discutida na seção seguinte.

6.2 INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE NA GERAÇÃO E CONSUMO

A análise sazonal dos dados obtidos entre agosto de 2024 e julho de 2025 demonstrou que tanto a geração de energia fotovoltaica quanto a demanda energética da edificação sofreram influência direta das condições climáticas e das mudanças de estação ao longo do ano. Estudos recentes indicam que a irradiância solar, a temperatura ambiente e a duração diária da incidência solar representam os principais fatores responsáveis pelas variações sazonais observadas na geração fotovoltaica e no comportamento do consumo residencial de eletricidade (Petridis et al., 2026; Avli Firiş; Boynuegri, 2025).

Durante o verão, compreendido entre os meses de dezembro e março, foi observado o maior consumo energético da residência, com destaque para fevereiro de 2025, no qual o consumo atingiu 821 kWh. Apesar de janeiro de 2025 ter registrado a maior geração de energia do período analisado, com 432 kWh de energia injetada na rede, a elevada utilização de sistemas de climatização e equipamentos eletrodomésticos resultou em maior demanda energética da edificação. Segundo Hu et al. (2023) e Teng et al. (2022), temperaturas elevadas estão diretamente associadas ao aumento do consumo energético residencial devido à utilização intensiva de aparelhos de ar-condicionado, especialmente em regiões de clima subtropical e urbano.

Os resultados observados neste estudo corroboram o comportamento sazonal descrito por Herodotou et al. (2026), os quais relatam que sistemas fotovoltaicos apresentam elevada geração durante os meses de maior incidência solar, embora o aumento simultâneo da demanda energética possa reduzir parcialmente os índices de compensação energética residencial.

No período de outono, observou-se redução gradual tanto do consumo quanto da geração de energia. O consumo residencial apresentou diminuição de 576 kWh em abril para 506 kWh em junho, enquanto a energia injetada na rede registrou redução progressiva, atingindo 181 kWh ao final da estação. Esse comportamento está associado à redução gradual da irradiância solar e da duração diária de insolação ao longo do período. Huang et al. (2024) destacam que alterações sazonais na altura solar e nas horas de incidência luminosa influenciam diretamente a capacidade de geração dos sistemas fotovoltaicos.

Durante o inverno, verificou-se a menor demanda energética anual da residência, com destaque para julho de 2025, no qual o consumo atingiu 376 kWh. Mesmo com redução da radiação solar incidente característica do período, o sistema fotovoltaico apresentou desempenho satisfatório, alcançando índice de compensação energética aproximado de 69% no referido mês. Resultados semelhantes foram observados por Sakib et al. (2026), os quais identificaram que sistemas fotovoltaicos residenciais podem manter desempenho satisfatório mesmo em períodos de menor irradiância solar, especialmente em cenários de menor demanda energética residencial.

Na primavera, os resultados indicaram maior instabilidade na geração fotovoltaica, especialmente no mês de outubro de 2024, que apresentou o menor valor de energia injetada na rede ao longo do período analisado. Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento da nebulosidade e à variabilidade climática característica da estação. Estudos conduzidos por Han e Li (2024) demonstram que a nebulosidade e as oscilações de irradiância solar exercem influência significativa sobre a eficiência dos módulos fotovoltaicos, ocasionando variações temporárias na geração de energia.

De forma geral, os resultados evidenciam que o desempenho do sistema fotovoltaico está diretamente associado às condições meteorológicas e ao perfil de consumo da edificação. Ainda assim, mesmo diante das oscilações sazonais

observadas, o sistema contribuiu significativamente para a redução da demanda de energia elétrica proveniente da rede distribuidora, reforçando a viabilidade da microgeração distribuída em edificações residenciais urbanas.

6.3 VIABILIDADE FINANCEIRA E COMPENSAÇÃO ENERGÉTICA

A análise econômica do sistema fotovoltaico foi realizada com base nas faturas de energia elétrica fornecidas pela concessionária COPEL, considerando o período entre agosto de 2024 e julho de 2025. Foram avaliados parâmetros relacionados ao consumo energético, valor total das faturas, tributos incidentes, energia injetada na rede e percentual de compensação energética mensal.

Com o objetivo de analisar o comportamento energético e econômico da edificação ao longo do período estudado, foram levantados dados mensais referentes ao consumo de energia elétrica, valores faturados, tributos incidentes e energia injetada na rede elétrica por meio do sistema de microgeração distribuída.

A Tabela 1 apresenta os dados obtidos a partir das faturas de energia elétrica disponibilizadas pela concessionária COPEL, considerando o período entre agosto de 2024 e julho de 2025.

Tabela 1 - Dados mensais de consumo, faturamento e compensação energética da edificação residencial.

