

Sistema fotovoltaico off-grid para cargas de baixo consumo: Dimensionamento, análise de eficiência e aplicações práticas

Off-grid photovoltaic system for low consumption loads: Sizing, efficiency analysis and practical applications

Sistema fotovoltaico fuera de red para cargas de bajo consumo: Dimensionamiento, análisis de eficiencia y aplicaciones prácticas

Recebido: 02/10/2025 | Revisado: 07/10/2025 | Aceitado: 07/10/2025 | Publicado: 09/10/2025

Patrick da Silva Reis

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3212-111X>
Universidade Nilton Lins, Brasil
E-mail: parreis.silva@gmail.com

Roger Santos Koga

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6399-2609>
Universidade Nilton Lins, Brasil
E-mail: rogerkoga@yahoo.com.br

Resumo

Este trabalho investiga a geração de energia renovável por meio de sistemas fotovoltaicos off-grid, com foco em aplicações de baixa potência para iluminação. O objetivo principal é analisar os benefícios do uso de energia solar off-grid, por meio do desenvolvimento de um protótipo funcional de iluminação. Os objetivos específicos incluem: caracterizar o funcionamento e os principais componentes do sistema; identificar vantagens e limitações; avaliar seu potencial em condições adversas; e estimar o custo-benefício da solução. A metodologia adotada combina abordagem mista, com objetivos exploratórios e explicativos, utilizando pesquisa bibliográfica e experimental. Os resultados indicam que o protótipo atende satisfatoriamente às necessidades de iluminação propostas, demonstrando eficiência e viabilidade prática. Conclui-se que sistemas fotovoltaicos off-grid promovem sustentabilidade e independência energética, fornecendo eletricidade contínua em locais remotos ou com rede elétrica instável, evidenciando seu potencial como alternativa confiável e ambientalmente responsável.

Palavras-chave: Energia renovável; Geração de energia; Fotovoltaico; Off-grid; Iluminação.

Abstract

This work investigates renewable energy generation through off-grid photovoltaic systems, focusing on low-power lighting applications. The main objective is to analyze the benefits of using off-grid solar energy through the development of a functional lighting prototype. The specific objectives include: characterizing the system's operation and main components; identifying advantages and limitations; evaluating its potential under adverse conditions; and estimating the solution's cost-benefit. The adopted methodology combines a mixed approach, with exploratory and explanatory objectives, utilizing bibliographical and experimental research. The results indicate that the prototype satisfactorily meets the proposed lighting needs, demonstrating efficiency and practical feasibility. It is concluded that off-grid photovoltaic systems promote sustainability and energy independence, providing continuous electricity in remote locations or locations with unstable electrical grids, demonstrating their potential as a reliable and environmentally responsible alternative.

Keywords: Renewable energy; Power generation; Photovoltaic; Off-grid; Lighting.

Resumen

Este trabajo investiga la generación de energía renovable mediante sistemas fotovoltaicos aislados de la red, centrándose en aplicaciones de iluminación de bajo consumo. El objetivo principal es analizar los beneficios del uso de energía solar aislada mediante el desarrollo de un prototipo de iluminación funcional. Los objetivos específicos incluyen: caracterizar el funcionamiento del sistema y sus principales componentes; identificar ventajas y limitaciones; evaluar su potencial en condiciones adversas; y estimar la relación coste-beneficio de la solución. La metodología adoptada combina un enfoque mixto, con objetivos exploratorios y explicativos, utilizando investigación bibliográfica y experimental. Los resultados indican que el prototipo satisface satisfactoriamente las necesidades de iluminación propuestas, demostrando eficiencia y viabilidad práctica. Se concluye que los sistemas fotovoltaicos aislados promueven la sostenibilidad y la

independencia energética, proporcionando electricidad continua en ubicaciones remotas o con redes eléctricas inestables, demostrando su potencial como una alternativa fiable y respetuosa con el medio ambiente.

Palabras clave: Energía renovable; Generación de energía; Fotovoltaica; Fuera de la red; Iluminación.

1. Introdução

O homem, ao longo de toda sua história, tem usufruído de recursos naturais em sua volta para suprir suas necessidades de sobrevivência e evolução. A principal fonte energética para existência humana - e para qualquer forma de vida na terra - é a luz solar. Como fonte primária de energia, dela derivam praticamente todas as outras formas. A radiação solar é responsável pelo ciclo da água (hidroelétricas), fotossíntese (combustíveis fósseis e derivados de vegetais), formação dos ventos na terra (eólicas).

Segundo Iberdrola (2025), o aproveitamento da energia solar nas civilizações antigas era limitado pela tecnologia disponível na época. Inicialmente, utilizava-se a luz do sol para gerar fogo, e posteriormente, gregos e romanos aplicaram a energia solar de forma indireta no aquecimento de residências e da água, além de desenvolverem construções que maximizavam a utilização da luz e do calor solar durante o dia e sua conservação à noite.

O instinto de sobrevivência e evolução, aliado a séculos de estudos e descobertas, levou ao surgimento da eletricidade, elemento fundamental para desenvolvimento tecnológico que moldou o mundo moderno, com aplicações em iluminação, transporte, comunicação e processos industriais. Atualmente, a eletricidade é considerada essencial para a vida moderna, presente em praticamente todos os aspectos do cotidiano e contribuindo para a melhoria da qualidade de vida e da dignidade social.

Contudo, desde a Revolução Industrial, para suprir a crescente demanda por energia, utilizamos predominantemente fontes não renováveis para geração elétrica, conhecidas como combustíveis fósseis - carvão, petróleo e gás natural - atualmente representa cerca de 80% da matriz energética mundial. (IEA, WorldEnergyOutlook, 2023)

O futuro da eletricidade é necessariamente impulsionado pela transição para fontes de energia renováveis devido a preocupação com questões ambientais e a busca por soluções sustentáveis aos problemas ocasionados pelo uso de combustíveis fóssil, tais como poluição ao meio ambiente, prejuízos à saúde humana, mudanças climáticas e aquecimento global. Nesse cenário, a energia solar fotovoltaico tem se destacado nos últimos anos, tanto no Brasil quanto globalmente, atualmente temos um aumento significativo na geração de eletricidade a partir do sol, devido ao crescimento da capacidade instalada, impactos econômicos, sustentabilidade, inovações tecnológicas.

A energia solar fotovoltaica é uma fonte inesgotável de energia limpa e renovável, obtida através da conversão da radiação solar em eletricidade. Trata-se de uma tecnologia de fácil instalação e manutenção podendo ser instaladas sem conexão com à rede elétrica convencional, em áreas rurais e remotas de forma autônoma denominado como sistema fotovoltaico off grid.

Nesse contexto, o presente trabalho aborda o uso da energia solar como fonte renovável e limpa para benefício da sociedade, como foco em sistemas fotovoltaicos off grid de baixa potência, aplicada em residências urbanas e rurais para o consumo básico e emergencial de energia elétrica, como iluminação e comunicação.

Diante do exposto, propõe-se responder à seguinte questão: Quais os benefícios do uso do sistema de energia solar fotovoltaico off grid para geração autônoma de energia elétrica destinadas ao consumo básico e emergencial?

A escolha desse tema justifica-se pela necessidade crescente de alternativas sustentáveis diante dos impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis e pela busca de soluções que contribuam para a redução das mudanças climáticas e do aquecimento global. Além disso, a energia solar fotovoltaica se mostra como uma das fontes renováveis mais promissoras, especialmente no Brasil, país com elevado potencial de radiação solar ao longo do ano.

O sistema off grid é particularmente relevante por possibilitar o fornecimento de energia em locais remotos ou em situações emergenciais, onde a rede elétrica convencional é inexistente ou instável. Assim, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental, essa tecnologia promove inclusão social e energética, melhorando a qualidade de vida de

comunidades vulneráveis.

O objetivo principal é analisar os benefícios do uso de energia solar off-grid, por meio do desenvolvimento de um protótipo funcional de iluminação. Os objetivos específicos incluem: caracterizar o funcionamento e os principais componentes do sistema; identificar vantagens e limitações; avaliar seu potencial em condições adversas; e estimar o custo-benefício da solução.

2. Fundamentação Teórica

2.1 A energia elétrica

O conceito de energia refere-se à capacidade de realizar trabalho, podendo se manifestar como movimento, calor ou transformação de matéria. A energia elétrica é produzida a partir de outras formas de energia, como potencial, cinética ou mecânica. Um exemplo prático é a usina hidrelétrica, na qual a água armazenada em reservatórios possui energia potencial que, ao se movimentar, é convertida em energia cinética. Esta energia move as turbinas, transformando energia mecânica em energia elétrica por meio da indução eletromagnética (Halliday; Resnick & Walker, 2012).

