

DIMENSIONAMENTO EFICIENTE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: UMA ABORDAGEM FOCADA PARA RESIDÊNCIAS

OLIVEIRA, Maria Mariah da Costa Sales e¹
ABRITTA, Camila do Carmo Almeida²
NOGUEIRA, Fernando José³
TEIXEIRA, Wesley Carminati⁴

Linha de pesquisa: Eficiência Energética

RESUMO

Este estudo analisa a viabilidade do dimensionamento de sistemas fotovoltaicos residenciais, conforme a Resolução Normativa nº 787/2020 da ANEEL. O projeto foi planejado para fornecer energia sustentável e econômica à residência, utilizando seis módulos solares de 0,59 kWp cada, totalizando 3,54 kWp. A energia gerada mensalmente foi estimada em 389,91 kWh. Um inversor de 4,00 kW foi selecionado para garantir a conversão eficiente da energia. A economia mensal estimada é de R\$ 349,13, com um retorno do investimento em 2 anos. O custo total do sistema foi de R\$ 8.330,77, com a possibilidade de exportar excedentes para a rede elétrica, gerando créditos de energia. O projeto mostrou-se viável técnica e economicamente, contribuindo para a sustentabilidade e redução da pegada de carbono da residência.

Palavras-chave: Energia Solar. Eficiência Energética. Geração Distribuída. Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A trajetória da energia solar começa em 1839, quando o físico francês Alexandre Edmond Becquerel fez uma descoberta crucial ao observar o efeito fotoelétrico durante um experimento com eletrodos de platina e prata expostos à luz. Esse fenômeno abriu as portas para o desenvolvimento de tecnologias capazes de converter luz solar em eletricidade, embora sua aplicação prática só tenha se expandido no século XX. Um marco significativo foi a criação da primeira célula solar

¹ Graduanda em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Academia – UniAcademia.

² Professora Ma. do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia – UniAcademia.

³ Professor Dr. do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia – UniAcademia.

⁴ Professor Me. do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia – UniAcademia.

funcional feita de silício nos laboratórios Bell Labs, nos anos 1950, o que demonstrou a viabilidade da energia solar como uma alternativa (Kibert, 2016; Solar Energy Journal, 2020).

Nos dias de hoje, a crescente preocupação com a sustentabilidade tem levado muitos países a buscarem fontes renováveis de energia, com a solar se destacando como uma solução essencial para o futuro ambiental e econômico do planeta. Como fonte limpa, a energia solar desempenha um papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa (International Energy Agency, 2023). Enquanto os sistemas fototérmicos, que aquecem água com a radiação solar, já são bastante utilizados, os sistemas fotovoltaicos, que convertem diretamente a luz solar em eletricidade, oferecem um enorme potencial. Esses sistemas são versáteis e eficientes, podendo atender desde pequenas residências até grandes indústrias (Solarvolt, 2020).

A adoção de sistemas solares tem crescido rapidamente no mundo. De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), países como China, Alemanha, Japão e Estados Unidos estão na vanguarda dessa mudança, com a China liderando com 25,8% da produção global de energia solar e uma capacidade instalada de 78.100 MW (PNUMA, 2020). No Brasil, as políticas públicas de incentivo têm sido fundamentais para o desenvolvimento do setor, especialmente aproveitando a alta radiação solar do país. O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2026) projeta que até 2026 o Brasil terá 13 GW de capacidade instalada, com investimentos de R\$ 93,7 bilhões entre 2012 e 2022, que geraram mais de 540 mil empregos e arrecadaram R\$ 25,4 bilhões em tributos (Absolar, 2022).

Essa expansão vai além do crescimento econômico e é estratégica no enfrentamento das mudanças climáticas. Em muitos países, a energia solar se tornou um pilar para diversificar a matriz energética. Com previsões de que, até 2030, a energia solar possa representar até 30% da geração de eletricidade em alguns lugares, o futuro do solar é promissor, impulsionado por avanços tecnológicos, políticas favoráveis e custos mais acessíveis (International Energy Agency, 2023).

Além disso, a flexibilidade da energia solar em diferentes escalas, desde pequenas instalações residenciais até usinas de grande porte, a torna uma solução chave na luta contra as mudanças climáticas e na redução das emissões de carbono. A integração de tecnologias complementares, como sistemas de armazenamento de

energia e redes inteligentes, aumenta ainda mais sua eficiência, tornando a transição para uma matriz energética mais sustentável e acessível.

Portanto, a energia solar não é mais uma promessa futura, mas uma realidade consolidada, que contribui significativamente para a segurança energética e o combate às mudanças climáticas em um cenário global cada vez mais desafiador.

1.1 OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema de energia solar para uso residencial, utilizando painéis solares como fonte principal de geração. O trabalho abordará, de forma detalhada, os principais componentes do sistema, incluindo os equipamentos responsáveis pela captura e conversão da energia solar, bem como os dispositivos de armazenamento, destacando suas especificações técnicas e a forma como são aplicados na prática. Através dessa análise, serão discutidos os benefícios, desafios e limitações dessa tecnologia, com ênfase na eficiência energética e no impacto positivo que ela pode trazer para os consumidores residenciais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar é uma fonte renovável, abundante e inesgotável que chega à Terra sob a forma de radiação térmica e luminosa. De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2007), a quantidade de radiação solar que atinge a superfície da Terra a cada ano seria capaz de suprir milhares de vezes o consumo global de energia. No entanto, a distribuição dessa energia varia conforme fatores como latitude, condições climáticas e estações do ano, o que cria desafios regionais na captação e aproveitamento eficiente dessa fonte.

A radiação solar é composta por luz visível, raios infravermelhos e radiação ultravioleta, e pode ser convertida em energia térmica ou elétrica. Entre as tecnologias

mais comuns de aproveitamento estão os coletores solares térmicos, usados para aquecer água, e os sistemas fotovoltaicos, que transformam a luz solar diretamente em eletricidade (Atlas, 2005).

Apesar de ser uma fonte abundante, a eficiência na captação e os custos elevados continuam sendo obstáculos para a adoção em larga escala da energia solar. Pesquisas têm sido essenciais para aprimorar a eficiência e reduzir os custos dos sistemas fotovoltaicos (Brito *et al.*, 2011). Com os avanços tecnológicos, a energia solar se consolidou como uma alternativa viável e sustentável, desempenhando um papel importante na diversificação das fontes de energia no cenário global (Santos; Almeida, 2021).

Os sistemas fotovoltaicos possuem características únicas, como a geração descentralizada, que reduz as perdas relacionadas ao transporte de eletricidade, além de sua flexibilidade para aplicação em residências, indústrias e grandes usinas. No entanto, a intermitência da radiação solar, especialmente durante a noite, exige soluções complementares para garantir um fornecimento contínuo e confiável de energia (Brito *et al.*, 2011; Santos; Almeida, 2021).

2.2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica se baseia na conversão direta da luz solar em eletricidade, utilizando células solares compostas por materiais semicondutores, como o silício. O fenômeno que permite essa conversão é o efeito fotovoltaico, descoberto por Edmond Becquerel em 1839. Esse efeito ocorre quando a luz solar interage com o material semicondutor, liberando elétrons que geram uma corrente elétrica (Silva; Carvalho, 2019).

Nos últimos anos, o desenvolvimento de novos materiais e técnicas de fabricação tem aumentado significativamente a eficiência das células fotovoltaicas. De acordo com Silva e Carvalho (2019), a qualidade do semicondutor, a intensidade da luz que incide sobre as células e a temperatura ambiente são fatores cruciais para a eficiência do processo. A pesquisa contínua busca reduzir perdas e aumentar a durabilidade das células solares, tornando a tecnologia mais acessível e eficaz.

2.3. TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias principais: sistemas *on-grid* (conectados à rede elétrica), *off-grid* (autônomos) e híbridos. Cada tipo apresenta características específicas que os tornam adequados para diferentes contextos e necessidades.

Os sistemas *on-grid* são os mais comuns e amplamente utilizados, especialmente em áreas urbanas. Esse tipo de sistema permite que a energia excedente gerada pelos painéis solares seja injetada diretamente na rede elétrica, acumulando créditos que podem ser utilizados em momentos de baixa produção, como à noite ou em dias nublados. A ausência de baterias reduz os custos iniciais de instalação, mas também torna o sistema dependente da rede elétrica para o fornecimento de energia quando os painéis não estão gerando eletricidade (Costa; Nogueira, 2018).

Por outro lado, os sistemas *off-grid* são projetados para operar de forma independente da rede elétrica, sendo ideais para regiões remotas ou onde a infraestrutura de distribuição de energia é limitada ou inexistente. Para garantir o fornecimento de energia contínuo, especialmente à noite ou em períodos de baixa irradiação solar, esses sistemas utilizam baterias para armazenar a eletricidade gerada durante o dia. Embora ofereçam autonomia total, os custos relacionados ao armazenamento e manutenção das baterias podem ser significativos (Di Souza, 2016).

Os sistemas híbridos, por sua vez, combinam as características dos dois modelos anteriores, integrando baterias e conexão à rede elétrica. Essa abordagem permite maior flexibilidade, pois a energia armazenada pode ser utilizada em momentos de necessidade, enquanto a conexão à rede elétrica garante suporte adicional quando necessário. Apesar de apresentarem custos iniciais mais elevados, os sistemas híbridos são uma solução eficiente para usuários que buscam maior autonomia energética e maior resiliência em relação à intermitência da geração solar (Dunlop, 2009).

A escolha do tipo de sistema fotovoltaico a ser implementado depende de fatores como a localização geográfica, a disponibilidade de recursos financeiros, a infraestrutura elétrica existente e as necessidades específicas de consumo. Enquanto os sistemas *on-grid* são amplamente utilizados em áreas urbanas devido à

infraestrutura de rede já estabelecida, os sistemas *off-grid* atendem comunidades isoladas, fornecendo uma solução eficaz para locais sem acesso à energia elétrica. Por sua vez, os sistemas híbridos representam uma alternativa sofisticada e versátil, especialmente para consumidores que priorizam a autonomia e a sustentabilidade energética.