Mês/Ano	Consumo (kWh)	Valor (R\$)	Dias	ICMS (R\$)	COFINS (R\$)	PIS (R\$)	Energia Injetada (kWh)	Consumo diário (kWh/dia)	Custo médio (R\$/kWh)	% ICMS	% COFINS	% PIS	% Impostos Totais	% Energia Compensada
Ago/2024	455	R\$ 248.56	30	R\$ 71.92	R\$ 7.08	R\$ 1.54	230	15.17	R\$ 0.546	28.9%	2.8%	0.6%	32.4%	50.5%
Set/2024	468	R\$ 288.84	30	R\$ 76.66	R\$ 8.51	R\$ 1.86	200	15.60	R\$ 0.617	26.5%	2.9%	0.6%	30.1%	42.7%
Out/2024	657	R\$ 530.88	32	R\$ 114.15	R\$ 18.46	R\$ 4.02	130	20.53	R\$ 0.808	21.5%	3.5%	0.8%	25.7%	19.8%
Nov/2024	571	R\$ 257.95	31	R\$ 95.14	R\$ 7.06	R\$ 1.52	377	18.42	R\$ 0.452	36.9%	2.7%	0.6%	40.2%	66.0%
Dez/2024	560	R\$ 303.81	28	R\$ 90.34	R\$ 11.82	R\$ 2.56	286	20.00	R\$ 0.543	29.7%	3.9%	0.8%	34.5%	51.1%
Jan/2025	586	R\$ 196.45	32	R\$ 93.40	R\$ 6.26	R\$ 1.35	432	18.31	R\$ 0.335	47.5%	3.2%	0.7%	51.4%	73.7%
Fev/2025	821	R\$ 514.06	30	R\$ 129.09	R\$ 17.71	R\$ 3.85	286	27.37	R\$ 0.626	25.1%	3.4%	0.7%	29.3%	34.8%
Mar/2025	791	R\$ 482.12	30	R\$ 123.71	R\$ 15.05	R\$ 3.26	293	26.37	R\$ 0.610	25.7%	3.1%	0.7%	29.5%	37.0%
Abr/2025	576	R\$ 300.87	32	R\$ 90.01	R\$ 8.29	R\$ 1.80	297	18.00	R\$ 0.522	29.9%	2.8%	0.6%	33.3%	51.6%
Mai/2025	485	R\$ 226.43	28	R\$ 77.73	R\$ 5.84	R\$ 1.26	304	17.32	R\$ 0.467	34.3%	2.6%	0.6%	37.5%	62.7%
Jun/2025	506	R\$ 337.56	30	R\$ 83.60	R\$ 10.28	R\$ 2.22	181	16.87	R\$ 0.667	24.8%	3.0%	0.7%	28.5%	35.8%
Jul/2025	376	R\$ 173.88	31	R\$ 64.29	R\$ 4.12	R\$ 0.90	260	12.13	R\$ 0.462	37.0%	2.4%	0.5%	39.9%	69.1%

Fonte: Autor (2026)

Os resultados demonstraram significativa variação nos custos mensais de energia elétrica ao longo do período analisado, refletindo diretamente o comportamento sazonal do consumo residencial e da geração fotovoltaica.

O maior custo mensal foi registrado em outubro de 2024, no qual a fatura atingiu R\$ 530,88, associada ao elevado consumo energético da residência (657 kWh) e à baixa compensação energética observada no período, correspondente a aproximadamente 19,8%.

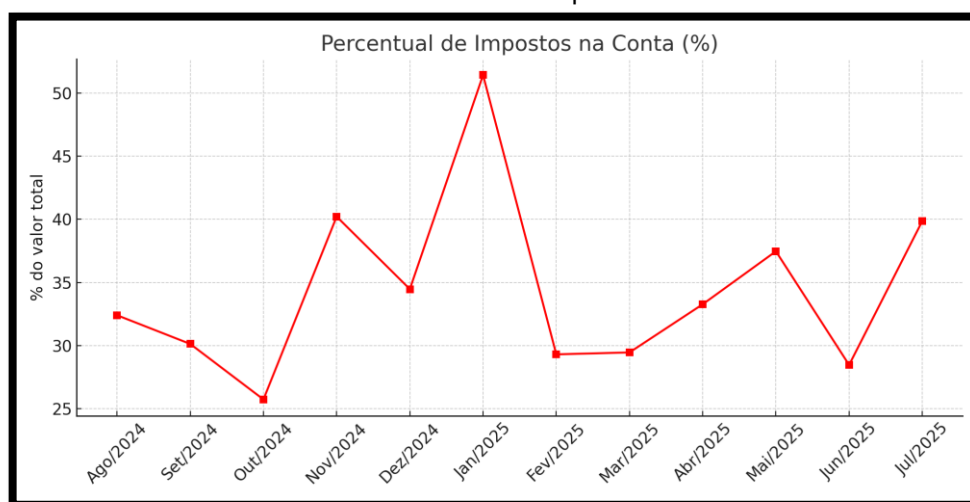
Em contrapartida, janeiro de 2025 apresentou o menor custo médio por kWh consumido, equivalente a R\$ 0,335/kWh, resultado diretamente relacionado à elevada geração fotovoltaica e ao maior percentual de compensação energética registrado no período analisado (73,7%).

A análise dos índices de compensação energética evidencia que o sistema fotovoltaico contribuiu de forma significativa para a redução da dependência da rede elétrica convencional. Os maiores índices de compensação foram observados em janeiro de 2025 (73,7%), julho de 2025 (69,1%) e novembro de 2024 (66,0%), demonstrando elevada eficiência do sistema em períodos de menor consumo relativo da edificação.

Além da economia energética proporcionada pela microgeração distribuída, observou-se elevada participação dos tributos na composição das faturas de energia elétrica. O ICMS apresentou os maiores percentuais tributários ao longo do período analisado, atingindo valores superiores a 40% em determinados meses quando considerados conjuntamente COFINS e PIS.

Com o objetivo de avaliar a influência da carga tributária sobre os custos associados ao consumo de energia elétrica residencial, foi analisado o percentual mensal de tributos incidentes nas faturas de energia elétrica da edificação.

O Gráfico 6 apresenta a variação percentual da carga tributária total incidente sobre as faturas de energia elétrica ao longo do período analisado.

Gráfico 6- Percentual de Impostos na conta.

Fonte: Autor, 2026.

Os resultados demonstram elevada participação dos tributos sobre o valor total das faturas de energia elétrica da residência ao longo do período analisado, evidenciando o impacto significativo da carga tributária sobre o custo final da energia elétrica residencial.

O maior percentual tributário foi observado em janeiro de 2025, atingindo aproximadamente 51%, enquanto os menores percentuais ocorreram nos meses de outubro de 2024 e junho de 2025, com valores próximos de 26% e 28%, respectivamente.

Observa-se que o ICMS representou a principal parcela tributária incidente sobre as faturas de energia elétrica, seguido pelos tributos federais COFINS e PIS. Esses resultados evidenciam que uma parcela significativa do valor pago mensalmente pelo consumidor residencial está associada à tributação incidente sobre o consumo energético.