2.2 Energia solar

A energia solar é considerada uma das fontes de energia mais promissoras para o século XXI, não apenas por ser renovável, mas por ser inesgotável, estando disponível em praticamente todo o planeta. Essa energia é irradiada pelo Sol como resultado das reações de fusão nuclear que ocorrem nos átomos de hidrogênio (Atlas brasileiro de energia solar, 2017).

A aplicação da energia solar ocorre de diferentes maneiras, dependendo do aproveitamento da luz e da radiação solar. Entre as principais modalidades estão a energia solar térmica, heliotérmica e fotovoltaica. No presente trabalho, o enfoque será direcionado à energia solar fotovoltaica, devido ao seu crescente papel na matriz elétrica brasileira. Além de apresentar vantagens em relação às fontes tradicionais de geração elétrica, como carvão e gás natural, a energia solar fotovoltaica tem se destacado pela redução significativa dos custos de implantação, tornando-se uma das formas mais competitivas de produção de eletricidade (Lana et al., 2020).

A energia solar fotovoltaica já representa cerca de 16% da matriz elétrica brasileira, ocupando a segunda posição e superando a geração eólica. Aproximadamente 70% dessa produção provém de sistemas distribuídos, instalados em telhados residenciais e edificações, enquanto os 30% restantes são oriundos de usinas centralizadas. Atualmente, existem cerca de 2,1 milhões de sistemas conectados à rede, dos quais 1,7 milhão em residências, que geram energia própria e compensam o excedente na conta de luz (Veja, 2023).

O avanço dessa fonte pode ser observado na Figura 1, que apresenta a evolução da capacidade instalada de geração de energia solar fotovoltaica no Brasil (em megawatts) entre 2013 e 2023.

Figura 1 – Crescimento da capacidade fotovoltaica no Brasil (2013 – 2023).



Fonte: Veja (2023).

No primeiro semestre de 2025, a potência instalada de energia solar fotovoltaica no Brasil apresentou crescimento significativo, com 17 novas usinas entrando em operação e adicionando 738,63 MW à matriz elétrica nacional. Esse aumento reflete a tendência de expansão contínua da energia solar no país, acompanhando o fortalecimento das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira (ANEEL, 2025).

Conforme apresentado na Figura 2, observa-se o aumento gradual da participação da energia solar na matriz elétrica brasileira.

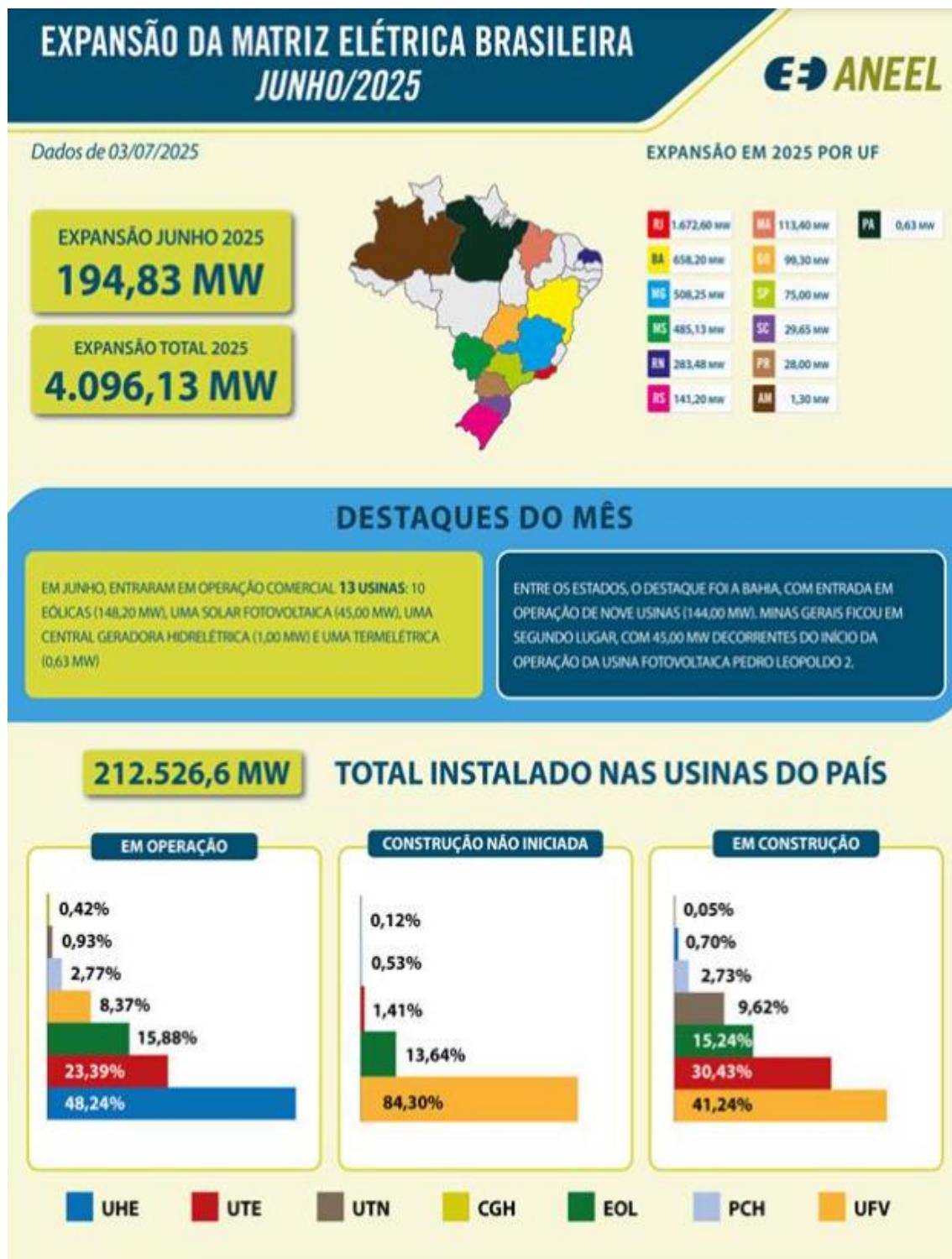
Figura 2 - Histórico e tendência da matriz elétrica brasileira por fonte (2015 - 2027).



Fonte: Adptado de ANEEL (2025).

A análise específica do primeiro semestre de 2025, detalhada na Figura 3, evidencia a entrada em operação de novas usinas em diferentes estados, totalizando 4.096,13 MW adicionados ao sistema, dos quais 738,63 MW foram provenientes de usinas solares fotovoltaicas, confirmando a consolidação dessa fonte como uma das principais na matriz elétrica nacional. (ANEEL, 2025).

Figura 3 - Expansão da matriz elétrica brasileira no primeiro semestre de 2025.



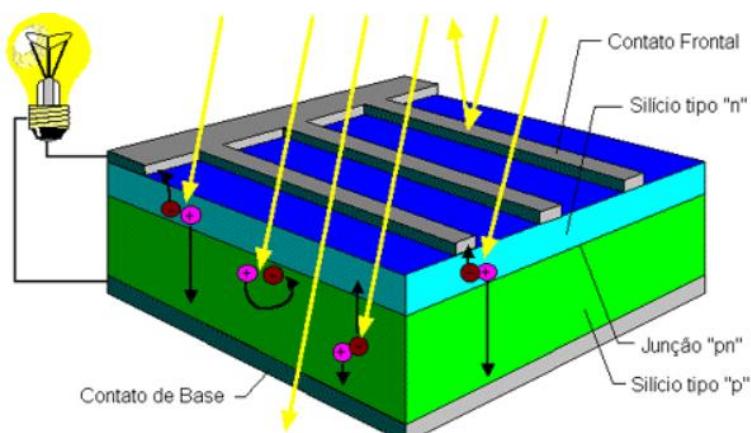
Fonte: ANEEL (2025).

2.3 Efeito fotovoltaico

A energia solar é obtida através da conversão da irradiação solar em eletricidade por intermédio de materiais semicondutores, esse fenômeno é chamado de efeito fotovoltaico. (Costa, 2022).

De acordo com o CRESESB (2014), a célula fotovoltaica é composta por uma junção semicondutora do tipo PN, onde a radiação solar promove a excitação de elétrons, que são direcionados pelo campo elétrico interno, resultando na geração de corrente elétrica contínua.

Figura 4 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.



Fonte: CRESESB (2014).