O sistema *on-grid* é conectado diretamente à rede elétrica (Figura 1), permitindo que a energia gerada seja injetada nela, sem a necessidade de baterias (Lamberts *et al.*, 2010). O inversor solar sincroniza o sistema com a rede e converte a corrente contínua dos painéis em corrente alternada (Pereira, 2019). O excesso de energia é enviado para a rede, gerando créditos para o consumidor, fazendo o medidor girar ao contrário (Pereira, 2019). Esses sistemas dependem de regulamentações e legislações favoráveis, pois utilizam a infraestrutura das concessionárias, exigindo conformidade com as normas estabelecidas (Di Souza, 2016).

FIGURA 1 - Sistema *On grid*



Fonte: INRI, 2021.⁵

⁵ Disponível em: <https://inriufsm.com.br/energia-fotovoltaica/inversor-solar-o-que-voce-precisa-saber/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

De acordo com Dunlop (2009), os sistemas fotovoltaicos conectados à rede *on-grid* incluem diversos componentes essenciais. Os painéis solares (módulos fotovoltaicos) capturam a luz solar e a convertem em eletricidade; os inversores (inversores de rede) são responsáveis por transformar a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis em corrente alternada (CA), compatível com a rede elétrica; o sistema de monitoramento monitora o desempenho do sistema, enviando dados tanto para o usuário quanto para a operadora da rede elétrica. Dispositivos de proteção, como disjuntores e fusíveis, são incluídos para proteger tanto o sistema fotovoltaico quanto a rede elétrica contra sobrecargas e curtos-circuitos. Contadores bidirecionais medem a energia produzida e consumida, possibilitando o crédito de energia no caso de excesso de produção (Dunlop, 2009).

O funcionamento do sistema é simples: a energia solar capturada é convertida em eletricidade e utilizada diretamente pela residência ou empresa. O excedente é enviado para a rede elétrica, proporcionando créditos de energia por meio do processo de *net metering* (Dunlop, 2009; Pereira, 2019). No entanto, não há armazenamento de energia, sendo que a eletricidade gerada é consumida ou enviada para a rede imediatamente.

Os sistemas off-grid operam de forma autônoma, sem conexão à rede elétrica, acumulando energia solar em baterias para uso futuro, especialmente durante a noite ou em dias nublados (Alves, 2019). Eles fornecem eletricidade para áreas remotas sem acesso à rede convencional ou com fornecimento insuficiente (Wanderley, 2013). A dificuldade de obter energia em locais distantes das fontes de geração, como fazendas e zonas rurais, é agravada pelos altos custos de distribuição e transmissão, que exigem redes de alta tensão (Alves, 2019).

FIGURA 2 - Sistema *off-grid*



Fonte: INRI, 2021⁶

Os sistemas *off-grid* pode ser equipados com ou sem armazenamento de energia elétrica, dependendo da aplicação desejada (Di Souza, 2016). Aqueles que incluem armazenamento são utilizados em aplicações como iluminação pública, carregamento de baterias de veículos elétricos e pequenos dispositivos portáteis. Em contraste, sistemas sem armazenamento apresentam maior viabilidade econômica, pois não exigem equipamentos adicionais para guardar a energia gerada (Silva *et al.*, 2021). Nesses casos, o funcionamento do sistema depende diretamente da incidência de luz solar nos painéis fotovoltaicos.

De acordo com Dunlop (2009), os sistemas fotovoltaicos *off-grid* incluem painéis solares, inversores, baterias, controladores de carga e, opcionalmente, um gerador de backup. Os painéis convertem luz solar em eletricidade, armazenada nas baterias para uso independente da rede elétrica. Os inversores transformam a corrente contínua em alternada, e os controladores evitam sobrecarga ou descarga

⁶ Disponível em: <https://inriufsm.com.br/energia-fotovoltaica/inversor-solar-o-que-voce-precisa-saber/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

excessiva das baterias. Esses sistemas são ideais para locais remotos ou sem acesso à rede elétrica, com o gerador sendo acionado em caso de insuficiência das baterias.

Na Figura 3, apresenta-se um sistema fotovoltaico híbrido, que é aquele que integra múltiplas fontes de geração de energia, como aerogeradores, geradores movidos a combustível líquido, turbinas eólicas, entre outros (Di Souza, 2016). Esse tipo de sistema pode ser bastante complexo e requer a utilização de um inversor, podendo ou não incluir um sistema de armazenamento de energia (Torres, 2012).

FIGURA 3 - Sistema híbrido



Fonte: INRI, 2021.⁷

Os sistemas fotovoltaicos híbridos combinam componentes dos sistemas conectados à rede e *off-grid*, como painéis solares, inversores híbridos (que combinam as funções de inversor e controlador de carga, permitindo integração com a rede elétrica e armazenamento em baterias), baterias, controladores de carga e um gerador opcional. Esses sistemas podem operar conectados à rede, *off-grid* ou de forma híbrida. A energia gerada pelos painéis pode ser utilizada diretamente, armazenada nas baterias ou enviada para a rede. O inversor híbrido gerencia a energia entre os painéis, as baterias e a rede, garantindo que a energia esteja disponível quando necessário (Dunlop, 2009).

⁷ Disponível em: <https://inriufsm.com.br/energia-fotovoltaica/inversor-solar-o-que-voce-precisa-saber/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

3 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

3.1 PAINÉIS SOLARES

Os painéis solares são os principais componentes de um sistema fotovoltaico, compostos por várias células fotovoltaicas interligadas que captam a luz solar e a convertem em eletricidade. Esses painéis podem ser de silício monocristalino, policristalino ou de filme fino, cada um com diferentes níveis de eficiência e custo. A eficiência dos painéis solares, que varia entre 15% e 22%, é determinada pela capacidade de conversão da luz solar em energia elétrica, dependendo do material utilizado (Mendes e Lopes, 2021).

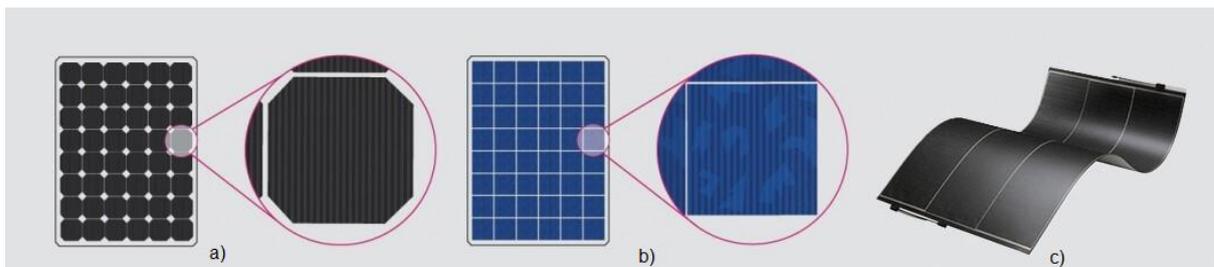
Quando expostos à luz solar, as células fotovoltaicas geram uma corrente contínua, que é convertida em corrente alternada por um inversor, tornando-a utilizável em sistemas residenciais e comerciais (Kibert, 2016; Solar Energy Journal, 2020). A eficiência do sistema fotovoltaico, no entanto, é influenciada por diversos fatores externos, como a radiação direta, a temperatura ambiente e o alinhamento dos painéis. Fatores como temperaturas elevadas podem reduzir a eficiência das células solares, e a presença de sombras pode diminuir significativamente a produção de energia (Pereira e Souza, 2020).

A instalação adequada dos painéis solares é essencial para otimizar seu desempenho. Para isso, é necessário projetar a orientação dos painéis de modo a maximizar a exposição solar durante o dia, evitando obstáculos que possam causar sombreamento. Além disso, a inclinação dos painéis deve ser ajustada conforme a latitude do local, garantindo a captação ideal da radiação solar (Pereira e Souza, 2020).

Na Figura 4, é possível observar alguns tipos de painéis solares: o painel solar monocristalino é feito de silício de alta pureza, proporcionando maior eficiência na conversão de energia solar, sendo ideal para espaços limitados, embora com custo de produção mais alto (Kumar *et al.*, 2020), o painel policristalino, composto por silício fundido com vários cristais, tem eficiência ligeiramente inferior, mas é mais econômico e usado em instalações maiores e o painel de filme fino, composto por camadas de

materiais semicondutores como telureto de cádmio ou silício amorfo, é mais leve e flexível, com menor eficiência, sendo mais adequado para grandes áreas devido ao seu custo reduzido.

FIGURA 4 - Tipos de painéis solares



a) Painel Solar Monocristalino, b) Painel Solar Policristalino, c) Painel Solar de Filme Fino

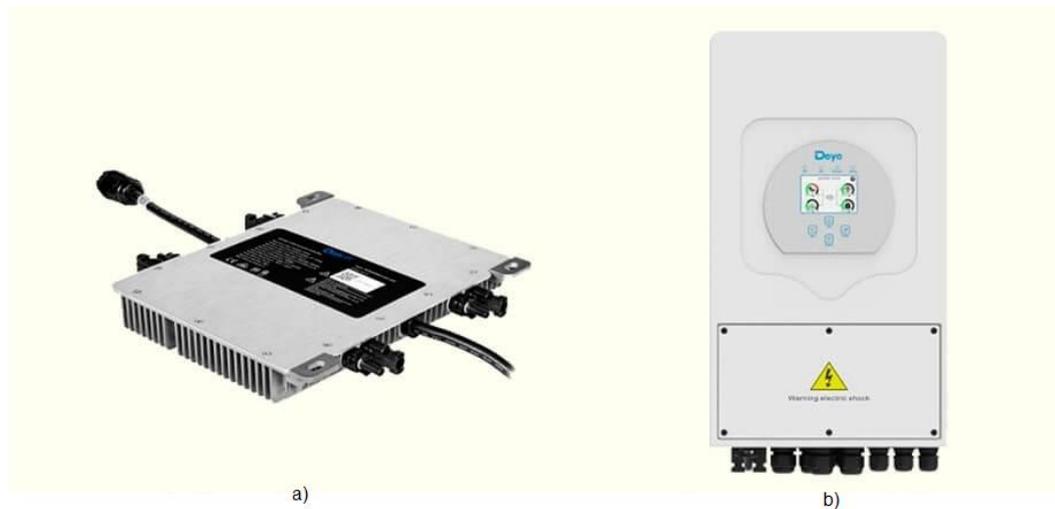
Fonte: Neosolar, adaptada pela autora, s.d.⁸

3.2 INVERSORES

O inversor é o componente responsável pela conversão da corrente contínua gerada pelos painéis solares em corrente alternada, que pode ser utilizada pelos aparelhos elétricos. Araújo e Fernandes (2020) destacam que a escolha do inversor adequado para o sistema fotovoltaico é fundamental para otimizar o desempenho e a eficiência energética do sistema.