Além disso, os resultados reforçam a relevância econômica da microgeração distribuída como alternativa para mitigação parcial dos custos associados à energia elétrica, especialmente em cenários de elevada carga tributária sobre o setor energético brasileiro.

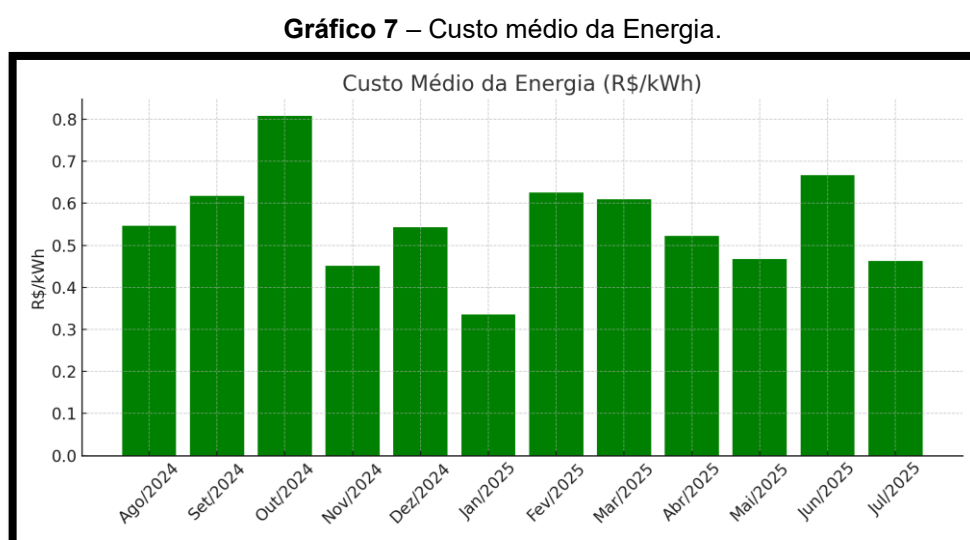
Esses resultados evidenciam o impacto significativo da carga tributária sobre o custo da energia elétrica residencial, reforçando a relevância econômica da microgeração distribuída como alternativa para mitigação parcial desses custos.

Os dados apresentados também demonstram a influência direta das variações sazonais sobre o comportamento energético da residência e sobre o desempenho do

sistema fotovoltaico. Observa-se que períodos de maior consumo energético coincidiram com meses de maior utilização de equipamentos de climatização, enquanto os maiores índices de compensação energética ocorreram em períodos de maior disponibilidade de radiação solar.

Com o objetivo de avaliar a variação econômica do consumo energético ao longo do período analisado, foi calculado o custo médio da energia elétrica em reais por quilowatt-hora (R\$/kWh), considerando os valores totais faturados mensalmente pela concessionária de energia elétrica.

O Gráfico 7 apresenta a variação do custo médio da energia elétrica ao longo do período compreendido entre agosto de 2024 e julho de 2025.



Fonte: Autor, 2026.

Os resultados demonstram significativa variação do custo médio da energia elétrica ao longo do período analisado, refletindo diretamente a influência da compensação energética proporcionada pelo sistema fotovoltaico e das oscilações do consumo residencial.

O maior custo médio foi observado no mês de outubro de 2024, atingindo aproximadamente R\$ 0,81/kWh, resultado associado à elevada demanda energética da residência e ao menor percentual de compensação energética registrado no período.

Por outro lado, janeiro de 2025 apresentou o menor custo médio da energia elétrica, correspondente a aproximadamente R\$ 0,34/kWh. Esse comportamento está

diretamente relacionado à elevada geração fotovoltaica observada no período, bem como ao maior índice de energia compensada ao longo do ano analisado.

Os resultados evidenciam que a geração fotovoltaica exerceu influência significativa sobre a redução do custo efetivo da energia elétrica consumida pela residência, contribuindo para maior eficiência econômica do sistema de microgeração distribuída.

Resultados semelhantes têm sido reportados na literatura científica para edificações residenciais unifamiliares equipadas com sistemas fotovoltaicos. Estudos recentes demonstram que a inserção da microgeração distribuída promove significativa redução da dependência da rede elétrica convencional, além de contribuir para o aumento da autossuficiência energética residencial.

Segundo estudos conduzidos em residências unifamiliares, sistemas fotovoltaicos residenciais podem suprir entre aproximadamente 40% e 100% da demanda energética anual da edificação, dependendo das características construtivas, perfil de consumo e dimensionamento do sistema fotovoltaico (Al-Shetwi et al., 2022; Aljubran et al., 2024).

Além da redução da dependência energética, pesquisas recentes também indicam melhorias relacionadas à eficiência operacional e ao desempenho energético das residências após a instalação de sistemas fotovoltaicos. Em estudos comparativos entre residências com e sem geração fotovoltaica, observou-se aumento da autossuficiência energética, maior estabilidade do consumo residencial e redução significativa das emissões associadas ao consumo de eletricidade convencional (Marei et al., 2023; Li et al., 2025).

Por outro lado, alguns autores relatam a ocorrência do chamado efeito rebote energético, no qual residências equipadas com geração fotovoltaica passam a apresentar aumento parcial do consumo elétrico em função da percepção de menor custo da energia elétrica disponível (Aydin; Brounen; Ergün, 2023). Ainda assim, os benefícios econômicos e energéticos proporcionados pela microgeração distribuída permanecem significativamente superior, especialmente em edificações residenciais urbanas de médio padrão.

Além disso, observa-se que períodos de maior disponibilidade de radiação solar coincidiram com menores custos médios de energia, reforçando a relação direta entre desempenho fotovoltaico e economia financeira residencial.