2.4 Sistemas de energia solar fotovoltaico (SFV)

Os sistemas fotovoltaicos (SFV) podem ser classificados em conectados à rede, isolados ou híbridos. Os conectados à rede, também conhecidos como on-grid, têm como característica a integração direta com a rede elétrica, injetando a energia excedente e possibilitando a compensação de créditos energéticos. Já os sistemas isolados, ou off-grid, utilizam bancos de baterias para o armazenamento, sendo aplicados principalmente em localidades remotas ou sem acesso à rede de distribuição. Por fim, os sistemas híbridos associam o uso de baterias com a conexão à rede, proporcionando maior confiabilidade e flexibilidade (CRESESB, 2014; Pereira et al., 2017).

Segundo Martins e Pereira (2011), a adoção dos sistemas conectados à rede no Brasil se intensificou após a regulamentação da micro e minigeração distribuída pela Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Esse marco regulatório foi fundamental para permitir que consumidores pudessem gerar sua própria energia e injetar o excedente na rede, popularizando o uso da tecnologia fotovoltaica no país.

Contudo, os sistemas isolados ainda desempenham papel de destaque em áreas remotas da Amazônia e do interior nordestino, onde a expansão da rede elétrica é tecnicamente difícil e economicamente inviável. Nesses casos, a energia solar surge como alternativa sustentável e menos onerosa em comparação aos sistemas a diesel, que apresentam elevado custo de combustível e logística de transporte (ANEEL, 2016).

Além disso, estudos demonstram que o desempenho dos sistemas fotovoltaicos está diretamente relacionado à radiação solar incidente e às condições climáticas locais. De acordo com Pereira (2019), a elevada disponibilidade de insolação no território brasileiro, especialmente nas regiões Nordeste e Centro-Oeste, favorece a eficiência e a expansão dos sistemas fotovoltaicos. Assim, o Brasil possui um dos maiores potenciais do mundo para o aproveitamento dessa fonte renovável.

Outro aspecto importante é a redução de custos dos equipamentos fotovoltaicos ao longo da última década. Segundo Ottonelli (2021), a queda nos preços de módulos, inversores e sistemas de armazenamento tem impulsionado a competitividade da energia solar em relação às fontes convencionais, ampliando sua participação na matriz elétrica nacional.

Portanto, observa-se que a energia solar fotovoltaica no Brasil é uma solução estratégica tanto para áreas conectadas à rede, onde oferece benefícios econômicos e ambientais, quanto para regiões isoladas, onde garante acesso à energia elétrica de forma sustentável.

2.5 Sistema on grid

O sistema on grid é conhecido como sistema conectado à rede elétrica, uma vez que a energia elétrica produzida pelas placas solares em corrente contínua (CC) é convertida em corrente alternada (CA) e injetada na rede elétrica da concessionária através de um inversor em caso de excedente de produção, ou seja, quando a unidade consumidora tem um consumo menor que a geração. Dessa forma, além de não ser necessário sistema de armazenamento, o excedente de produção de energia enviado a rede local é retornado em uma compensação futura em forma de créditos. Assim, para que seja possível acompanhar o que está sendo consumido e injetado na rede, é feita a modificação do medidor de consumo, ou seja, o medidor tradicional é trocado por um medidor bidirecional. (Lima; Nunes, 2022).

Esse tipo de sistema integra a Geração Distribuída (GD) e é classificado por potência. Desde a REN ANEEL nº 482/2012, consumidores podem gerar sua própria eletricidade a partir de fontes renováveis e compensar a energia injetada na rede. O modelo foi aperfeiçoado e consolidado pelo Marco Legal da GD (Lei nº 14.300/2022), que define microgeração como potência até 75 kW e minigeração como acima de 75 kW e até 5 MW, ambas conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL. 2012; Brasil. Lei Nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022). O SCEE permite, por exemplo, que a sobra de energia fotovoltaica injetada durante o dia seja compensada à noite na fatura do consumidor, conforme regras vigentes (ANEEL. 2025; Brasil. Lei Nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022).

Na Figura 5, é apresentado o sistema ON-Grid, o qual utiliza basicamente vários painéis fotovoltaicos conectados ao inversor e, posteriormente, à rede de energia elétrica. Esse sistema não armazena energia. Portanto, a energia gerada que não é utilizada pelo consumidor/gerador é entregue diretamente à rede elétrica. (Alves, 2019; Integração solar, 2023).

Figura 5 - Funcionamento de um sistema fotovoltaico on-grid.



Fonte: Integração Solar (2023).

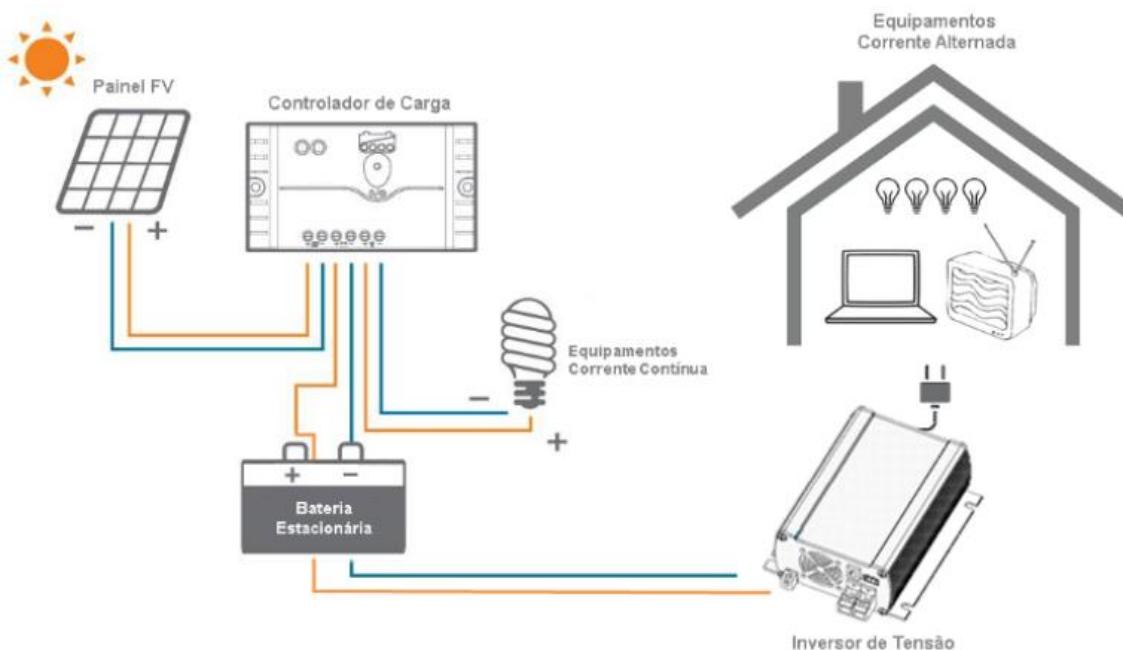
É importante mencionar que é utilizado um componente que tenha a função de proteger o sistema fotovoltaico, a string box. Ela fica posicionada entre os módulos e o inversor de modo a isolar o sistema de produção de energia solar, com o propósito de acidentes elétricos, como os curtos-circuitos e os surtos elétricos, funcionando como os disjuntores de energia dentro de um quadro de distribuição de circuitos (QDC) (Lima & Nunes, 2022).

2.6 Sistema off grid

Os sistemas fotovoltaicos off-grid, também chamados de sistemas isolados ou autônomos, são caracterizados por sua independência em relação à rede elétrica convencional. Nessa configuração, a geração e o consumo de energia ocorrem de forma local, sendo o armazenamento em baterias um elemento essencial para garantir o suprimento durante a noite ou em períodos de baixa irradiação solar (Alves, 2019).

Na Figura 6, é apresentado o sistema off-grid, o qual utiliza painéis fotovoltaicos conectados a um controlador de carga, responsável por regular a energia destinada ao banco de baterias. Esse sistema permite o armazenamento de energia, garantindo autonomia para o consumo mesmo durante a noite ou em períodos de baixa radiação solar. Diferentemente do sistema on-grid, a energia gerada não é injetada na rede elétrica, sendo utilizada exclusivamente no ponto de consumo onde o sistema está instalado.

Figura 6 - Esquema de funcionamento de um sistema fotovoltaico off-grid.



Fonte: Posto das Baterias (2025).

Sua aplicação é mais comum em áreas remotas, onde o acesso à eletricidade é limitado ou inexistente, constituindo-se como uma solução prática para suprir demandas locais de energia. Tais sistemas utilizam a radiação solar como fonte primária de geração, permitindo reduzir a dependência de combustíveis fósseis e, consequentemente, os impactos ambientais associados (Benudece, 1999; Dalmarco, 2017).