Na Figura 5, observam-se dois tipos distintos de inversores: microinversor e inversor de *string*. De acordo com Gambetta *et al.* (2017), o microinversor é um dispositivo que converte a energia de cada painel solar de forma individual, o que proporciona maior eficiência, especialmente em situações com sombreamento parcial, já que o desempenho de um painel não afeta os outros. Por outro lado, o inversor de *string* converte a energia de uma série de painéis solares conectados em série. Embora seja mais econômico em termos de custo por watt, sua performance pode ser comprometida se um dos painéis da *string* apresentar baixa performance, impactando a eficiência do sistema como um todo.

⁸ Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/placa-solar-fotovoltaica/tipos>. Acesso em: 17 dez. 2024.

FIGURA 5 - Microinversor e Inversor *String*a) Microinversor, b) Inversor *String*Fonte: Neosolar, adaptada pela autora, s.d.⁹

A escolha do tipo de inversor fotovoltaico é um fator crucial para o desempenho do sistema solar, pois é ele quem converte a corrente contínua gerada pelos painéis solares em corrente alternada, necessária para o funcionamento dos aparelhos elétricos. Existem diversos modelos de inversores disponíveis no mercado, cada um com características e finalidades específicas. Os três principais tipos de inversores são: inversores centrais, inversores de *string* e microinversores.

A seguir, no Quadro 1, apresenta-se uma comparação que destaca as principais diferenças entre esses tipos de inversores, considerando aspectos como eficiência, custo, flexibilidade de instalação e adequação para diferentes tamanhos de sistemas fotovoltaicos. Essa comparação facilita a escolha do inversor mais adequado para cada projeto, levando em conta as vantagens e desvantagens de cada tecnologia.

⁹ Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/microinversor/diferenca-micro-inversor-inversor-string>. Acesso em: 17 dez. 2024

QUADRO 1 - Comparação entre Tipos de Inversores Fotovoltaicos: Central, Microinversores e Inversor de *String*

Critério	Inversor Central	Microinversores	Inversor de <i>String</i>
Tamanho e Escalabilidade	Adequado para grandes instalações.	Ideal para instalações residenciais e pequenas.	Versátil, pode ser usado em pequenas e médias instalações.
Custo Inicial	Geralmente mais baixo por kW.	Mais alto devido ao custo por unidade.	Moderado, entre os dois anteriores.
Desempenho em Sombra	Pode sofrer perdas significativas.	Desempenho melhor, pois cada painel opera de forma independente.	Pode ter desempenho reduzido se um painel estiver sombreado.
Manutenção e Reparos	Manutenção mais simples e menos frequente.	Manutenção pode ser mais complexa, mas menos frequente se os microinversores são confiáveis.	Manutenção moderada e menos complexa que a dos microinversores.
Eficiência	Alta eficiência em grandes sistemas.	Alta eficiência individual dos painéis.	Boa eficiência, mas depende da configuração dos <i>strings</i> .
Complexidade da Instalação	Instalação relativamente simples.	Requer mais trabalho e pode ser mais complexo.	Moderada, dependendo do número de <i>strings</i> .
Durabilidade	Alta durabilidade e vida útil.	Pode ter uma vida útil mais curta comparada aos inversores centrais.	Alta durabilidade e vida útil similar ao inversor central.
Monitoramento	Monitoramento centralizado.	Monitoramento individual de cada painel.	Monitoramento centralizado por <i>string</i> .
Flexibilidade	Menos flexível na expansão.	Alta flexibilidade, fácil adição de novos painéis.	Moderada flexibilidade, expansão possível com cuidado na configuração dos <i>strings</i> .

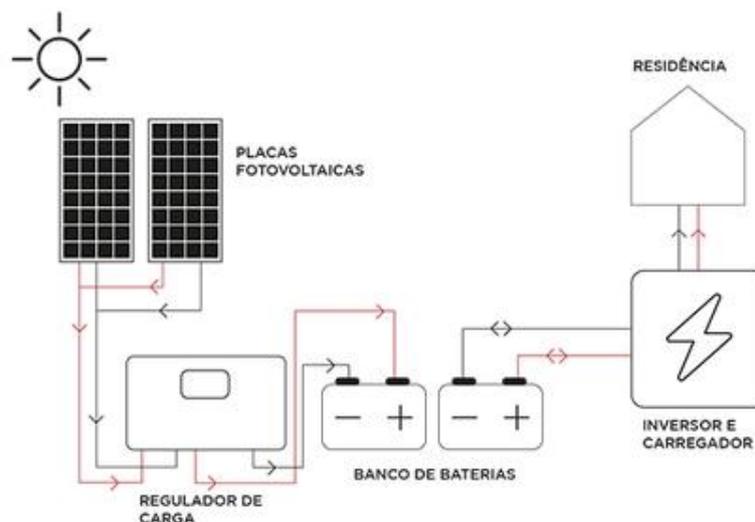
Fonte: Martins, 2023.

3.3 BATERIAS (EM SISTEMAS *OFF-GRID* OU HÍBRIDOS)

As baterias desempenham um papel fundamental em sistemas *off-grid* e híbridos, permitindo o armazenamento da energia gerada pelos painéis solares para ser utilizada quando a luz solar não está disponível. Sem um sistema de armazenamento eficiente, a energia gerada durante o dia não poderia ser aproveitada à noite ou em dias nublados, o que reduziria a autonomia e a eficiência do sistema fotovoltaico. A capacidade de armazenamento das baterias assegura que a eletricidade esteja disponível conforme a demanda, aumentando a flexibilidade e a confiabilidade dos sistemas de energia solar (Pereira; Souza, 2020).

A escolha da bateria para esses sistemas depende de vários fatores, incluindo capacidade de armazenamento, vida útil e custo. Segundo Ferreira e Dias (2019), as baterias de lítio-íon são frequentemente preferidas devido à sua maior eficiência e durabilidade em comparação com as baterias de chumbo-ácido. Embora as baterias de lítio-íon sejam mais caras, elas oferecem uma densidade de energia superior e uma profundidade de descarga mais significativa, o que as torna uma escolha mais eficaz para sistemas que exigem desempenho confiável e uma vida útil prolongada. Em contraste, as baterias de chumbo-ácido, embora mais econômicas, apresentam limitações em termos de eficiência e vida útil. Elas têm uma capacidade menor de armazenamento e uma profundidade de descarga mais limitada, o que pode exigir substituições mais frequentes. Na Figura 6, é apresentado um exemplo de bateria solar.

FIGURA 6 – Bateria Solar



Fonte: Portal Solar, s.d.¹⁰

Conforme Ferreira e Dias (2019), a escolha do tipo de bateria a ser utilizada deve considerar uma análise detalhada das necessidades específicas do sistema, bem como uma avaliação do custo-benefício a longo prazo.

¹⁰ Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/bateria-solar.html>. Acesso em: 17 dez. 2024.

3.4. SISTEMA DE MONITORAMENTO

Os sistemas de monitoramento fotovoltaico desempenham um papel crucial na gestão e otimização das instalações de painéis solares, permitindo a observação em tempo real da produção de energia. Esses sistemas são fundamentais para a detecção precoce de falhas e a implementação de medidas corretivas, além de possibilitar a otimização do rendimento. Martins e Gomes (2018) destacam que os sistemas modernos utilizam plataformas baseadas em nuvem para fornecer dados em tempo real sobre a produção de energia, o que facilita uma gestão mais eficiente.

De acordo com Spertino e Martin (2022), um sistema eficiente de monitoramento fotovoltaico inclui componentes como inversores com monitoramento integrado, plataformas *online* para visualização de dados e sensores que medem irradiância solar e temperatura dos painéis. A capacidade de gerar relatórios detalhados e alertas de falhas contribui significativamente para a manutenção da eficiência e a maximização do retorno sobre o investimento em energia solar.

4 IMPACTO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE

A energia fotovoltaica é uma fonte promissora de energia renovável, destacando-se pelo baixo impacto ambiental e contribuição para a sustentabilidade, pois converte a luz solar em eletricidade sem emitir gases de efeito estufa (REN21, 2023). Ela reduz a dependência de combustíveis fósseis e promove a diversificação da matriz energética, essencial para um futuro mais sustentável. No entanto, a fabricação de painéis solares e o descarte adequado de seus materiais ainda apresentam desafios que precisam ser gerenciados para maximizar seus benefícios ambientais a longo prazo.

4.1 BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DA ENERGIA SOLAR

A energia solar é uma fonte de energia renovável que oferece diversos benefícios ambientais, sendo uma alternativa viável para a mitigação das mudanças climáticas e a promoção da sustentabilidade.

4.1.1. Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa

Um dos benefícios mais significativos da energia solar é a redução das emissões de gases de efeito estufa. A geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis é uma das principais fontes de emissões de CO₂, enquanto a energia solar não produz emissões durante sua operação. Estudos indicam que a adoção em larga escala da energia solar pode resultar em uma diminuição significativa das emissões globais, contribuindo para o cumprimento das metas climáticas internacionais (Galdino & Lima, 2019).