De forma geral, os resultados indicam que a utilização do sistema fotovoltaico promoveu redução significativa dos custos associados ao consumo energético residencial, contribuindo para maior eficiência econômica da edificação e redução da dependência da energia proveniente da concessionária.

6.4 CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS E SUSTENTÁVEIS

A utilização da energia solar fotovoltaica na edificação analisada representa não apenas uma alternativa para redução dos custos com energia elétrica, mas também uma estratégia voltada à sustentabilidade ambiental e à mitigação dos impactos associados à geração convencional de energia. Estudos recentes demonstram que sistemas fotovoltaicos residenciais apresentam impactos ambientais significativamente inferiores quando comparados às fontes convencionais baseadas em combustíveis fósseis, especialmente sob a perspectiva da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Segundo Szilágyi e Gróf (2020), sistemas fotovoltaicos podem reduzir em até 75% a pegada ambiental em relação às matrizes energéticas predominantemente fósseis. Da mesma forma, Parascanu et al. (2025) relatam que a intensidade de carbono da eletricidade gerada por sistemas solares varia entre 15 e 30 gCO₂/kWh, valores consideravelmente inferiores aos observados em sistemas baseados em carvão mineral e gás natural, os quais apresentam emissões na ordem de centenas de gCO₂/kWh.

Além da redução expressiva das emissões de gases de efeito estufa, os sistemas fotovoltaicos apresentam emissão operacional praticamente nula, uma vez que não produzem poluentes atmosféricos durante sua utilização. Diferentemente das usinas termelétricas convencionais, que emitem continuamente dióxido de carbono (CO₂), óxidos de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), os impactos ambientais da energia solar concentram-se predominantemente nas etapas de fabricação dos módulos fotovoltaicos (Ormuž; Žmak; Filetin, 2024).

Mesmo considerando tais impactos iniciais, o balanço ambiental da tecnologia permanece amplamente favorável, especialmente em função do elevado tempo de vida útil dos sistemas e do rápido retorno energético dos módulos fotovoltaicos, estimado entre 1,5 e 4 anos (Ullah et al., 2025).

No contexto residencial, diversos estudos internacionais evidenciam que a adoção da energia solar fotovoltaica contribui diretamente para a redução das emissões associadas ao consumo energético urbano. Jha (2024) observou reduções entre 67,8% e 91,3% nas emissões operacionais de residências equipadas com sistemas fotovoltaicos em zonas climáticas de elevada demanda energética. Resultados semelhantes foram reportados por Rana e Pearce (2025), os quais identificaram reduções de até 89% nas emissões residenciais em edificações associadas à eletrificação e utilização de sistemas fotovoltaicos.

Apesar dos benefícios ambientais expressivos, a literatura também destaca desafios associados à expansão da tecnologia fotovoltaica, especialmente relacionados ao gerenciamento de resíduos provenientes do descarte de módulos ao final de sua vida útil e à utilização de materiais críticos durante o processo de fabricação. Hei et al. (2024) ressaltam a necessidade de desenvolvimento de políticas mais robustas voltadas à reciclagem de painéis solares, visando ampliar a sustentabilidade do setor fotovoltaico em longo prazo.

De forma geral, os resultados observados neste estudo, aliados às evidências reportadas na literatura científica, reforçam que a energia solar fotovoltaica representa uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável para edificações residenciais urbanas, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa, diversificação da matriz energética e fortalecimento das estratégias de transição para sistemas energéticos de baixo carbono.

Além dos benefícios energéticos e ambientais, a aplicação de sistemas fotovoltaicos em edificações residenciais unifamiliares também está diretamente relacionada aos princípios da construção sustentável e da eficiência energética no ambiente construído. Estudos recentes destacam que sistemas fotovoltaicos instalados em residências contribuem significativamente para o aumento da autossuficiência energética, redução da dependência da rede elétrica convencional e melhoria do desempenho ambiental das edificações (Paule et al., 2025; Dransfield; Finegan; Power, 2026).

No contexto da construção civil sustentável, tecnologias fotovoltaicas aplicadas às edificações podem ser classificadas como sistemas Building-Applied Photovoltaics (BAPV), quando instaladas posteriormente sobre a cobertura da edificação, ou Building-Integrated Photovoltaics (BIPV), quando os módulos passam a integrar

elementos construtivos da envoltória, como fachadas, coberturas e dispositivos de sombreamento (Wang et al., 2025; Yang et al., 2026).

Além da geração de energia elétrica, estudos demonstram que sistemas integrados às edificações podem contribuir para melhoria do conforto térmico, redução das cargas de resfriamento e aumento da eficiência energética predial, favorecendo o desenvolvimento de edificações de baixo consumo energético e alinhadas aos conceitos de Nearly Zero Energy Buildings (NZEB) (Siddique et al., 2023; Anjum et al., 2025).

6.5 COMPARATIVOS CO₂ CONVENCIONAL X CO₂ EM PLACAS FOTOVOLTÁICAS

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem impulsionado a busca por fontes de energia com menor emissão de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica destaca-se como uma alternativa sustentável em comparação aos sistemas convencionais de geração elétrica baseados em combustíveis fósseis. Embora os sistemas fotovoltaicos apresentem emissões associadas ao seu ciclo de vida, decorrentes principalmente das etapas de fabricação, transporte, instalação e descarte dos equipamentos, essas emissões são significativamente inferiores às observadas em tecnologias convencionais de geração de energia (HSU et al., 2012).

A Tabela 9 apresenta um comparativo das emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) reportadas na literatura para diferentes fontes de geração elétrica.

Tabela 2 - Comparativo das emissões de CO₂ entre diferentes fontes de geração elétrica

Fonte de energia	Emissão de CO₂e (g/kWh)
Fotovoltaica (mínimo reportado)	7,4
Fotovoltaica (valor mediano)	45
Fotovoltaica (máximo reportado)	83
Gás natural	450 – 670
Carvão mineral	1.001
Carvão mineral (máximo reportado)	1.689

Fonte: Adaptado de Hsu et al. (2012), Whitaker et al. (2012), O'Donoghue et al. (2014) e Zhang et al. (2023).