Conforme Bortoloto et al. (2017), os sistemas off-grid são caracterizados pela geração independente, utilizando módulos fotovoltaicos que alimentam diretamente as cargas elétricas. Normalmente, esse tipo de sistema possui um banco de baterias para armazenamento da energia excedente, além de controladores de carga e inversores para adequar a energia às necessidades do consumidor. Essa configuração torna-se essencial em aplicações residenciais e rurais isoladas, bem como em situações emergenciais.

A concepção de um sistema off-grid exige planejamento adequado, uma vez que a energia gerada deve atender de forma contínua às necessidades do usuário. Isso implica dimensionar corretamente os componentes, como o número de módulos, banco de baterias, controladores de carga e inversores, de modo a garantir a eficiência e a confiabilidade do sistema. A Bluesol (2017)

ressalta que um dos principais desafios é lidar com as variações na geração causadas por sombreamentos ou instabilidades climáticas, o que pode comprometer o fornecimento permanente de energia.

A autonomia é uma das principais exigências no dimensionamento de sistemas off-grid, sendo comum projetá-los com pelo menos dois dias de reserva energética, o que garante maior confiabilidade em situações de ausência de radiação solar. Contudo, diferentemente dos sistemas on-grid, não há possibilidade de compensação de créditos ou compartilhamento da energia produzida, limitando sua utilização ao ponto de consumo em que está instalado (Lima; Nunes, 2022).

Outro aspecto técnico relevante é a necessidade de componentes específicos, como inversores autônomos, que retiram energia diretamente das baterias e fornecem potência elétrica às cargas locais. Esses inversores não são compatíveis com a rede elétrica, já que não possuem mecanismos de sincronização com o sinal da concessionária, o que poderia gerar falhas graves de operação. Já os controladores de carga asseguram estabilidade elétrica para prolongar a vida útil das baterias estacionárias, projetadas para suportar longos ciclos de descarga (Lima; Nunes, 2022).

Além disso, há aplicações específicas em pequenos projetos de baixo consumo, como bombeamento de água, eletrificação de cercas e iluminação de postes, bem como em sistemas de médio e grande porte, que podem variar de 1,5 kWp a 1 MWp. Essa flexibilidade permite a adaptação da tecnologia tanto para fins residenciais quanto para empreendimentos de maior escala (Bortoloto et al. 2017).

Dessa forma, os sistemas fotovoltaicos off-grid configuram-se como alternativas viáveis para eletrificação descentralizada e sustentável, apresentando relevância tanto em comunidades remotas quanto em projetos específicos de autonomia energética. Contudo, seu sucesso depende de um dimensionamento criterioso, que leve em consideração as variáveis locais e as particularidades de cada aplicação.

2.7 Sistema híbrido

Além dos sistemas conectados à rede (on-grid) e isolados (off-grid), existe também a configuração híbrida, que combina ambas as modalidades. Nesse tipo de sistema, há a integração entre módulos fotovoltaicos, banco de baterias e a rede elétrica convencional, podendo ainda incluir geradores auxiliares. O objetivo principal dessa arquitetura é garantir maior confiabilidade no fornecimento de energia, permitindo que, em momentos de baixa irradiação solar ou de elevado consumo, o sistema utilize a rede ou a fonte auxiliar como suporte (CRESESB, 2014).

Conforme Bortoloto et al. (2017), os sistemas híbridos são vantajosos por unirem a autonomia dos sistemas isolados à segurança do suprimento dos sistemas conectados à rede, embora apresentem custo inicial mais elevado devido à complexidade de equipamentos.

Entretanto, é importante destacar que os sistemas híbridos não são o foco deste trabalho, sendo aqui abordados apenas de forma introdutória.

2.8 Componentes de um sistema off grid

No processo de geração de energia, apenas o módulo fotovoltaico não garante o aproveitamento da energia solar, e, uma vez que este gera energia em corrente contínua (CC), o consumo direto da energia gerada nesta forma é pouco usual, já que praticamente todas as cargas residenciais, comerciais e industriais funcionam em corrente alternada (CA). Logo, é necessária a integração de diversos equipamentos projetados para disponibilizar a energia gerada ao consumidor final (Lins, 2018).

2.8.1 Painel solar

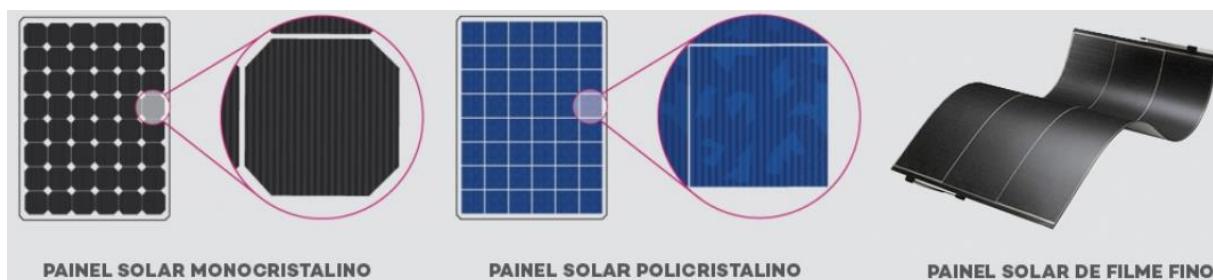
A placa solar, ou utilizando o termo técnico, módulo fotovoltaico, é um dispositivo contínuo de células fotovoltaicas responsável pela captação da energia proveniente da luz do sol, com a função de converter em energia elétrica através do efeito

fotovoltaico (Pinho; Galdino, 2014). O conjunto destas placas solares é chamado de gerador fotovoltaico e constituem a primeira parte do sistema off grid (Pereira; Oliveira, 2011).

As células fotovoltaicas podem ser construídas com diferentes tipos de materiais. Os mais utilizados são, o silício cristalino (subdividido em monocristalino e policristalino) e amorfo.

Na Figura 7, são apresentados os principais tipos de módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado: monocristalinos, policristalinos e de filme fino. Cada tecnologia possui características próprias de eficiência, custo e aplicação, o que permite ao projetista selecionar a opção mais adequada às condições do local e à demanda energética.

Figura 7 - Tipos de módulos fotovoltaicos (monocristalino, policristalino e amorfo).



Fonte: Neosolar (2025).

A escolha do tipo de módulo depende de fatores como área disponível, orçamento e condições climáticas do local de instalação. A Tabela 1 apresenta uma síntese comparativa entre esses três tipos de módulos, destacando suas principais vantagens e limitações (Neosolar, 2025).

Tabela 1 - Comparativo entre os principais tipos de módulos fotovoltaicos.

Tipo	Eficiência média	Custo relativo	Durabilidade	Características principais
Monocristalino	17% – 22%	alto	25–30 anos	Alta eficiência mesmo em áreas pequenas; visual preto uniforme; melhor desempenho em baixa luminosidade.
Policristalino	15% – 18%	Intermediário	25–30 anos	Eficiência um pouco menor; cor azulada; mais econômico; bom custo-benefício para áreas maiores.
Amorfo	6% – 15%	baixo	10–20 anos	Flexíveis, leves, funcionam melhor em dias nublados e altas temperaturas, mas requerem maior área para mesma potência.

Fonte: Adaptado de Neosolar (2025).

A célula mais frequentemente utilizada como conversor direto de energia solar em energia elétrica é a de silício monocristalino. Para a operação da célula fotovoltaica, o silício necessita de outros elementos para atuarem como semicondutores, que apresentam um grau de pureza elevado, chegando a 99,999% de pureza (Pinho et al., 2008).

O silício policristalino, também conhecido como célula de silício multicristalino, apresenta uma produção mais econômica que as monocristalinas, devido ao seu processo de fabricação não serem tão severamente controladas. Entretanto a sua eficiência é menor devido a sua pureza (Macedo, 2006).

O silício amorfo, apresenta uma eficiência superior à do cristalino em dia com céus encobertos e um custo menor de fabricação. Porém, possui dois contras, o primeiro é a pequena eficiência de conversão quando comparada às células de mono e policristalinas, o segundo é o desgaste em um período próximo a sua instalação, esse fato reduz a eficiência da célula durante sua vida útil (Macedo, 2006).