4.1.2 Conservação dos Recursos Hídricos

A energia solar também se destaca pela conservação dos recursos hídricos. A geração de eletricidade em usinas hidrelétricas e termelétricas consome grandes quantidades de água, enquanto os sistemas solares fotovoltaicos requerem pouca ou nenhuma água durante sua operação. Isso é especialmente relevante em regiões onde a água é escassa, permitindo um uso mais sustentável dos recursos hídricos (Zanenco *et al.*, 2011).

4.1.3 Promoção da Biodiversidade

Além dos benefícios diretos à qualidade do ar e à conservação da água, a energia solar pode contribuir para a promoção da biodiversidade. A instalação de painéis solares em áreas já degradadas ou em telhados urbanos evita a necessidade de desmatamento e ajuda na preservação de habitats naturais. Projetos agrovoltáticos podem aumentar a produtividade agrícola ao mesmo tempo em que protegem ecossistemas locais (Bione *et al.*, 2004).

4.1.4 Criação de Empregos Verdes

A transição para uma matriz energética baseada em fontes renováveis também impulsiona a criação de empregos verdes. A indústria solar está em crescimento, gerando oportunidades em diversas áreas, desde pesquisa e desenvolvimento até instalação e manutenção. Esses empregos não apenas contribuem para o crescimento econômico local, mas também promovem um desenvolvimento sustentável ao reduzir a dependência de combustíveis fósseis (Irena, 2022).

4.1.5 Eficiência Energética

Os sistemas solares fotovoltaicos permitem uma maior eficiência na utilização dos recursos energéticos. A geração descentralizada pode ser instalada próxima aos locais de consumo, reduzindo as perdas associadas ao transporte e à distribuição de eletricidade. Essa eficiência não só melhora a segurança energética como também diminui os custos operacionais relacionados à infraestrutura elétrica tradicional (Hinrichs e Kleinbach, 2003).

4.1.6 Desafios e Considerações

Embora a energia solar ofereça diversos benefícios, sua implementação enfrenta desafios, como o armazenamento eficiente de energia e o impacto ambiental na produção dos painéis solares. No entanto, com políticas adequadas e avanços tecnológicos, muitos desses obstáculos podem ser superados (Duffie & Beckman, 2013). A crescente adoção da energia solar representa uma oportunidade significativa para promover um futuro mais sustentável. Com benefícios ambientais claros e o potencial de transformar economias locais, a energia solar deve ser priorizada nas estratégias globais de combate às mudanças climáticas e preservação ambiental (Kalogirou, 2016).

Um dos principais desafios para a adoção em larga escala da energia solar é o alto custo inicial. Embora os preços dos sistemas fotovoltaicos tenham diminuído consideravelmente nos últimos anos, o investimento necessário para a instalação de painéis solares, inversores e sistemas de armazenamento ainda pode representar uma barreira significativa para muitos consumidores e empresas. Esse desafio é especialmente relevante em regiões onde os incentivos financeiros para a adoção de energias renováveis são limitados (Moussa *et al.*, 2020).

Outro desafio significativo é a intermitência da geração de energia solar. A produção de eletricidade por meio de painéis solares é dependente da luz solar disponível, o que resulta em variações na geração ao longo do dia e de acordo com as condições climáticas. Essa variabilidade pode comprometer a confiabilidade do sistema, especialmente em locais onde a energia solar é a principal fonte de eletricidade (Zhao *et al.*, 2021).

A implementação de sistemas de armazenamento de energia também representa um desafio significativo. Para otimizar o uso da energia solar, é

fundamental integrar soluções de armazenamento, como baterias, que, embora necessárias, podem elevar tanto os custos quanto a complexidade da instalação. A capacidade de armazenamento precisa ser adequada para assegurar que a energia gerada durante o dia esteja disponível à noite ou em períodos de baixa geração (Fares *et al.*, 2019). Outro fator importante a ser considerado é o espaço e a localização necessários para a instalação dos painéis solares.

A instalação requer uma quantidade significativa de área, o que pode ser um problema em áreas urbanas densamente povoadas ou em terrenos com restrições de ocupação. Além disso, a eficiência dos sistemas solares é afetada pela orientação e pelo ângulo dos painéis, o que pode ser desafiador de otimizar em algumas localidades (Tian *et al.*, 2019).

Por último, a integração de sistemas de energia solar à rede elétrica existente pode enfrentar desafios técnicos, como os problemas de inversão de fluxo, que ocorrem quando a energia gerada pelas usinas fotovoltaicas ultrapassa a demanda local e acaba retornando para a rede. Esse fenômeno pode sobrecarregar a infraestrutura da rede elétrica, dificultando a distribuição adequada da energia. Como resultado, várias concessionárias têm negado pedidos para a instalação de usinas fotovoltaicas em algumas regiões, devido à necessidade de adequação da rede para lidar com esses fluxos reversos. Além disso, é necessário gerenciar a variabilidade da geração solar, o que pode exigir investimentos adicionais e a implementação de novas tecnologias de gerenciamento da rede (Aghahosseini; Ghanandan, 2020).

4.2 COMPARAÇÃO COM FONTES DE ENERGIA CONVENCIONAIS

A comparação entre a energia solar fotovoltaica e as fontes de energia convencionais revela diferenças significativas em termos de sustentabilidade, custos e impactos ambientais.

A energia solar fotovoltaica é uma fonte limpa e renovável, pois não emite gases de efeito estufa durante sua operação, ao contrário de fontes convencionais como carvão e gás natural, que geram altas emissões de CO₂ e outros poluentes, agravando as mudanças climáticas. Estudos indicam que a transição para a energia solar pode reduzir significativamente a pegada de carbono das atividades energéticas e diminuir as emissões de gases poluentes (Galdino e Lima, 2019). Além disso, a energia solar não requer grandes volumes de água, ao contrário das hidrelétricas, que

podem impactar ecossistemas aquáticos e a biodiversidade local (Zanesco *et al.*, 2011).

Em comparação com as centrais hidrelétricas, o custo inicial da instalação de sistemas solares fotovoltaicos ainda pode ser consideravelmente elevado, chegando a até 50 vezes o custo de pequenas centrais hidrelétricas. Estudos indicam que o custo da energia solar pode ser até três vezes maior em relação à energia gerada por fontes convencionais interligadas à rede elétrica (Shayani *et al.*, 2006).

No entanto, com a contínua redução nos preços dos painéis solares e o aumento da eficiência tecnológica, a viabilidade econômica da energia solar tem melhorado significativamente, tornando-se uma alternativa cada vez mais competitiva. A eficiência na geração e distribuição de energia também apresenta diferenças importantes entre as duas fontes. A energia solar fotovoltaica permite a geração descentralizada, ou seja, a produção ocorre próxima ao ponto de consumo, reduzindo as perdas associadas ao transporte de eletricidade e aumentando a eficiência do sistema.

Em contraste, as fontes convencionais, como as usinas hidrelétricas e termelétricas, geralmente dependem de uma infraestrutura centralizada que pode resultar em perdas significativas durante a distribuição de energia (Rodrigues, 2002). Essa característica torna a energia solar uma opção mais eficiente, especialmente em áreas remotas ou rurais, onde a construção e manutenção de redes de transmissão podem ser caras e complexas.

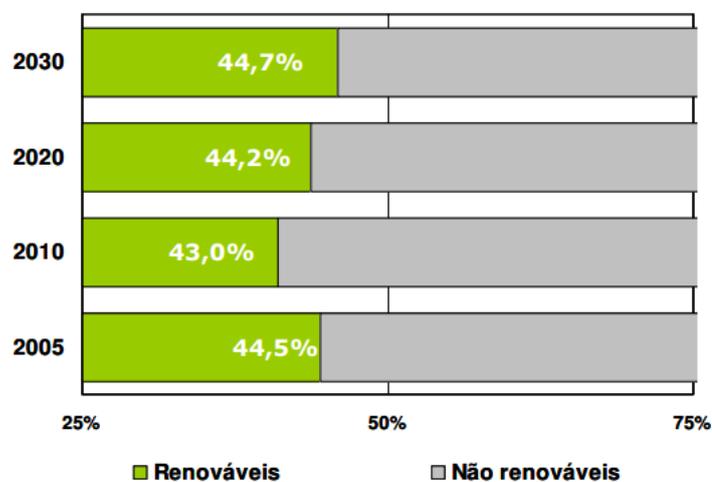
Porém, um desafio importante da energia solar é sua dependência das condições climáticas. A geração de eletricidade por meio de painéis solares é influenciada pela intensidade da luz solar disponível, o que pode comprometer a eficiência em dias nublados ou chuvosos. Em contraste, fontes convencionais, como o gás natural e o carvão, podem fornecer uma geração constante e previsível independentemente das condições climáticas, o que confere maior confiabilidade a esses sistemas em determinadas circunstâncias (Dinâmica Energia Solar, 2024).

A comparação entre a energia solar fotovoltaica e as fontes convencionais evidencia os benefícios ambientais substanciais da energia solar, como a redução das emissões de gases poluentes e o uso mais eficiente dos recursos hídricos. Embora os custos iniciais ainda possam ser um obstáculo, os avanços tecnológicos e a redução contínua dos preços tornam a energia solar cada vez mais viável economicamente. A transição para uma matriz energética diversificada, que inclua a

energia solar, é essencial para a construção de um futuro mais sustentável e a mitigação dos impactos ambientais.

Conforme ilustrado na figura 7, devido a iniciativas passadas, como a substituição da lenha e, mais recentemente, o aumento da oferta de energia elétrica proveniente da geração térmica a gás natural, a participação das energias renováveis na Matriz Energética Brasileira tem diminuído nos últimos anos. Em 1970, essa participação era de 58%, reduzindo-se para 49% em 1990 e 41% no ano 2000. Essa tendência de queda é esperada para os próximos anos. No entanto, a estratégia proposta neste estudo visa inverter essa trajetória, fazendo com que, ao final do período analisado, a participação das fontes renováveis na Matriz Energética Brasileira volte a crescer, promovendo uma maior sustentabilidade na produção de energia (EPE, 2007).