Os resultados demonstram uma diferença expressiva entre as tecnologias avaliadas. Considerando os valores medianos reportados na literatura, a geração fotovoltaica apresenta emissões aproximadamente 22 vezes inferiores às observadas

para sistemas movidos a carvão mineral e entre 10 e 15 vezes inferiores às registradas para sistemas baseados em gás natural. Essa diferença ocorre porque os sistemas convencionais dependem da combustão contínua de combustíveis fósseis para a produção de eletricidade, enquanto os sistemas fotovoltaicos utilizam a radiação solar como fonte primária de energia, sem emissões diretas durante a fase operacional (WHITAKER et al., 2012; O'DONOUGHUE et al., 2014).

Além do tipo de fonte energética, diversos fatores podem influenciar as emissões associadas à geração elétrica. Nos sistemas convencionais destacam-se o combustível utilizado, a eficiência da usina e as tecnologias de controle de emissões. Já nos sistemas fotovoltaicos, fatores como a tecnologia dos módulos, a irradiância solar local, a temperatura de operação e a vida útil dos equipamentos influenciam diretamente a intensidade de carbono do sistema (KANNAN et al., 2006; KAZEM et al., 2023).

Dessa forma, os resultados apresentados evidenciam que a energia fotovoltaica possui menor pegada de carbono quando comparada às fontes convencionais de geração elétrica, consolidando-se como uma importante alternativa para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a promoção da sustentabilidade no setor energético (MULVANEY, 2019; KAZEM et al., 2023).

7 CONCLUSÃO

A partir da análise das faturas de energia elétrica fornecidas pela concessionária COPEL, foi possível observar que o sistema fotovoltaico apresentou contribuição significativa na compensação do consumo energético da residência durante todo o período analisado. Os resultados demonstraram que a geração de energia variou conforme as estações do ano e as condições climáticas, apresentando melhor desempenho nos meses de maior incidência solar.

Os maiores consumos energéticos ocorreram durante o verão, principalmente devido à utilização mais intensa de aparelhos de ar-condicionado, equipamentos eletrodomésticos e maior permanência de pessoas na residência durante o período de férias. Já nos meses de inverno foram observados os menores consumos energéticos, refletindo diretamente na melhora dos índices de compensação proporcionados pelo sistema fotovoltaico.

Os resultados também evidenciaram que o desempenho do sistema está diretamente relacionado às condições meteorológicas, especialmente à disponibilidade de radiação solar e à nebulosidade ao longo do ano. Mesmo diante das oscilações sazonais observadas, o sistema apresentou desempenho satisfatório e contribuiu para a redução parcial da dependência da energia elétrica fornecida pela rede distribuidora.

Em relação aos aspectos financeiros, verificou-se redução nos custos associados ao consumo de energia elétrica, principalmente nos períodos em que houve maior geração fotovoltaica e maiores índices de compensação energética. A análise das faturas também demonstrou a elevada participação dos tributos sobre o valor final da energia elétrica residencial, evidenciando a importância da microgeração distribuída como alternativa para auxiliar na redução dos custos energéticos.

Do ponto de vista ambiental, a utilização da energia solar fotovoltaica contribui para a redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2) e para a utilização de uma fonte de energia renovável e limpa. Além disso, o estudo reforça a importância da adoção de soluções sustentáveis em edificações residenciais, tema cada vez mais presente na Engenharia Civil contemporânea.

De maneira geral, conclui-se que o sistema fotovoltaico analisado apresentou resultados positivos tanto do ponto de vista energético quanto ambiental,

demonstrando que a utilização da energia solar em residências unifamiliares representa uma alternativa viável para redução parcial do consumo de energia elétrica proveniente da rede convencional e para promoção da sustentabilidade em edificações residenciais.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros realizem análises mais aprofundadas envolvendo o tempo de retorno do investimento, dimensionamento econômico do sistema e integração com outras estratégias de eficiência energética aplicadas a edificações residenciais.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **A Regulamentação da Geração Distribuída é debatida com a sociedade** . Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/regulamentacao-da-geracao-distribuida-e-debatida-com-a-sociedade>>. Acesso em: 31/03/2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Matriz elétrica brasileira alcança 200 GW . Brasília: ANEEL, 2024.** Disponível em: [https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw#:~:text=De%20acordo%20com%20os%20dados,renov%C3%A1veis%20\(1%25%20Nuclear\)](https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw#:~:text=De%20acordo%20com%20os%20dados,renov%C3%A1veis%20(1%25%20Nuclear).). . Acesso em: 20/02/2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Micro e minigeração distribuída de energia elétrica cresceu 8,85 GW em 2024.** Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/micro-e-minigeracao-distribuida-de-energia-eletrica-cresceu-8-84-gw-em-2024>>. Acesso em: 27/02/2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Micro e Minigeração Distribuída** . Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>>. Acesso em: 31/03/2025.
- ALMEIDA, E. *et al.* **Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica.** Data de publicação: 17 de março de 2016. Acesso 18/02/2025.
- ALVES, Marliana de Oliveira Lage. **Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid.** 2019. Acesso 08/04/2025.
- ANJUM, T.; ALAM, M. M.; HOSSAIN, I. *et al.* **Methods, technologies and challenges of building integrated photovoltaic thermal (BIPV/T) systems to achieve net-zero in high rise buildings: A systematic review.** *Journal of Building Engineering*, v. 102, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114284>. Acesso em: 16/05/2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: **Edificações habitacionais — Desempenho.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- AVLI FIRIŞ, F.; BOYNUEGRI, A. R. **Cycle-aware optimization of battery storage in distribution networks under load and market uncertainty.** *Journal of Energy Storage*, v. 107, 118668, 2025. DOI: 10.1016/j.est.2025.118668.
- AYDIN, E.; BROUNEN, D.; ERGÜN, A. **The rebound effect of solar panel adoption: Evidence from Dutch households.** *Energy Economics*, v. 124, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106645>. Acesso em: 17/05/2026.
- BADAWY, N. M.; EL SAMATY, H. S.; WASEEF, A. A. E. **Relevance of monocrystalline and thin-film technologies in implementing efficient grid-connected photovoltaic systems in historic buildings in Port Fouad city, Egypt.** *Alexandria Engineering Journal*, v. 61, n. 12, p. 11375–11389, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.06.007>. Acesso em: 16/05/2026.