2.8.2 Bateria

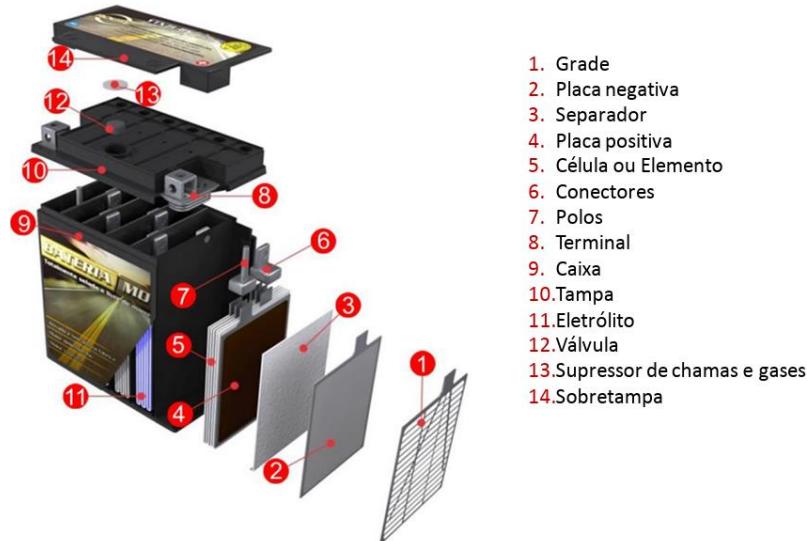
As baterias são dispositivos capazes de armazenar energia elétrica por meio da oxirredução ocorrido em seu interior. Este termo refere-se a um processo químico durante o qual ocorre a oxidação (perda de eletrões) e a redução (ganho de eletrões). As baterias são constituídas por um conjunto de pilhas. Estas apresentam um ânodo e um cátodo, que entram em contacto com um condutor elétrico, o eletrólito. Também podem ser chamadas de pilhas secundárias, baterias secundárias ou acumuladores. As baterias recarregáveis e aplicáveis por um longo período de tempo se fazem necessárias em sistemas fotovoltaicos isolados para atender a demanda nos períodos de geração insuficiente (à noite, dias nublados ou chuvosos, etc.) (Lins, 2018)

De acordo com o IBER (2024), as baterias de chumbo-ácido permanecem entre as mais aplicadas no mercado devido à versatilidade, estando presentes desde veículos automotivos até sistemas de energia fotovoltaica. O funcionamento ocorre pela reação eletroquímica entre placas de chumbo e ácido sulfúrico, que produz eletricidade para o circuito externo.

O armazenamento de energia em baterias de chumbo-ácido apresenta o menor custo por Wh em aplicações de sistemas fotovoltaicos. No entanto, essas baterias sofrem maior influência do aumento de temperatura, o que reduz sua eficiência e vida útil. Para garantir melhor desempenho, recomenda-se sua utilização em temperaturas máximas entre 25 °C e 30 °C. Além disso, a vida útil está diretamente relacionada à profundidade de descarga (DoD): em média, pode variar de cerca de 2.500 ciclos, quando a descarga é limitada a 10%, para aproximadamente 500 ciclos, quando a profundidade de descarga atinge 50% (Ferreira, 2021).

A Figura 8 demonstra a estrutura interna de uma bateria de chumbo-ácido, evidenciando seus principais componentes: placas positivas e negativas, separadores, eletrólito (solução de ácido sulfúrico) e a carcaça que confere isolamento e proteção. Esse arranjo possibilita a reação eletroquímica que converte a energia química em energia elétrica (IBER, 2024).

Figura 8 - Estrutura interna de uma bateria de chumbo-ácido.



Fonte: Adaptado de Carneiro et al. (2017, p. 899).

As baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) apresentam maior densidade de potência em comparação às de chumbo-ácido de mesma dimensão e massa, sendo capazes de fornecer correntes elevadas de forma instantânea. Essa característica as torna especialmente adequadas para partida de motores de turbina em aplicações aeronáuticas. A capacidade dessas baterias está diretamente relacionada à área ativa de suas placas, de modo que placas maiores proporcionam maior capacidade de armazenamento. No setor da aviação, muitas baterias Ni-Cd são projetadas para operar em sistemas de 24 V, com capacidades típicas variando entre 22 e 80 Ah, geralmente especificadas para a taxa de descarga C5 (Hangar MMA, 2023).

As baterias de íons de lítio são consideradas ideais para aplicações em sistemas de energia solar fotovoltaica, veículos elétricos, telecomunicações, alarmes e sistemas de segurança. Apresentam baixa ou nenhuma necessidade de manutenção, dependendo do modelo, e não sofrem do chamado efeito memória, dispensando ciclos completos de descarga para manter seu desempenho. Outro aspecto relevante é a baixa taxa de autodescarga, inferior à metade daquela observada em sistemas baseados em níquel, o que contribui para maior confiabilidade e eficiência. Além disso, a ocorrência de falhas é extremamente rara, estimando-se que apenas duas ou três baterias em cada milhão apresentem defeito (Secpower, 2021).

Segundo Michelini (2023), essas baterias destacam-se ainda pela alta densidade de energia, longa vida útil e baixa necessidade de manutenção, fatores que as tornam superiores às baterias de chumbo-ácido em aplicações que exigem eficiência, leveza e confiabilidade, como sistemas fotovoltaicos, mobilidade elétrica e dispositivos portáteis.

2.8.3 Controlador de carga

O controlador de carga é um dos componentes mais importantes em sistemas fotovoltaicos isolados (off-grid), pois é responsável por gerenciar o fluxo de energia entre os módulos solares e o banco de baterias. Sua função principal é otimizar a utilização das baterias, prevenindo sobrecargas e descargas profundas, além de proteger o sistema contra variações excessivas de consumo ou erros operacionais (Lins, 2018).

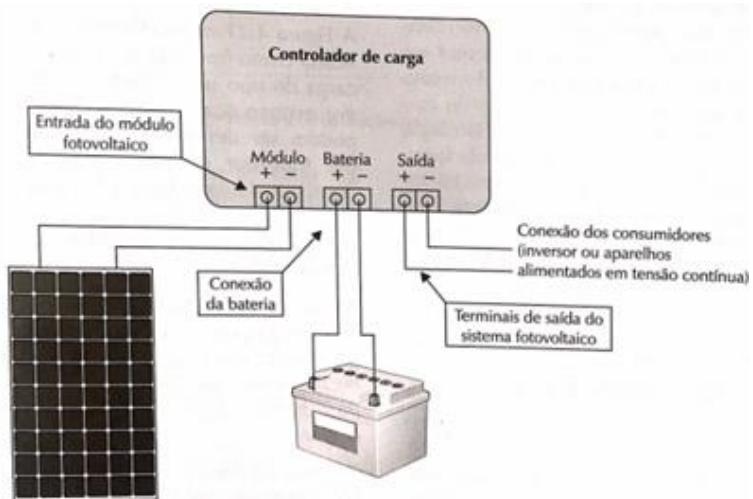
De acordo com Villalva (2015), a energia proveniente dos módulos fotovoltaicos apresenta variações de tensão proporcionais à irradiância solar. Como os bancos de baterias não devem ser submetidos a essas oscilações, o controlador atua estabilizando a tensão enviada ao armazenamento, garantindo a segurança operacional. Além disso, o dispositivo limita a entrada e a saída de energia, evitando tanto a sobrecarga quanto a descarga excessiva, o que contribui para o aumento da vida útil das baterias (Villalva & Gazoli, 2012).

O uso do controlador também assegura uma interligação adequada entre módulos e baterias, visto que o contato direto entre eles pode comprometer a durabilidade do sistema. Em períodos de elevada insolação e baixo consumo, o controlador impede o carregamento excessivo; já em situações de alta demanda, protege contra a descarga profunda. Como boa prática de instalação, recomenda-se conectar primeiro o controlador à bateria e, em seguida, ao arranjo fotovoltaico, reduzindo riscos de falhas no carregamento (Villalva, 2015).

Existem diferentes tipos de controladores disponíveis no mercado, sendo os mais comuns os PWM (Pulse Width Modulation) e os MPPT (Maximum Power Point Tracking). Os modelos PWM realizam a regulação da carga por meio de chaveamento eletrônico e rotinas de controle, permitindo o gerenciamento em três estágios: carga inicial (bulk), absorção e flutuação (float), assegurando um processo de carregamento adequado. Já os MPPT realizam uma varredura da curva característica I×V dos módulos, identificando o ponto de máxima potência. Dessa forma, garantem que o sistema opere em condição ótima, possibilitando ganhos de até 30% em relação aos PWM, ainda que com custo mais elevado (Villalva, 2015).

A Figura 9 ilustra um exemplo prático de utilização de um controlador de carga em um sistema fotovoltaico, evidenciando sua posição entre o arranjo de módulos solares e o banco de baterias, bem como sua função de proteção e gerenciamento da energia gerada.

Figura 9 - Modo de utilização do controlador de carga.



Fonte: Adaptado de Carneiro et al. (2017, p. 899).