FIGURA 7 - Fontes renováveis na Matriz Energética Brasileira



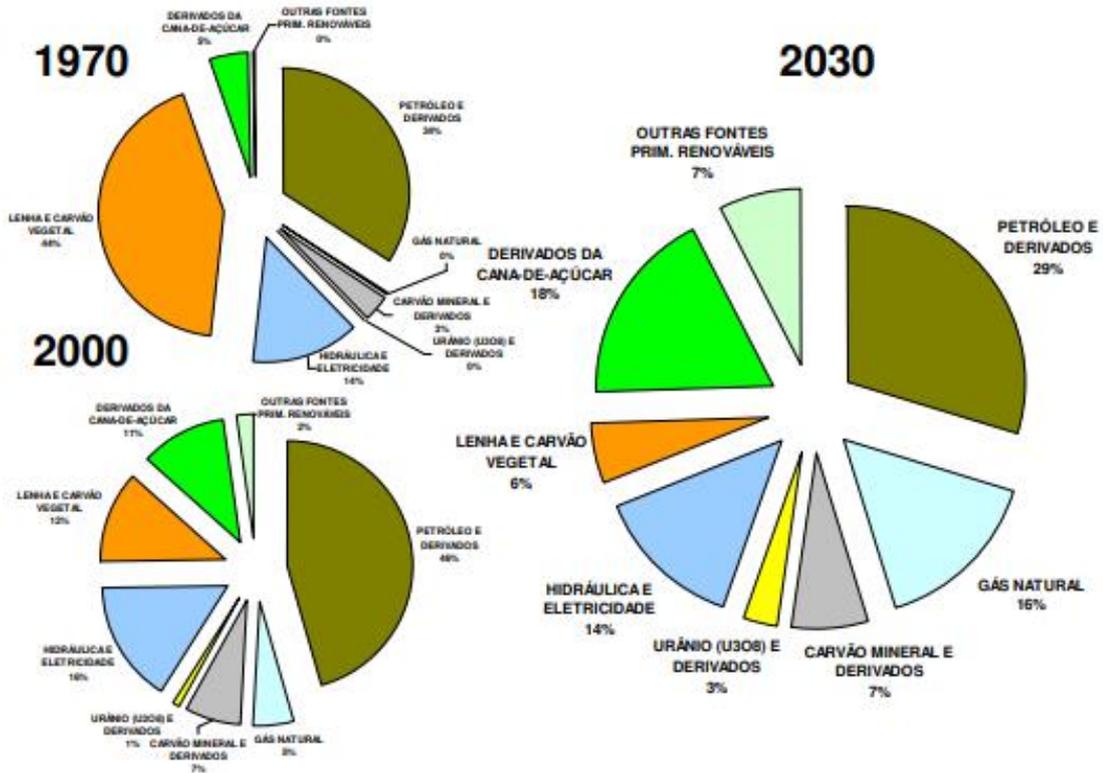
Fonte: EPE, 2007..¹¹

A Matriz Energética Brasileira tem mostrado uma tendência de diversificação ao longo do tempo (Figura 8). Em 1970, petróleo e lenha representavam 78% do consumo total de energia. Em 2000, essa participação foi reduzida para 73%, com a inclusão da energia hidráulica. Para 2030, projeta-se que petróleo, energia hidráulica, cana-de-açúcar e gás natural representarão 76% do consumo, enquanto a participação da lenha diminuirá. Esse movimento reflete uma transição para fontes

¹¹ Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/MATRIZ%202030.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2024.

mais sustentáveis, embora o domínio do petróleo e da energia hidráulica ainda seja um desafio para a implementação de energias alternativas, como solar e eólica (EPE, 2007).

FIGURA 8 - Evolução da estrutura da oferta interna de energia



Fonte: EPE¹²

5 DESAFIOS E OPORTUNIDADES

A energia solar tem se destacado como uma das fontes mais promissoras de energia renovável no Brasil, com um crescimento expressivo tanto na capacidade instalada quanto em sua contribuição para a matriz energética nacional. No entanto, a adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais enfrenta uma série de desafios que precisam ser superados para garantir um futuro sustentável e viável para essa fonte de energia.

¹² Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/MATRIZ%202030.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2024.

5.1 BARREIRAS À ADOÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS RESIDENCIAIS

Embora a energia solar fotovoltaica apresente diversos benefícios, sua adoção ampla, especialmente em instalações residenciais, ainda enfrenta obstáculos significativos. Moreira e Castro (2021) apontam que o custo inicial de instalação e a falta de conhecimento sobre a tecnologia são as principais barreiras. Apesar da queda nos preços dos equipamentos e do retorno financeiro positivo a longo prazo, muitos consumidores ainda hesitam devido ao alto investimento inicial.

Um dos maiores obstáculos à adoção de sistemas fotovoltaicos é a falta de conhecimento e conscientização sobre os benefícios da energia solar. Muitos consumidores não estão cientes das vantagens econômicas e ambientais que esses sistemas podem oferecer, como a redução significativa nas contas de energia e a diminuição das emissões de carbono (Maya Energy, 2024). Além disso, questões financeiras continuam a ser um desafio considerável. Embora existam linhas de crédito específicas para a instalação de painéis solares, o investimento inicial permanece elevado, especialmente para famílias de baixa renda (Tecnundo, 2024).

Outro desafio relevante está na regulamentação do setor, que apresenta grande variação entre os estados brasileiros. A falta de uniformidade nas políticas públicas dificulta o acesso a incentivos fiscais e subsídios, que poderiam facilitar a adoção de energia solar (Absolar, 2024). Além disso, desafios técnicos relacionados à integração dos sistemas fotovoltaicos à rede elétrica existente ainda precisam ser resolvidos para garantir uma operação eficiente e segura.

5.2 FUTURO DA ENERGIA SOLAR E SEU PAPEL NA MATRIZ ENERGÉTICA

O futuro da energia solar fotovoltaica é promissor, com o papel dessa tecnologia na matriz energética global em crescimento à medida que mais países investem em fontes renováveis. Dias e Freitas (2020) sugerem que, com o avanço tecnológico, os sistemas fotovoltaicos se tornarão mais eficientes e acessíveis, consolidando-se como uma das principais alternativas para o abastecimento energético mundial.

Previsões indicam que até 2060, a capacidade instalada de energia solar pode atingir 370 GW (Maya Energy, 2024), o que não apenas diversificará a matriz energética do país, mas também contribuirá para a segurança no abastecimento de energia. No Brasil, a energia solar já representa cerca de 18% da eletricidade consumida (Forbes, 2023), e espera-se que essa participação aumente à medida que as tecnologias se tornem mais acessíveis e os custos continuem a diminuir.

A integração de sistemas de armazenamento será essencial para o futuro da energia solar. Com o avanço das baterias e outras tecnologias de armazenamento, será possível mitigar os efeitos da intermitência da geração solar, permitindo uma distribuição mais eficaz da energia produzida (Barroso, 2023). Isso não apenas melhorará a estabilidade da rede elétrica, mas também proporcionará aos consumidores maior autonomia sobre sua produção e consumo energético.

O compromisso do Brasil com políticas públicas que incentivem o uso de energias renováveis será fundamental para alcançar esses objetivos. A implementação de incentivos fiscais e subsídios pode impulsionar ainda mais a adoção da energia solar, trazendo benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a economia local (Absolar, 2024). Assim, ao superar as barreiras atuais e aproveitar as oportunidades proporcionadas pela tecnologia solar, o Brasil tem a oportunidade de se consolidar como um líder global em energias renováveis.

6 METODOLOGIA

O sistema solar fotovoltaico instalado na residência, do tipo *on-grid*, foi projetado para otimizar o consumo interno de eletricidade gerada. Caso haja excesso de energia não consumida, este será automaticamente devolvido à rede elétrica local, gerando créditos de energia para o consumidor. Como não há sistema de armazenamento de eletricidade, durante períodos em que a produção não seja suficiente, como à noite, a energia necessária será fornecida pela rede elétrica tradicional, garantindo o fornecimento contínuo. A operação desse sistema é regida pela Resolução Normativa nº 787/2020 da ANEEL.

O objetivo deste estudo é ilustrar a implementação de um sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição da CEMIG, com a proposta de gerar energia para consumo próprio e injetar o excedente na rede da concessionária sempre que a

demanda da residência for inferior à energia gerada. O sistema fotovoltaico foi dimensionado com base na média de consumo de uma residência localizada no município de Juiz de Fora, com quatro habitantes de classe média. A análise do consumo foi realizada com base na tabela 1, elaborada a partir dos dados da fatura de energia da residência em estudo.

TABELA 1 - Consumo Mensal

Mês	Consumo (kWh)
Outubro (2024)	334
Setembro (2024)	390
Agosto (2024)	324
Julho (2024)	352
Junho (2024)	330
Mai (2024)	322
Abril (2024)	361
Março (2024)	372
Fevereiro (2024)	335
Janeiro (2024)	411
Dezembro (2023)	369
Novembro (2023)	338
Outubro (2023)	363
Média	383,42

Fonte: Autora, 2024.

Com base nos dados de insolação e no potencial de geração dos módulos fotovoltaicos, foi possível calcular a energia gerada pelos painéis, o que permitiu avaliar tanto o consumo diário quanto a compensação de energia. Para isso, é essencial determinar a quantidade de energia a ser gerada, já que, em um sistema conectado à rede, é possível planejar uma solução que atenda parcialmente à demanda da residência.