BARASKAR, S.; GÜNTHER, D.; WAPLER, J.; LÄMMLE, M. **Analysis of the performance and operation of a photovoltaic-battery heat pump system based on field measurement data.** *Solar Energy Advances*, v. 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seja.2023.100047>. Acesso em: 18/05/2026.

BARBERA, E.; MIO, A.; MASSI PAVAN, A.; FERMEGLIA, M. *Fuelling power plants by natural gas: an analysis of energy efficiency, economical aspects and environmental footprint based on detailed process simulation of the whole carbon capture and storage system.* *Energy Conversion and Management*, v. 251, p. 114972, 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.115072.

BEZERRA, Francisco Diniz. **ENERGIA SOLAR: v. 6 n. 174 (2021).** Caderno Setorial ETENE, Fortaleza, v. 6, 2024. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/2797>. Acesso em: 18/02/2025.

BORTOLOTO, Valter A. *et al.* **Geração de energia solar on grid e off grid.** In: VI JORNACITEC-Jornada Científica e Tecnológica. 2017. Acesso em: 20/03/2025. **BRASIL.** 2024. Acesso 31/03/2025.

CASTRO, Roberto. **Geração distribuída de energia elétrica. Seminário Internacional-Impactos.** (2016). Disponível: <https://pt.slideshare.net/slideshow/gerao-distribuda-de-energia-eltrica-seminrio-internacional-impactos-dos-recursos-energeticos-distribudos-sobre-o-setor-de-distribuio/64061707>. Acesso 31/03/2025

CUPERTINO, Silvia Andrea; TOMÉ, Fernanda; COSTA, Hirdan Katarina de Medeiros. **O marco legal da microgeração e minigeração distribuída: considerações sobre a Lei nº 14.300/2022.** *Revista de Informação Legislativa: RIL*, Brasília, DF, v. 60, n. 240, p. 107-123, out./dez. 2023. Disponível em: https://www12.senado.leg.br/ril/edicoes/60/240/ril_v60_n240_p107. Acesso em 31/03/2025.

DA ROSA, Antonio Robson Oliveira; GASPARIN, Fabiano Perin. **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil.** *Revista brasileira de energia solar*, v. 7, n. 2, p. 140-147, 2016.

DA SILVA, Enid Rocha Andrade. **Os objetivos do desenvolvimento sustentável e os desafios da nação.** 2018.

DRANSFIELD, D.; FINEGAN, E.; POWER, N. **Residential solar PV, the roll-outs, and the optimisations.** *Heliyon*, v. 12, n. 4, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2026.e44954>. Acesso em: 16/05/2026.

ELETROBRAS. **Manual de Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPEL, 2014. Disponível em: https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 08/04/2025

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz energética e elétrica.** Rio de Janeiro: EPE, [s.d.]. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 04/05/2026.

FERREIRA, Josiane Taiene *et al.* **Viabilidade econômica do uso da energia fotovoltaica: estudo de caso em edificação residencial unifamiliar**. 2021.

FIGUEIREDO, E. E. L. *et al.* **ESTUDO SOBRE A TARIFA DE ENERGIA ELÉTRICA EM BAIXA TENSÃO NO BRASIL EM 2024**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [S. l.], v. 10, n. 10, p. 5142–5155, 2024. DOI: 10.51891/rease.v10i10.16422. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/16422>. Acesso em: 20/02/2025.

GOMES, Magno Federici; FERREIRA, Leandro José. **Políticas públicas e os objetivos do desenvolvimento sustentável**. *Direito e Desenvolvimento*, v. 9, n. 2, p. 155-178, 2018.

GONÇALVES, Eduarda Lorrany Sousa; BRAGA, Jhonata Lima; SAMPAIO, Athos de Oliveira *et al.* **Multiscale modeling to optimize thermal performance design for urban social housing: A case study**. *Applied Thermal Engineering*, v. 241, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121379>. Acesso em: 15/05/2026.

HAN, J.-Y.; LI, S.-Y. **Impact of temperature and solar irradiance in shadow covering scenarios via two-way sensitivity analysis for rooftop solar photovoltaics**. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 2024. DOI: 10.1080/15567036.2024.2316244.

HEI, K. K.; SAVAGET, P.; FUKUSHIGE, S.; HALOG, A. **The necessity for end-of-life photovoltaic technology waste management policy: A systematic review**. *Journal of Cleaner Production*, v. 475, 142497, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142497.

HERODOTOU, P. *et al.* **Comparative analysis of machine learning methods for residential net load forecasting of solar-integrated households**. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, v. 35, 102106, 2026. DOI: 10.1016/j.segan.2025.102106.

HU, Q. *et al.* **Future hotter summer greatly increases residential electricity consumption in Beijing: A study based on different house layouts and shared socioeconomic pathways**. *Sustainable Cities and Society*, v. 93, 104453, 2023. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104453.

HUANG, M. *et al.* **The potential of radiative cooling enhanced photovoltaic systems in China**. *Advances in Applied Energy*, v. 15, 100184, 2024. DOI: 10.1016/j.adapen.2024.100184.

HSU, D. D.; O'DONOUGHUE, P.; FTHENAKIS, V.; HEATH, G. A.; KIM, H. C.; SAWYER, P.; CHOI, J. K.; TURNER, D. E. *Life cycle greenhouse gas emissions of crystalline silicon photovoltaic electricity generation: systematic review and harmonization*. *Journal of Industrial Ecology*, v. 16, p. S122-S135, 2012. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00439.x.