Portanto, o controlador de carga desempenha um papel essencial no desempenho e na durabilidade dos sistemas off-grid, atuando tanto na preservação das baterias quanto na eficiência global do sistema. A escolha entre os modelos PWM e MPPT deve considerar as características do projeto, a capacidade de investimento e o perfil de consumo da unidade atendida.

2.8.4 Inversor

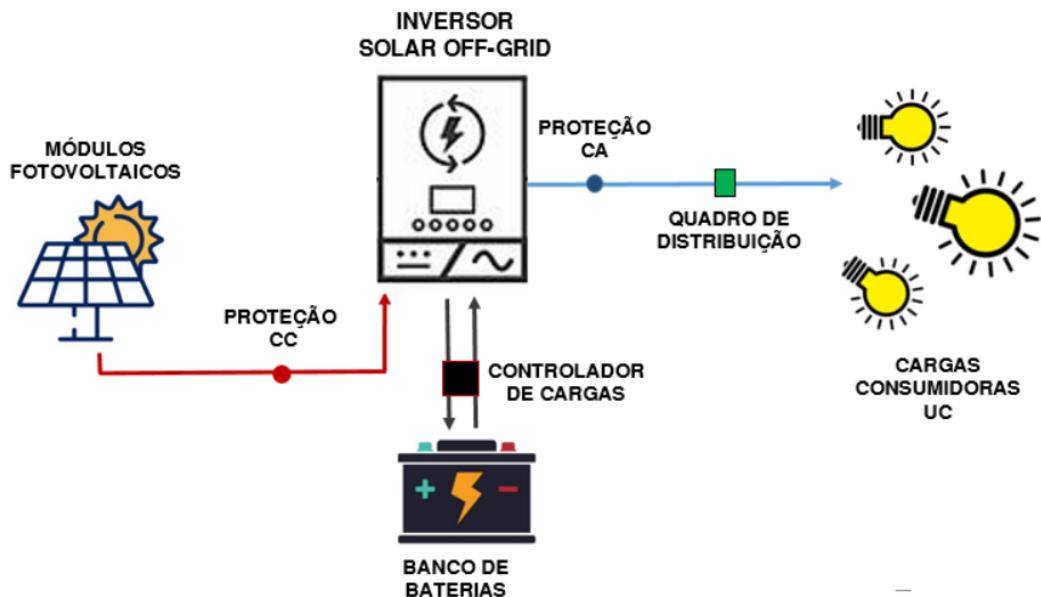
Como já mencionado, é necessária a conversão da corrente contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos para corrente alternada (CA), visto que a maior parte dos aparelhos elétricos opera nesse formato. Essa conversão é realizada pelo inversor, que, além disso, garante a compatibilidade dos níveis de tensão de saída com os equipamentos conectados (Lins, 2018).

Existem diferentes tipos de inversores, cada qual com características específicas para atender distintas condições de operação e faixas de potência (CEPEL; CRESES, 2014). A maior parte dos eletrodomésticos é projetada para funcionar com a rede elétrica de tensão alternada disponível nas residências brasileiras, como 127 V ou 220 V, e frequência de 60 Hz (Villalva, 2015).

Nos sistemas autônomos, são comumente utilizados três tipos de inversores: de onda quadrada, de onda senoidal modificada e de onda senoidal pura. Segundo Villalva (2015), as ondas semiquadradas apresentam menos distorção harmônica do que as totalmente quadradas; no entanto, ambas ainda são bastante distorcidas em comparação a uma senoidal pura. Dessa forma, inversores de onda quadrada e senoidal modificada são indicados para equipamentos menos sensíveis a ruídos, como lâmpadas e eletrodomésticos simples. Já os inversores de onda senoidal pura, por oferecerem maior qualidade de sinal, são destinados a processos e equipamentos sensíveis, embora possuam custo mais elevado devido à sua maior complexidade.

A Figura 10 apresenta um exemplo de inversor utilizado em sistemas fotovoltaicos, ilustrando sua aplicação prática e a conversão da corrente contínua proveniente dos módulos solares em corrente alternada para o consumo residencial.

Figura 10 - Exemplo de inversor utilizado em sistema fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de ENERGES (2020).

3. Materiais e Métodos

Realizou-se uma pesquisa experimental, em campo, de natureza quantitativa (Pereira et al., 2018) com uso de estatística descritiva simples empregando gráficos de linhas, gráficos de barras, classes de dados, valores médios e de frequências de dados (Shitsuka et al., 2014) e, com apoio de revisão bibliográfica não sistemática, narrativa (Rother, 2007). Para a revisão de literatura, consultaram-se artigos, monografias e materiais técnicos em Google Acadêmico, Portal de Periódicos CAPES e SciELO, com ênfase em estudos sobre sistemas fotovoltaicos off-grid. As buscas foram realizadas entre julho e setembro de 2025, utilizando operadores booleanos (AND, OR) combinados a termos-chave relacionados a geração fotovoltaica isolada, componentes e dimensionamento.

Como critérios de inclusão, consideraram-se publicações preferencialmente dos últimos dez anos e em língua portuguesa (não exclusivo), admitindo-se a incorporação de trabalhos relevantes fora desse recorte temporal. A seleção ocorreu em duas etapas: (1) triagem por título e resumo; (2) leitura integral dos textos elegíveis, visando extrair informações técnicas pertinentes ao tema.

Na etapa experimental, foi desenvolvido um protótipo de sistema fotovoltaico off-grid de baixa potência, contemplando dimensionamento, montagem, coleta de dados e análise. Parte dos materiais foi adquirida com recursos próprios e parte reutilizada. Os ensaios foram conduzidos em residência no município de Manaus/AM.

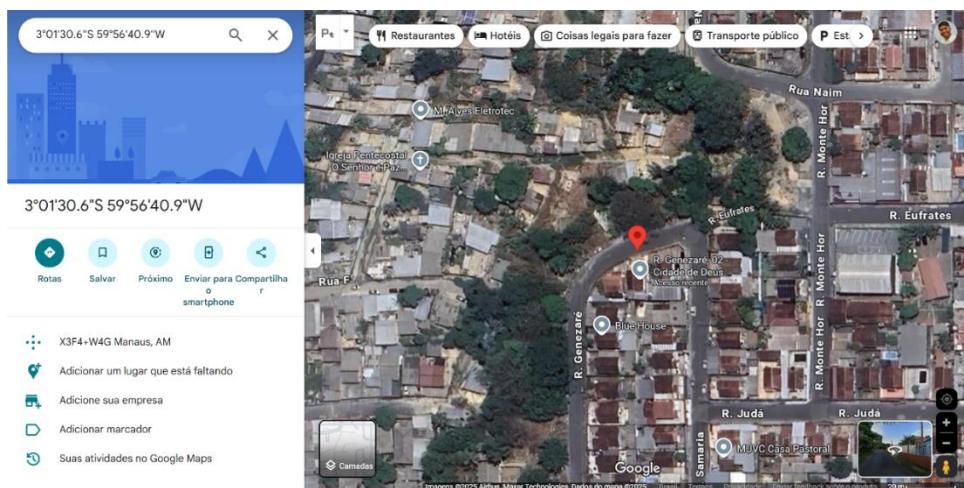
3.1 Protótipo de um sistema fotovoltaico off grid de baixa potência

Com recursos próprios, foi construído um protótipo para avaliar o dimensionamento e o desempenho em aplicações de consumo básico e emergencial. O arranjo contempla os elementos típicos de sistemas off-grid (módulo FV, controlador de carga, banco de baterias e, quando necessário, inversor), permitindo observar a interação entre geração, armazenamento e atendimento da carga sob diferentes condições de irradiação.

3.2 Cenário proposto

O experimento foi instalado em residência no bairro Cidade de Deus (Manaus/AM), selecionada pela facilidade logística e por apresentar área com exposição solar adequada (ambiente aberto, sem edificações altas no entorno imediato). As coordenadas geográficas foram obtidas no Google Maps: 3°01'30.6"S e 59°56'40.9"W (Figura 11).

Figura 11 - Localização da residência utilizada para instalação do protótipo (Manaus/AM).



Fonte: Adaptado de GOOGLE MAPS, (2025).

As coordenadas foram inseridas no SunData (CRESESB/CEPEL), ferramenta que calcula a irradiação solar diária média mensal para qualquer ponto do território nacional, utilizando a base do Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2^a edição (INPE/CCST-LABREN). A tela de entrada é mostrada na Figura 12.