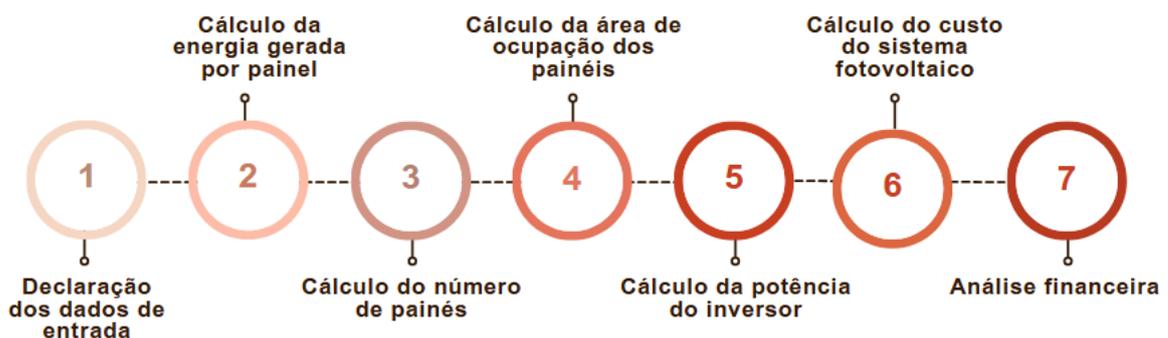
Em seguida, foi realizada uma análise para definir a melhor posição para a instalação dos painéis, levando em conta que a residência já está construída. Isso envolveu uma avaliação detalhada para determinar o posicionamento ideal dos módulos, os quais devem ser inclinados de acordo com a latitude do local. Após essa análise, foram estabelecidas as especificações do painel fotovoltaico e do inversor,

com uma previsão da energia gerada, a fim de analisar a viabilidade do investimento e o retorno econômico esperado.

6.1 CÁLCULOS E DIMENSIONAMENTOS

A Figura 9 ilustra o procedimento seguido para o dimensionamento do sistema solar proposto neste estudo. Para a execução dos cálculos necessários, foi utilizado o software MATLAB como ferramenta computacional. O código original foi desenvolvido pela professora Camile Arêdes Moraes e, posteriormente, adaptado por mim para atender às especificidades deste estudo. O código adaptado está disponível no Anexo A deste artigo.

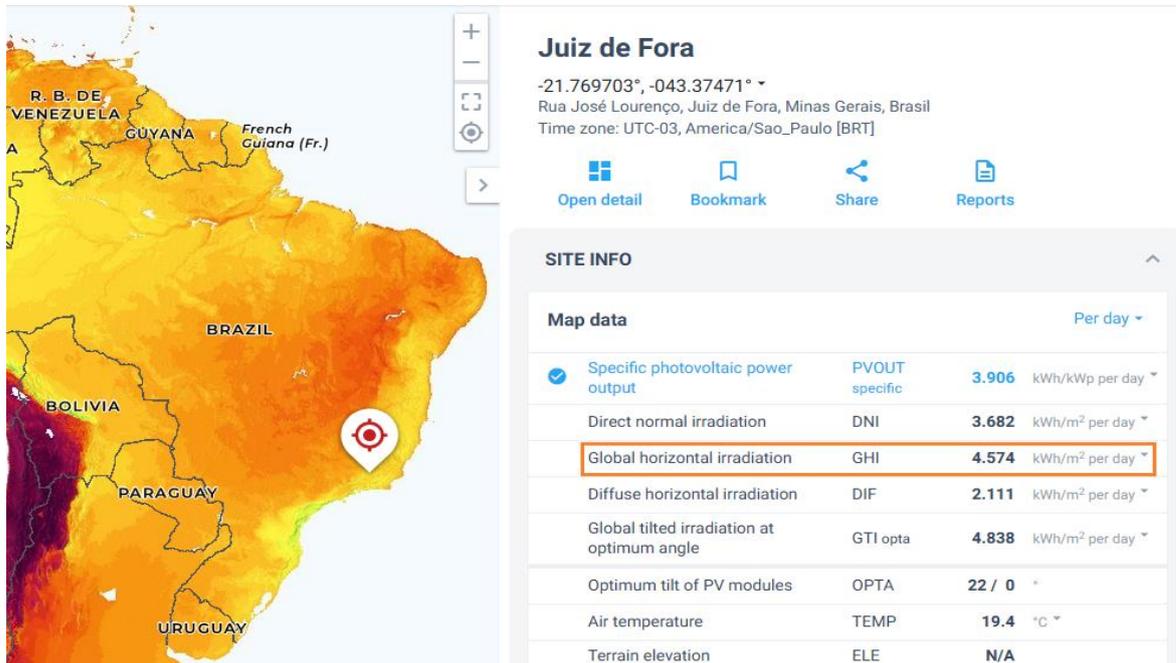
Figura 9 - Fluxograma



Fonte: Autora, 2024.

Inicialmente, foram declarados os dados de entrada essenciais para o dimensionamento do sistema, incluindo parâmetros como a potência dos painéis solares, características do inversor, dados meteorológicos e demanda energética do local. Para obter informações detalhadas sobre a irradiação solar, foi utilizado o site GLOBAL SOLAR ATLAS, que fornece valores precisos de irradiação global para a área de Juiz de Fora, como ilustrado na Figura 10.

FIGURA 10 - Dado da irradiação solar em Juiz de Fora - MG



Fonte: Global Solar Atlas, 2024.

Em seguida, foi realizado o cálculo da energia gerada por cada painel, estabelecendo a base para determinar o número necessário de painéis. A área total ocupada pelos painéis é calculada, fornecendo uma visão clara dos requisitos espaciais para a instalação. A potência do inversor é dimensionada para suportar a produção total de energia, considerando também uma margem de segurança para eventuais sobrecargas.

Ao final deste processo analítico, foi um relatório detalhado, que inclui a energia mensal gerada por painel, o número de painéis necessários, a área exigida para a disposição dos painéis e a potência total gerada. Essas métricas são fundamentais para garantir uma implementação eficiente e otimizada de sistemas fotovoltaicos *on-grid*.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto de dimensionamento do sistema solar fotovoltaico foi cuidadosamente estruturado com o objetivo de garantir que a residência contasse com

um fornecimento energético adequado, sustentável e econômico, alinhado às demandas do consumo moderno e às práticas sustentáveis. Desde o início, foi realizada uma análise criteriosa, com a coleta detalhada de dados como o histórico de consumo energético da residência, fator essencial para compreender os padrões de uso de energia ao longo do ano, incluindo variações sazonais. Além disso, a localização geográfica foi considerada com grande atenção, uma vez que a disponibilidade de radiação solar é fortemente influenciada por fatores como latitude, condições climáticas e características regionais.

Essa abordagem permitiu estabelecer uma base sólida para determinar a quantidade exata de energia necessária para suprir a demanda anual da residência, priorizando a eficiência no uso de recursos e a maximização do potencial de geração solar. A partir dessa análise inicial, foi definida a instalação de 6 módulos solares fotovoltaicos, cada um com uma capacidade de geração de 0,59 kWp, totalizando uma potência instalada de 3,54 kWp. Essa configuração foi planejada para atender à média de consumo da residência, garantindo a autossuficiência energética na maioria dos meses.

Cada painel foi projetado para gerar, em média, 64,65 kWh por mês, resultando em uma produção total mensal de 389,91 kWh para os 6 módulos combinados. Para acomodar essa estrutura, foi calculada uma área necessária de 12,04 m², com os módulos estrategicamente posicionados no telhado da residência. O layout considerou elementos fundamentais, como a inclinação e orientação dos painéis, que foram ajustados para maximizar a captação da radiação solar durante o ano. Essa disposição otimizou o uso do espaço disponível, considerando que a área para instalação pode ser uma limitação em muitas residências.

O sistema também inclui um inversor com capacidade nominal de 4,00 kW, cuidadosamente dimensionado para atender à potência combinada dos módulos solares. O inversor desempenha um papel crucial no funcionamento do sistema, realizando a conversão da corrente contínua (CC) gerada pelos módulos em corrente alternada (CA), que é compatível com os aparelhos domésticos. Além disso, a escolha do inversor considerou características como alta eficiência de conversão, resistência a sobrecargas e confiabilidade a longo prazo, prevenindo perdas de energia e otimizando o desempenho geral do sistema.

Sob a perspectiva econômica, o projeto apresenta benefícios significativos. Com uma economia mensal estimada de R\$ 349,13, o sistema proporciona uma

redução anual de aproximadamente R\$ 4.189,62 na conta de energia elétrica. O retorno do investimento (payback) foi calculado em cerca de 2 anos, o que o torna altamente atraente para os consumidores, especialmente considerando a longa vida útil do sistema, que ultrapassa 25 anos. Esse investimento de longo prazo não apenas reduz os custos operacionais da residência, mas também agrega valor ao imóvel, tornando-o mais atrativo e sustentável.

Para estimar o desempenho do sistema ao longo do ano, foram realizados cálculos detalhados com base na radiação solar disponível na região, utilizando dados climáticos e ferramentas como o **Global Solar Atlas**. Esses cálculos confirmaram que o sistema seria capaz de atender integralmente à demanda energética da residência, com a possibilidade de gerar excedentes em determinados meses. Esses excedentes podem ser exportados para a rede elétrica pública, conforme regulamentado pela ANEEL (Resolução Normativa nº 787/2020), gerando créditos de energia que podem ser utilizados para compensar o consumo em períodos de menor geração solar.

Os benefícios ambientais também são notáveis. A instalação do sistema contribui diretamente para a redução da pegada de carbono da residência, substituindo o consumo de energia de fontes fósseis por uma fonte limpa e renovável. Isso não apenas reduz as emissões de gases de efeito estufa, mas também promove um modelo de consumo mais consciente, alinhado aos princípios de sustentabilidade e conservação ambiental.

Portanto, a partir da análise da localização geográfica, do histórico de consumo de energia e das características técnicas do sistema fotovoltaico, o projeto se mostrou altamente viável tanto técnica quanto economicamente. A configuração com 6 módulos solares e um inversor de 4,00 kW não apenas atende às necessidades energéticas da residência, mas também representa um passo significativo em direção a um futuro energético mais sustentável. Além de proporcionar autonomia energética, a solução destaca-se como uma estratégia de investimento robusta e ecologicamente responsável, promovendo um consumo mais eficiente e alinhado às práticas de desenvolvimento sustentável.