JHA, A. A. Role of Grid-Connected Photovoltaic Systems in Mitigating Operational Emissions from Residential Buildings in Cooling-Dominated Climatic Zones of India. In: Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer, 2024. DOI: 10.1007/978-981-99-6616-5_48.

KANNAN, R.; LEONG, K. C.; OSMAN, R.; HO, H. K.; TSO, C. P. *Life cycle assessment study of solar PV systems: an example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore*. Solar Energy, v. 80, n. 5, p. 555-563, 2006. DOI: 10.1016/j.solener.2005.04.008.

KAZEM, H. A.; AL-WAELI, A. H. A.; CHAICHAN, M. T.; ALNASER, W. E. *Photovoltaic/thermal systems for carbon dioxide mitigation applications: a review*. Frontiers in Built Environment, v. 9, p. 1211131, 2023. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1211131.

KRONENBERGER, Giovan; DO BRASIL, Vanessa Índio; DE MIRANDA, Maria Geralda. **PANORAMA DA GERAÇÃO ELÉTRICA E DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO ATUAL CENÁRIO DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**. REVISTA FOCO, v. 18, n. 2, p. e7641-e7641, 2025.

KRUGER, S. D., Zanella, C., & Barichello, R. (2023). **Análise da viabilidade econômico-financeira para implantação de projeto de produção de energia solar fotovoltaica em uma propriedade rural**. Revista De Gestão E Secretariado, 14(1), 428–445. <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i1.1521> Acesso em: 27/02/2025.

LAMNATOU, C.; CHEMISANA, D. *Life-cycle assessment of photovoltaic systems*. In: PARIDA, B. (ed.). Nanomaterials for Solar Cell Applications. Amsterdam: Elsevier, 2019. p. 217-233. DOI: 10.1016/B978-0-12-813337-8.00002-3.

LEMES, Vinicius Gustavo de Jesus Ferreira. **Análise da eficiência da geração de energia elétrica em placas solares, a partir da interferência da temperatura sobre a placa**. (2023). Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/17261>. Acesso em: 05/05/2025

LIMA, Thiago Ferreira. **Análise de Retorno de Investimento de Sistema Fotovoltaico On Grid**. 2017. Acesso em: 02/04/2025.

LIMBERGER, Leila. **O clima do oeste do Paraná: análises da presença do lago de Itaipu**. [S.l.]: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 10 out. 2007.)

MACHADO, C. T.; Miranda, F. S.* Rev. Virtual Quim., 2015,7 (1), 126-143. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão**. Data de publicação na Web: 14 de outubro de 2014. Acesso em: 18/02/2025.

MAIS ENERGIA SOLAR. **10) Pannel Solar Fotovoltaico De Silício Amorfo**. Disponível em: <<https://energiasolarmais.wordpress.com/2024/03/25/pannel-solar-fotovoltaico-de-silicio-amorfo/>>. Acesso em: 27/03/2025.

MAUAD, Frederico Fábio, L. C. Ferreira, and Tatiana Costa Guimarães Trindade. **"Energia renovável no Brasil." Análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras 740** (2017). Acesso 22/03/2025.

MENDONÇA, Pedro Henrique de Sousa. **ANÁLISE SOBRE A VIABILIDADE ECONÔMICA DA ENERGIA SOLAR NO**

MULVANEY, D. R. *Integrating life cycle assessment and commodity chain analysis to explore sustainable and just photovoltaics*. In: SOLAR CELLS AND LIGHT MANAGEMENT: Materials, Strategies and Sustainability. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. p. 341-366. DOI: 10.1016/B978-0-08-102762-2.00015-X.

NASCIMENTO, Mario Elias Carvalho do et al. **Avaliação econômica de sistemas fotovoltaicos conectados à rede para empreendimentos do agronegócio**. 2019. Acesso em: 28/03/2025.

O'DONOUGHUE, P. R.; HEATH, G. A.; DOLAN, S. L.; VORUM, M. *Life cycle greenhouse gas emissions of electricity generated from conventionally produced natural gas: systematic review and harmonization*. Journal of Industrial Ecology, v. 18, n. 1, p. 125-144, 2014. DOI: 10.1111/jiec.12084.

OLIVEIRA JÚNIOR, Marcos Eugênio Borges de. **Análise das bases de dados abertos da ANEEL: estudo de relação entre os custos de tarifação e a qualidade comercial no serviço de distribuição de energia elétrica de concessionária do Nordeste brasileiro**. 2024. 101 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. Acesso em: 21/02/2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Nova York: Organização das Nações Unidas, 2015.

ORMUŽ, J. K.; ŽMAK, I.; FILETIN, T. **Life cycle assessment of photovoltaic systems. Mechanical Technology and Structural Materials**, 2024.

PAIANO, A.; LAGIOIA, G.; INGRAO, C. *A combined assessment of the energy, economic and environmental performance of a photovoltaic system in the Italian context*. Science of the Total Environment, v. 857, p. 161329, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161329.

PARASCANU, M. M. et al. **Comprehensive prospective environmental assessment of innovative photovoltaic technologies: Integration into electricity grids in Finland, Germany, and Spain**. Energy, v. 315, 134454, 2025. DOI: 10.1016/j.energy.2025.134454.

PASSOS, Alana de Santana. **O USO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA EM RESIDÊNCIAS DE MÉDIO PADRÃO NA CIDADE DE LAGARTO (SE)**. 2021. Acesso em: 23/04/2025.

PAULE, D.; PAKERE, I.; PUBULE, J.; **BLUMBERGA, D. Optimising multi-energy community hubs for decarbonisation and energy system flexibility.** *Smart Energy*, v. 17, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segy.2025.100214>. Acesso em: 17/05/2026.