Figura 12 - Inserção das coordenadas geográficas no programa SunData.
Coordenada Geográfica

Latitude	Longitude
3 <input type="text"/> ° <input type="text"/> ' <input type="text"/> " Sul <input type="button"/>	59 <input type="text"/> ° <input type="text"/> ' <input type="text"/> " Oeste <input type="button"/>
Norte:	
<input type="radio"/> graus decimais (00.00°)	
<input checked="" type="radio"/> graus, minutos e segundos (00°00'00")	
<input type="button"/> Buscar	<input type="button"/> Limpar

Fonte: Adaptado de CRESESB – SunData (2025).

O SunData fornece os valores médios mensais de irradiação no plano horizontal e as projeções para planos inclinados segundo três critérios: inclinação igual à latitude, maior média anual e maior mínimo anual. Os resultados para Manaus/AM estão na Figura 13; observou-se janeiro como mês crítico, com HSP = 3,79 kWh/m².dia para 4° N (critério de maior média anual). Adotou-se o método do “pior mês” no dimensionamento para privilegiar a confiabilidade do sistema off-grid.

Figura 13 - Irradiação solar média diária em Manaus/AM.

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Manaus
Município: Manaus , AM - BRASIL

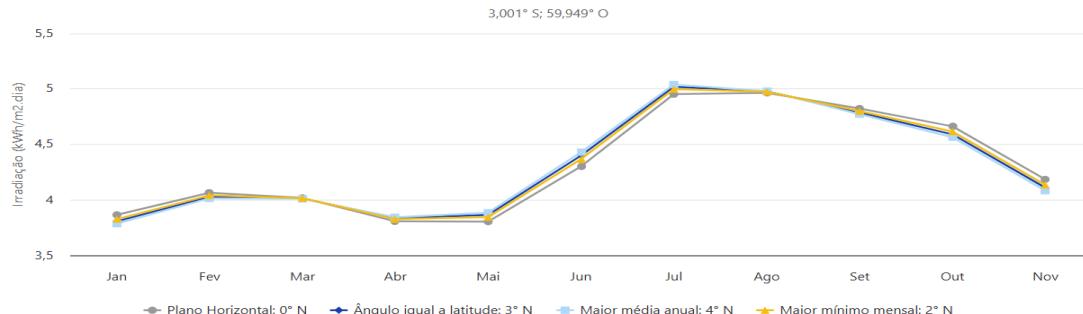
Latitude: 3,001° S

Longitude: 59,949° O

Distância do ponto de ref. (3,02522° S; 59,944722° O): 2,7 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	3,87	4,07	4,02	3,81	3,80	4,30	4,34	4,95	4,96	4,82	4,66	4,18	4,32	1,16
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	3° N	3,81	4,03	4,01	3,84	3,87	4,40	4,43	5,02	4,98	4,79	4,59	4,11	4,32	1,21
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	4° N	3,79	4,01	4,01	3,84	3,88	4,43	4,46	5,04	4,98	4,77	4,57	4,08	4,32	1,25
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	2° N	3,83	4,04	4,02	3,83	3,85	4,37	4,40	5,00	4,97	4,80	4,62	4,14	4,32	1,17

Irradiação Solar no Plano Inclinado -Manaus-Manaus, AM-BRASIL



Fonte: Adaptado de CRESESB – SunData (2025).

As inclinações sugeridas pelo SunData são diretrizes gerais. Em síntese: latitude (aplicações residenciais típicas), maior média anual (otimização anual, comum em on-grid sob o SCEE da REN ANEEL nº 482/2012) e maior mínimo anual (projetos críticos que exigem continuidade de serviço).

3.3 Levantamento de carga

Nesta etapa, realizou-se o levantamento das principais cargas para um sistema de consumo energético básico e emergencial, considerando a iluminação do local de estudo.

Para este levantamento, adotaram-se duas lâmpadas de 12V/10W cada (20 W no total), operando por 5 horas/noite, com autonomia de 2 dias.

Os equipamentos foram listados na Tabela 2, com as respectivas potências nominais (W), tempos de uso diário (h/dia) e consumos diários (Wh/dia).

O consumo diário de cada equipamento foi calculado pela Equação (1).

$$Cd = Pe \times Nd \quad (1)$$

Onde:

- Cd = Consumo diário (Wh/dia)
- Pe = Potência nominal do equipamento (W)
- Nd = Número de horas diárias de utilização do equipamento (h/dia)

Tabela 2 - Levantamento de cargas do protótipo

Cargas	Potência (W)	Horas/dia (h)	Consumo diário (Wh)
Lâmpada 1	10	5	50
Lâmpada 2	10	5	50
Total	20	5	100

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Assim, obteve-se um consumo diário total de 100 Wh/dia para o protótipo (Ecarga).

3.4 Dimensionamento do inversor

Para o protótipo desenvolvido neste trabalho, foi adotado um inversor com as seguintes especificações técnicas:

- Tipo: Onda Senoidal Modificada
- Tensão de entrada: 12 Vcc
- Tensão de saída: 127 Vca
- Potência nominal: 500 W
- Potência de Pico: 1000 W
- Eficiência do inversor (η_{inv}): 92%

Embora a carga principal levantada para o sistema (20 W em CC para iluminação) seja relativamente baixa, definiu-se a utilização de um inversor 500 W. Essa escolha visa ampliar a flexibilidade do sistema, permitindo o uso eventual de eletrodomésticos e dispositivos eletrônicos básicos em corrente alternada, sem comprometer a autonomia da bateria.

Figura 14 - Inversor Senoidal (KNUP-KP-507).



Fonte: Adaptado de Mercado Livre (2025).

3.5 Banco de bateria (12v)

Inicialmente, por questões de praticidade, acessibilidade e custo, foi selecionada uma bateria semi-nova de modelo chumbo-ácido com a tensão nominal de 12V. Para assegurar maior durabilidade, projetou-se a bateria com profundidade de descarga (DoD) de 50%, conforme recomendações de dimensionamento para sistemas autônomos (CRESESB, 2014).

Uma vez definidos a carga, a autonomia, a tensão e o DoD, calcularam-se a energia mínima armazenada e a capacidade nominal mínima (Ah) da bateria para o protótipo, conforme as Equações (2), (3) e (4). A determinação da energia requerida pela bateria considera a eficiência do inversor (CRESESB, 2014).

- Energia na bateria/dia (carga AC)

$$E_{bat,dia} = \frac{Ecarga}{\eta_{inv}} = \frac{100}{0,92} = 108,7 \text{ (Wh/dia)} \quad (2)$$

- Energia Mínima Armazenada (Banco)

$$Eb = \frac{E_{bat,dia} \times N}{DoD} = \frac{108,7 \times 2}{0,5} = 434,8 \text{ Wh} \quad (3)$$

- Capacidade Nominal Mínima

$$C_{Ah} = \frac{E_b}{V} = \frac{434,8}{12} = 36,23 \text{ Ah} \quad (4)$$

Com isso, a capacidade mínima comercial seria de aproximadamente 40 Ah. No entanto, visando margem de segurança e maior autonomia, foi escolhida uma bateria de 60Ah (12V), adequada para atender ao consumo do portótipo por mais de 2 dias de operação contínua.

Figura 15 - Bateria Chumbo-Ácido 12 V / 60 Ah (Strada).



Fonte: Elaboração Própria (2025).

3.6 Arranjo fotovoltaico

Para o cálculo do arranjo, é necessário levantar a cadeia de eficiência de cada etapa entre o módulo fotovoltaico e a carga.

Primeiramente considera-se a perda de eficiência do módulo fotovoltaico devido a temperatura de operação acima de 25°C. Em regiões de clima quente, é comum assumir entre 88 % e 92 % de eficiência (Villalva, 2015). Outro ponto refere-se às barreiras que podem reduzir a absorção da irradiação solar, como poeira, folhas e umidade, resultando em uma eficiência de 97% a 99% (CRESESB, 2014)

Além disso, existem os desajustes elétricos entre células (mismatch) como micro-sombras, que reduzem a eficiência para 98% a 99%. (Villalva; Gazoli, 2012)

Há também as perdas em cabos e conexões, que devem ser limitadas a uma queda de tensão $\leq 3\%$, resultando em uma eficiência de 97%. (NBR 5410; CRESESB, 2014) Outro fator importante é a eficiência da bateria chumbo-ácido, que varia entre 80% e 88%, e a do controlador de carga PWM, com rendimento de 75% a 82%. (Villalva, 2015; CRESESB, 2014)

Assim, utilizando o HSP de 3,79KWh/m².dia, determinada no program SunData e assumindo valores conservadores para as perdas, definiu-se a cadeia de eficiência conforme segue:

- Eficiência Inversor: $\eta_{inv} = 0,92$
- Eficiência Temperatura: $\eta_{temp} = 0,90$
- Eficiência Sujeira: $\eta_{soiling} = 0,97$
- Eficiência Micro-Sombras: $\eta_{mismatch} = 0,98$

- Eficiência Cabos: $\eta_{cabos} = 0,97$
- Eficiência da bateria: $\eta_{BAT} = 0,85$
- Eficiência PWM: $\eta_{pwm} = 0,78$

A cadeia de eficiência total (η_{total}) é dada pela Equação (5) e (5.1).

$$\eta_{total} = \eta_{inv} \times \eta_{temp} \times \eta_{soiling} \times \eta_{mismatch} \times \eta_{cabos} \times \eta_{BAT} \times \eta_{pwm} \quad (5)$$

$$\eta_{total} = 0,92 \times 0,90 \times 0,97 \times 0,98 \times 0,97 \times 0,85 \times 0,78 \approx 0,506 \quad (5.1)$$

Com base na eficiência calculada, determinou-se a energia diária requerida do arranjo fotovoltaico e, em seguida, sua potência, conforme as Equações (6) e (7).