8 CONCLUSÃO

A energia solar fotovoltaica desponta como uma solução estratégica e indispensável para o futuro energético do Brasil, aproveitando um dos maiores potenciais de radiação solar do mundo. Com uma média anual de irradiação que supera 5 kWh/m² por dia em grande parte do território nacional, o país está em uma posição privilegiada para liderar a transição global rumo a uma matriz energética mais limpa e renovável. Essa abundância de recurso solar torna a energia fotovoltaica não apenas uma alternativa viável, mas também essencial para a diversificação e a segurança do abastecimento energético no Brasil.

O projeto de dimensionamento do sistema fotovoltaico para a residência em questão exemplifica o potencial dessa tecnologia ao traduzir as condições climáticas locais em benefícios tangíveis. A análise detalhada do consumo energético, que identificou uma demanda média mensal de 383,42 kWh, foi combinada com dados climáticos específicos da região para projetar uma solução eficiente e personalizada. A instalação de 6 módulos solares, com uma capacidade total de 3,54 kWp, e um inversor de 4,00 kW foi dimensionada para atender plenamente às necessidades energéticas da residência. Esse sistema é capaz de gerar 389,91 kWh por mês, suprimindo o consumo e garantindo a possibilidade de exportação de energia excedente para a rede elétrica, gerando créditos para consumo futuro.

O impacto econômico do sistema também é notável. Além da redução expressiva nos custos de energia elétrica, com uma economia anual estimada em R\$ 4.189,62, o projeto apresenta um retorno sobre o investimento (payback) em apenas 1,99 anos, um período extremamente atrativo, especialmente considerando a vida útil do sistema, que ultrapassa 25 anos. Esse rápido retorno financeiro reflete não apenas a eficiência do sistema, mas também os benefícios proporcionados pela geração distribuída, que permite que os consumidores residenciais contribuam diretamente para a redução de custos energéticos e do impacto ambiental.

Além de promover benefícios diretos à residência, como a autonomia energética, o projeto contribui significativamente para a redução da pegada de carbono. A geração de energia limpa e renovável evita emissões de gases de efeito estufa, que seriam produzidos por fontes tradicionais baseadas em combustíveis

fósseis. Nesse sentido, o sistema fotovoltaico se alinha perfeitamente aos princípios da sustentabilidade, promovendo um modelo de consumo mais consciente e responsável.

O setor solar fotovoltaico no Brasil tem experimentado um crescimento exponencial nos últimos anos, impulsionado pelo avanço tecnológico e pela redução dos custos de instalação. Inovações como a melhoria na eficiência dos módulos solares, o desenvolvimento de inversores mais confiáveis e o surgimento de sistemas híbridos têm tornado a energia solar cada vez mais competitiva e acessível. Esses avanços também possibilitam a integração da energia fotovoltaica com tecnologias complementares, como sistemas de armazenamento e redes inteligentes, ampliando sua versatilidade e eficiência.

O impacto econômico do setor solar vai além das economias geradas na conta de luz. A crescente demanda por sistemas fotovoltaicos estimula a criação de empregos em diversas áreas, como fabricação de equipamentos, instalação, manutenção e pesquisa e desenvolvimento. Estudos indicam que cada megawatt instalado é capaz de gerar entre 25 e 30 empregos diretos e indiretos, fortalecendo a indústria nacional e promovendo o desenvolvimento econômico local.

A adoção de sistemas fotovoltaicos, como o implementado neste projeto, também desempenha um papel importante na diversificação da matriz energética do Brasil. Atualmente, o país ainda depende fortemente de fontes hidrelétricas, que, apesar de renováveis, são vulneráveis a períodos de seca e à redução na disponibilidade de recursos hídricos devido às mudanças climáticas. A energia solar oferece uma alternativa resiliente e descentralizada, capaz de complementar a geração hídrica e reduzir a vulnerabilidade do sistema elétrico a eventos climáticos extremos.

Portanto, o sistema projetado não se limita a resolver as necessidades energéticas de uma residência; ele representa um modelo replicável que demonstra os múltiplos benefícios da energia fotovoltaica para a sociedade como um todo. Com uma instalação que combina eficiência, sustentabilidade e viabilidade econômica, o projeto reflete o potencial da energia solar como pilar estratégico para um futuro energético mais limpo, seguro e acessível. À medida que o setor continua a crescer, a energia fotovoltaica se consolida como uma ferramenta indispensável para a mitigação das mudanças climáticas e a construção de um futuro mais sustentável e economicamente vantajoso para o Brasil.

ABSTRACT

This study analyzes the feasibility of designing residential photovoltaic systems, in accordance with ANEEL's Regulatory Resolution No. 787/2020. The project was planned to provide sustainable and economical energy to the residence, using six solar panels of 0.59 kWp each, totaling 3.54 kWp. The monthly generated energy was estimated at 389.91 kWh. A 4.00 kW inverter was selected to ensure efficient energy conversion. The estimated monthly savings are R\$ 349.13, with a return on investment in 2 years. The total system cost was R\$ 8,330.77, with the possibility of exporting excess energy to the grid, generating energy credits. The project proved to be both technically and economically feasible, contributing to the sustainability and reduction of the residence's carbon footprint.

Keywords: Solar Energy. Distributed Generation. Sustainability. Payback.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **2024**: O ano da energia solar no Brasil. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/https-www-modaisemfoco-com-br-noticias-2024-o-ano-da-energia-solar-no-brasil>. Acesso em: 21 set. 2024.

AGHAHOSSEINI, A.; GHANADAN, S. **Challenges in solar integration**: Grid management and technological advancements. *Renewable Energy*, 2020.

AGHAHOSSEINI, A.; GHANADAN, R. **Technical challenges in integrating solar energy into electricity grids**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 124, p. 109779, 2020.

ALVES, Marliana de Oliveira Lage. **Energia solar**: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2019.

ARAÚJO, J. A.; FERNANDES, P. R. **Sistemas fotovoltaicos**: Seleção de inversores e otimização do desempenho. São Paulo: Editora Solartech, 2020.

ATLAS, F. L. **Tecnologias de conversão de energia solar**: uma análise do potencial. *Sustainable Energy Review*, v. 5, n. 4, p. 113-130, 2005.

BARBOSA, F. R.; SILVA, D. A. **Comparação ambiental entre energia solar fotovoltaica e fontes convencionais**. Revista de Estudos Ambientais, v. 9, n. 2, p. 85-98, 2019.

BARROSO, Luiz Augusto. **Geração solar: o futuro está nos pequenos**. Forbes Brasil, 2023.

BIONE, A. M.; et al. **Agrovoltaics: An innovative approach to protecting biodiversity and improving agricultural productivity**. Environmental Sustainability, 2004.

BRITO, A. C.; VERMA, A.; MIDTGARD, O.; SATRE, A. A energia solar e o seu papel na matriz energética global. **Revista de Energia Sustentável**, v. 17, n. 3, p. 45-60, 2011.

COSTA, A. S.; NOGUEIRA, P. F. **Sistemas fotovoltaicos: análise comparativa entre modelos conectados à rede, off-grid e híbridos**. Energias Renováveis, v. 35, n. 1, p. 85-96, 2018.

DIAS, S. T.; FREITAS, G. V. O futuro da energia solar na matriz energética mundial. **Revista de Energias Renováveis e Sustentabilidade**, v. 13, n. 1, p. 75-88, 2020.

DI SOUZA, M. F. **Regulamentações e infraestrutura de redes elétricas**. Porto Alegre: Editora PQR, 2016.

DI SOUZA, Ronilson. **Os sistemas de energia solar fotovoltaica**. Bluesol Energia Solar, 2016. Disponível em: <https://programaintegradoronline.com.br/wpcontent/uploads/2016/03/Livro-Digital-de-Introdução-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf>. Acesso em: 21 set. 2024.

DUNLOP, James P. **Photovoltaic Systems**. The Fairmont Press, 2009.

DUNLOP, D. **Energy systems and technologies: Off-grid solar applications**. 2. ed. New York: Springer, 2009.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: EPE, 2007.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética Brasileira 2030**. Brasília: EPE, 2007. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/MATRIZ%202030.pdf>. Acesso em: 05 out. 2024.

FARES, R.; AL-ALI, A.; RASHED, M. **Energy storage solutions for solar power systems**: a review. *Renewable Energy*, v. 136, p. 1029-1040, 2019.

FARES, R.; et al. **The role of energy storage in solar power systems**: Challenges and opportunities. *Energy Storage Journal*, 2019.

FERREIRA, G. S.; DIAS, A. M. **O uso de baterias em sistemas fotovoltaicos**: uma análise econômica e técnica. *Revista de Sustentabilidade Energética*, v. 7, n. 1, p. 35-48, 2019.

FERREIRA, L. M.; DIAS, R. F. **Tecnologias e tendências em baterias solares**: Lítio-íon versus chumbo-ácido. Rio de Janeiro: Editora Green Energy, 2019.

GALDINO, F.; LIMA, J. **Energia solar e suas contribuições para a redução das emissões de CO₂**. *Energia & Clima*, 2019.

HINRICHS, R.; KLEINBACH, M. **Energy**: Its use and the environment. Cengage Learning, 2003.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2023**. Agência Internacional de Energia, 2023. IRENA. *Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2022*. International Renewable Energy Agency, 2022.

IST. Institute of Solar Technology. **Overview of the Photovoltaic Effect and Its Discovery**. 2004.

KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering**: processes and systems. 2. ed. Oxford: Academic Press, 2016.

KIBERT, C. J. **Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery**. John Wiley & Sons, 2016.

LAMBERTS, Roberto; GHISI, Enedir; PEREIRA, Cláudia Donald; BATISTA, Juliana Oliveira. **Casa eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010.

LAMBERTS, R. et al. **Energias renováveis: desafios e soluções**. São Paulo: Editora XYZ, 2010.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. **Drought in Northeast Brazil - past, present, and future**. Theoretical and Applied Climatology, n. 20, p. 1-12, 2016.

MARTINS, A.; GOMES, P. **Energia Solar e Tecnologias de Monitoramento**. GreenTech Publishing, 2018.