PEREIRA, Naron Xavier. **Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada.** 2019. Acesso em: 01/04/2025.

PETRIDIS, S.; GIOURKA, P.; NTOUSKAS, S. et al. **Temporal resolution matters: a comparative life cycle assessment with energy balancing using real, annual, and disaggregated data.** *Energy and Buildings*, v. 337, 117543, 2026. DOI: 10.1016/j.enbuild.2026.117543.

PLANALTO. **L14300.** Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm>. Acesso em: 31/03/2025.

RANA, S.; PEARCE, J. M. **Decarbonization of residential houses in northern climates: Traditional vs fully electrified approaches in Ontario Canada.** *Journal of Building Engineering*, v. 97, 113518, 2025. DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.113518.

RENTEL. **Painel Solar Monocristalino** . Disponível em: <<https://rentel.com.br/painel-solar-monocristalino/>>. Acesso em: 27/03/2025.

RIBEIRO, Vinicius Duarte Aquino Piniero (2020). **DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO DAS ÁREAS COMUNS DE UM CONDOMÍNIO MULTIFAMILIAR.**

SAKIB, M. M. B.; MERILAINEN, A.; RUUSKANEN, V.; KOSONEN, A. **Net metering interval impact on solar photovoltaic prosumer techno-economics in Finland.** *Solar Energy*, v. 275, 114230, 2026. DOI: 10.1016/j.solener.2025.114230.

SIDDIQUE, M.; SHAHZAD, N.; UMAR, S. et al. **Performance assessment of Trombe wall and south façade as applications of building integrated photovoltaic systems.** *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 58, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103141>. Acesso em: 16/05/2026.

SILVA, H. M. F. da ., & Araújo, F. J. C. . (2022). **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.** *Revista Ibero-Americana De Humanidades, Ciências E Educação*, 8(3), 859–869. <https://doi.org/10.51891/rease.v8i3.4654> – Acesso em: 22/02/2025.

SOLIS SMART. **Dá Para Armazenar Energia e Ser Off Grid?**, [solissmart.com](http://solissmart.com.br/blog/da-para-ser-off-grid/). Disponível em: < <http://solissmart.com.br/blog/da-para-ser-off-grid/>>. Acesso em: 28/03/2025.

SOLST-SUPORTE. **Prós e contras dos diferentes tipos de painel solar - Solstício Energia** . Disponível em:

<<https://www.solsticioenergia.com/2017/05/08/tipos-de-painel-solar.>>. Acesso em: 20/03/2025.

SUNERGIA, **Quais os principais tipos de módulos fotovoltaicos** (2024). Disponível em: <https://sunergia.com.br/blog/quais-os-principais-tipos-de-modulos-fotovoltaicos/>. Acesso em: 25/04/2025.

SUNERGIA. **SISTEMA FOTOVOLTAICO ON-GRID | (CONECTADO À REDE)**. Disponível em: <<https://sunergia.com.br/blog/sistema-fotovoltaico-on-grid-conectado-a-rede/>>. Acesso em: 28/03/2025.

SZILÁGYI, A.; GRÓF, G. **Estimating the environmental footprint of a grid-connected 20 MWp photovoltaic system**. *Solar Energy*, v. 200, p. 45–54, 2020. DOI: 10.1016/j.solener.2020.01.028.

TENG, M. et al. **Adaptive responses: the effects of temperature levels on residential electricity use in China**. *Climatic Change*, v. 175, n. 3-4, 2022. DOI: 10.1007/s10584-022-03374-3.

ULLAH, F. et al. **Comprehensive life cycle analysis of monocrystalline and polycrystalline solar PV panels in Nanjing, China: Effects on the environment, performance, and recycling opportunities**. *Chemical Engineering Journal*, v. 497, 167775, 2025. DOI: 10.1016/j.cej.2025.167775.

VETTORAZZI, Egon; FIGUEIREDO, António; DIAS, Maíra Vieira et al. **Indoor thermal comfort and energy efficiency in Brazilian social housing: A bibliometric and systematic review**. *Energy and Buildings*, v. 327, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116460>. Acesso em: 15/05/2026.

WAN, H.; ZHANG, J. **Navigating the use of direct current in residential settings: Merits and obstacles**. *Journal of Building Engineering*, v. 94, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110828>. Acesso em: 17/05/2026.

WANG, M.; JIA, Z.; TAO, L. et al. **Optimizing the tilt angle of kinetic photovoltaic shading devices considering energy consumption and power generation—Hong Kong case**. *Energy and Buildings*, v. 319, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115072>. Acesso em: 14/05/2026.

WHITAKER, M.; HEATH, G. A.; O'DONOUGHUE, P.; VORUM, M. *Life cycle greenhouse gas emissions of coal-fired electricity generation: systematic review and harmonization*. *Journal of Industrial Ecology*, v. 16, p. S53-S72, 2012. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00465.x.

WILKE, Humberto. **Diagnóstico das Usinas Termelétricas dos Sistemas Isolados do Ponto de Vista de Adequação aos Limites de Consumo Específico de Combustível, Estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e Proposição de Alternativas para Redução dos Mesmos**. 2015

YANG, Q.; LIU, Q.; DU, Y.; WANG, K. **Integrated design of building envelopes and photovoltaic systems for cold climate office buildings**. *Solar Energy*, v. 277, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.114128>. Acesso em: 17/05/2026.

ZHANG, H.; YU, Z.; ZHU, C.; JIANG, G.; et al. *Green or not? Environmental challenges from photovoltaic technology*. *Environmental Pollution*, v. 317, p. 121066, 2023. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121066.

ZHAO, R.; DENG, S.; ZHAO, L.; TAN, Y.; et al. *Energy-saving pathway exploration of CCS integrated with solar energy: literature research and comparative analysis*. *Energy Conversion and Management*, v. 102, p. 387-395, 2015. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.01.018.