MARTINS, F. A.; GOMES, R. P. **Sistemas de monitoramento em energia solar: Desafios e inovações**. São Paulo: Editora Energia Sustentável, 2018.

MARTINS, J. R.; GOMES, T. A. Sistemas de monitoramento em tempo real para sistemas fotovoltaicos. **Energias Renováveis e Sustentabilidade**, v. 10, n. 3, p. 112-125, 2018.

MARTINS, M. A. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico on-grid com energia de reserva**. 2018. 69 p. (Monografia de conclusão de curso) — UNISUL, Pedra Branca, 2018.

MARTINS, Paulo. **Tecnologias de Inversores em Sistemas Fotovoltaicos: Central, Microinversores e String**. 1ª ed. São Paulo: Editora Energia Solar, 2023.

MAYA ENERGY. **Futuro da Energia Solar: Previsões de Crescimento e Impacto**. Disponível em: <https://mayaenergy.com.br/futuro-da-energia-solar-previsoes-de-crescimento-e-impacto>. Acesso em: 21 set. 2024.

MENDES, J. R.; LOPES, F. G. **Tecnologias de energia solar: eficiência e inovação**. São Paulo: Editora Verde, 2021.

MENDES, L. T.; LOPES, V. F. **Análise de eficiência dos diferentes tipos de painéis fotovoltaicos**. *Journal of Renewable Energy*, v. 15, n. 4, p. 200-210, 2021.

MOUSSA, H.; MEKKI, K.; EL AMRI, N. **Barriers to solar energy adoption: a systematic review of the literature**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 132, p. 110051, 2020.

MOREIRA, C. P.; CASTRO, R. F. **Barreiras à adoção de sistemas solares residenciais: uma revisão crítica**. *Journal of Solar Energy Studies*, v. 14, n. 2, p. 101-110, 2021.

PEREIRA, G. F.; SOUZA, A. R. **Eficiência dos sistemas fotovoltaicos: uma análise das variáveis ambientais**. *Revista de Engenharia Solar*, v. 28, n. 3, p. 101-115, 2020.

PEREIRA, G. M.; SOUZA, M. C. **Armazenamento de energia em sistemas fotovoltaicos: Soluções e desafios**. Brasília: Editora Energia Solar, 2020.

PEREIRA, J. P. **Sistemas fotovoltaicos: teoria e prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora ABC, 2019.

PEREIRA, Narlton Xavier. **Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual de São Paulo. Sorocaba, 2019.

PNUMA. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Relatório sobre a Capacidade de Energia Solar Global**, 2020.

RODRIGUES, L. C. **Sistemas Fotovoltaicos: Uma Alternativa Energética Sustentável**. Centro Universitário FG - UNIFG, 2002.

SANTOS, L. R.; ALMEIDA, M. P. O crescimento da energia solar fotovoltaica e seu impacto no desenvolvimento sustentável. **Journal of Renewable Energy Studies**, v. 9, n. 2, p. 72-89, 2021.

SANTOS, R. B.; ALMEIDA, M. P. Energia Solar Fotovoltaica: avanços tecnológicos e perspectivas de mercado. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 42, n. 1, p. 50-62, 2021.

SPERTINO, F.; MARTIN, M. J. **Eficiência no monitoramento de sistemas fotovoltaicos**: Plataformas e tecnologias. Lisboa: Editora Solartech, 2022.

SHAYANI, R. A.; OLIVEIRA, M. A. G.; CAMARGO, I. M. T. **Comparação do Custo entre Energia Solar Fotovoltaica e Fontes Convencionais**. Brasília: Anais do Congresso, 2006.

SILVA, A. L. et al. **Análise econômica de sistemas fotovoltaicos off-grid**. Belo Horizonte: Editora Energia, 2021.

SILVA, J. M.; CARVALHO, L. F. **O efeito fotovoltaico**: da descoberta à aplicação em larga escala. *Journal of Solar Energy*, v. 30, n. 2, p. 120-135, 2019.

SILVA, Matheus Segundo da; LANA, Tiago Rocha; SILVA JÚNIOR, José Antônio; TALARICO, Matheus G. **Energia solar fotovoltaica**: Revisão bibliográfica. *Revista Mythos*, v. 14, n. 2, p. 51-61, 2021.

SOLAR ENERGY INDUSTRIES ASSOCIATION (SEIA). **Solar Industry Research Data**. Disponível em: <https://www.seia.org/research-resources/solar-industry-research-data>. Acesso em: 05 out. 2024.

TAVARES, L. C.; GOMES, E. M. Desafios e oportunidades no mercado de energia solar no Brasil. *Journal of Energy Policy*, v. 14, n. 1, p. 1-10, 2023.

TIAN, L.; et al. **Optimization of solar panel installation**: Challenges and strategies. *Solar Energy*, 2019.

TORRES, F. A. **Sistemas fotovoltaicos híbridos**: integração e desafios. Rio de Janeiro: Editora Solar, 2012.

TRENDS, G. C. **Energia Solar**: Tendências e Inovações. 2023. Disponível em: <https://www.trends.com.br/energia-solar-tendencias-e-inovacoes>. Acesso em: 21 set. 2024.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Solar Energy Technologies Office. **Solar Energy Basics**. Disponível em: <https://www.energy.gov/solar-energy-basics>. Acesso em: 05 out. 2024.



WANDERLEY, P. C. **Energia solar em áreas isoladas**: alternativas e desafios. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Verde, 2013.

ZANESCO, E. F.; et al. **Water conservation through the adoption of solar energy in Brazil's agricultural sector**. Energy Science & Engineering, 2018.

ANEXO A

clear all

format bank

%%

% ===== PASSO 1: DECLARAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA =====

flag = 1; % Caso base

%flag = 0; % Usuário entra com os valores. Obs: estão em default nulo

if flag == 1

%% DADOS DO PAINEL:

pot_painel = 0.59; % potência de cada painel a ser instalado (kWp)

altura_painel = 2.015; % altura do painel dada em metros

largura_painel = 0.996; % largura do painel dada em metros

perda_ir = 0.2; % perda na conversão em percentual.

% A eficiência do painel é de 80%;

%% DADO DO INVERSOR

overload_inv = 0.13; % O termo overload é utilizado para definir o máximo

% de potência de entrada que o inversor suporta acima de sua potência

% nominal. Esse valor aqui é percentual.

%% DADOS GERAIS

ir_media = 4.566; % irradiação solar média (kWh/m²)

carga = 383.42; % consumo mensal a ser atendido (kWh/mês)

custo_kWh = 0.9; % custo médio da energia elétrica em R\$/kWh

investimento_inicial = 8330.77; % custo total do sistema em R\$

else

%% USUÁRIO ENTRA COM OS VALORES AQUI ABAIXO:

%% DADOS DO PAINEL:

pot_painel = 410; % potência de cada painel a ser instalado (kWp)

altura_painel = 2.015; % altura do painel dada em metros

largura_painel = 0.996; % largura do painel dada em metros

perda_ir = 0; % perda na conversão em percentual.

%% DADO DO INVERSOR

overload_inv = 0; % O termo overload é utilizado para definir o máximo

% de potência de entrada que o inversor suporta acima de sua potência

% nominal. Esse valor aqui é percentual.

%% DADOS GERAIS

ir_media = 0; % irradiação solar média (kWh/m²)

carga = 0; % consumo mensal a ser atendido (kWh/mês)

custo_kWh = 0; % custo médio da energia elétrica em R\$/kWh

investimento_inicial = 0; % custo total do sistema em R\$

end

%%

% ===== PASSO 2: Cálculo da energia =====

% Energia gerada por painel, por dia em kWh/dia:

Energia_painel_dia = pot_painel * ir_media * (1 - perda_ir);

% Energia gerada por painel, por mês em kWh/mês:

Energia_painel_mes = Energia_painel_dia * 30;

% ===== PASSO 3 Cálculo do número de Paineis =====

contador = 0;

```

numero = 2;
while numero > 1
contador = contador + 1;
numero = carga / (contador * Energia_painel_mes);
salva_numero(1, contador) = numero;
end

% ===== PASSO 4: Área de ocupação dos Paineis =====
area_painel = contador * altura_painel * largura_painel;

% ===== PASSO 5: Cálculo da Potência do Inversor =====
pot_total_paineis = contador * pot_painel;
pot_int = floor(pot_total_paineis);
inv = pot_int + (overload_inv * pot_int);
if pot_total_paineis > inv
inv = ceil(pot_total_paineis);
end

%%
% ===== PASSO 6: Economia e Payback =====
% Economia mensal em R$ (energia gerada pelos painéis * custo por kWh)
economia_mensal = contador * Energia_painel_mes * custo_kWh;

% Economia anual em R$
economia_anual = economia_mensal * 12;

% Tempo de retorno do investimento (payback simples)
tempo_retorno = investimento_inicial / economia_anual;

%%
% ===== RELATÓRIO FINAL =====
disp('#####')
disp(' ')
disp(' RELATÓRIO DAS PLACAS SOLARES')
disp(' ')
fprintf('Energia mensal gerada por painel: %1.2f kWh/mês\n', Energia_painel_mes)
fprintf('Número de painéis necessários: %d\n', contador)
fprintf('Área necessária para disposição dos painéis: %1.2f m^2\n', area_painel)
fprintf('Potência total gerada pelos painéis: %1.2f kW\n', pot_total_paineis)
disp(' ')

disp('#####')
disp(' ')
disp(' RELATÓRIO DO INVERSOR')
disp(' ')
fprintf('Potência do inversor: %1.2f kW\n', inv)
disp(' ')

disp('#####')
disp(' ')
disp(' RELATÓRIO ECONÔMICO')
disp(' ')
fprintf('Economia mensal aproximada: R$ %1.2f\n', economia_mensal)
fprintf('Economia anual aproximada: R$ %1.2f\n', economia_anual)
fprintf('Tempo aproximado de retorno do investimento: %1.2f anos\n', tempo_retorno)
disp(' ')

```