- Energia FV,dia :

$$E_{FV} = \frac{Ecarga}{\eta_{total}} = \frac{100}{0,506} \cong 197,62 \text{ Wh/dia} \quad (6)$$

- Potência do Arranjo (P_{FV}) :

$$P_{FV} = \frac{E_{FV}}{HSP} = \frac{197,62}{3,79} = 52,14 \text{ Wp} \quad (7)$$

Portanto, para o protótipo, foi adotado um módulo fotovoltaico de 60 Wp, acima do mínimo calculado, garantindo margem de segurança para dias nublados e compensação de perdas por envelhecimento.

Figura 16 - Módulo Solar Monocristalino 60 Wp, 12 V (ZJNAC-60M).



Fonte: Adaptado de Mercado Livre (2025).

3.7 Controlador de carga

Para o dimensionamento do controlador de carga, calculou-se a corrente no lado da bateria a partir da potência do arranjo adotado (60 Wp) e da tensão do banco (12 V). (CRESESB, 2014)

A corrente base é dada pela Equação (8).

$$I = \frac{P_{FV}}{V} = \frac{60}{12} = 5,0 \text{ A} \quad (8)$$

Aplicando um fator de segurança 125 % para carga contínua – prática recomendada em CC para acomodar variações operacionais, envelhecimento e temperaturas elevadas (NBR16690) – obtém-se a Equação (9):

$$I_{PWM} = 5,0 \times 1,25 = 6,25 \text{ A} \quad (9)$$

Assim, adotou-se um controlador PWM 12 V/10 A, que atende com folga a corrente requerida e oferece margem para futuras pequenas expansões.

Figura 17 - Controlador de Carga PWM 10 A, 12 V.



Fonte: Adaptado de Mercado Livre (2025).

3.8 Quedas de tensão e bitolas

O dimensionamento adequado dos cabos é essencial para garantir a segurança do sistema, reduzir perdas de energia e evitar sobrecargas. A queda de tensão recomendada para cabos em sistemas fotovoltaicos é de, no máximo, 3%. Esse critério assegura que o sistema opere de forma eficiente, sem perdas excessivas. (NBR 5410, 2004)

A Equação (10), refere-se a queda máxima de tensão :

$$\Delta V = \Delta V \% \times V \quad (10)$$

Onde:

- ΔV = queda de tensão (V)
- $\Delta V \%$ = porcentagem da queda de tensão ($\leq 3\%$)
- V = tensão nominal (V)

As perdas de tensão nos cabos podem ser calculadas pela Equação (11):

$$\Delta V = I \cdot R \quad (11)$$

Onde:

- ΔV = queda de tensão (V)
- I = corrente passando pelo cabo (A)
- R = resistência do cabo (Ω)

A resistência elétrica do cabo é obtida pela Equação (12) :

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (12)$$

Onde:

- ρ = resistividade do material (cobre : 0,0172 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
- L = comprimento do cabo (m)
- A = área de secção transversal do cabo (mm^2)

A corrente elétrica é determinada pela Equação (13):

$$I = \frac{P}{V} \quad (13)$$

No caso do protótipo, para duas lâmpadas de 10 W cada (20 W no total) alimentadas em 12 V, temos a Equação (14):

$$I_c = \frac{P_c}{V_b} = \frac{20W}{12V} = 1,67A \quad (14)$$

Dessa forma, a corrente do ramal das lâmpadas é de 1,67 A, enquanto a corrente dos ramais do módulo, controlador e bateria é de 5 A, conforme dimensionado na seção do controlador de carga, Equação (8). As distâncias máximas de cada ramal foram definidas conforme a Tabela 3. A corrente do Inversor é calculada mais a frente na Equação (25)

Tabela 3 - Dimensionamento dos Cabos (Distâncias máximas).

Ramal	Corrente (A)	Distância máxima (M)
Painel X Controlador	5	10
Controlador X Bateria	5	2
Bateria X Carga	1,67	5
Bateria X Inversor	x	3

Fonte: Elaboração Própria (2025).

3.8.1 Cálculos dos cabos

3.8.1.1 Painel x controlador

- Tensão nominal do Painel fotovoltaico : 18 V
- Queda Máxima, Equação (15):

$$\Delta V = 0,03 \times 18 = 0,54V \quad (15)$$

- Resistência, Equação (16):

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{0,54}{5} = 0,108 \Omega \quad (16)$$

- Seção, Equação (17):

$$A = \rho \cdot \frac{L}{R} = \frac{0,0172 \times 10}{0,108} = 1,59 \text{ mm}^2 \quad (17)$$

Adotado cabo de 2,5 mm^2 , garantindo a margem de segurança.

3.8.1.2 Controlador x bateria

- Tensão nominal da bateria : 13,5 V
- Queda Máxima, Equação (18):

$$\Delta V = 0,03 \times 13,5 = 0,405V \quad (18)$$

- Resistência, Equação (19):

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{0,405}{5} = 0,081 \Omega \quad (19)$$

- Seção, Equação (20):

$$A = \rho \cdot \frac{L}{R} = \frac{0,0172 \times 2}{0,081} = 0,4 \text{ mm}^2 \quad (20)$$

Apesar da seção calculada na equação (20), ser inferior a 1mm², foi adotado um cabo de seção 4 mm², considerando a corrente de 5 A, Equação (8) e a margem de segurança.

3.8.1.3 Bateria x carga (lâmpadas)

- Tensão nominal das lâmpadas : 12 V
- Queda Máxima, Equação (21)

$$\Delta V = 0,03 \times 12 = 0,36V \quad (21)$$

- Resistência, Equação (22):

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{0,36}{1,67} = 0,216 \Omega \quad (22)$$

- Seção, Equação (23):

$$A = \rho \cdot \frac{L}{R} = \frac{0,0172 \times 5}{0,216} = 0,4 \text{ mm}^2 \quad (23)$$

Adotado cabo de 1,5 mm², acima do mínimo calculado.

3.8.1.4 Bateria x inversor

- Tensão nominal das lâmpadas : 12 V
- Queda máxima igual a Equação (21)
- Corrente de Projeto, Equação (24)

$$I_{inv} = \frac{P_{inv}}{V \times \eta_{inv}} = \frac{500}{12 \times 0,92} \approx 45,29A \quad (24)$$

- Corrente de projeto, aplicado o fator de serviço contínuo 1,25, Equação (25):

$$I_{inv'} = 1,25 \times I_{inv} = 1,25 \times 45,29 \approx 56,62 A \quad (25)$$

- Seção, Equação (26):

$$A = \rho \cdot \frac{L \cdot I_{inv'}}{\Delta V} = \frac{0,0172 \times 3 \times 56,62}{0,36} = 8,11 \text{ mm}^2 \quad (26)$$

Adotado cabo de 10 mm², garantindo a margem de segurança.

A Tabela 4 apresenta o resumo do dimensionamento dos cabos do sistema fotovoltaico. Nela estão indicadas as correntes, distâncias máximas, quedas de tensão e as seções dos cabos adotadas para cada ramal, garantindo eficiência e segurança no protótipo.

Tabela 4 - Resumo do dimensionamento dos cabos

Ramal	Corrente (A)	Distância máxima (M)	Queda de Tensão Máx (%)	Seção do Cabo (mm ²)
Painel X Controlador	5	10	3%	2,5
Controlador X Bateria	5	2	3%	4
Bateria X Carga (Lâmpadas)	1,67	5	3%	1,5
Bateria x Inversor	56,62	3	3%	10

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Com o dimensionamento final dos cabos definido e resumido na Tabela 4, encerra-se esta etapa do projeto. A seguir, serão apresentados os materiais necessários e os respectivos custos para a implementação do protótipo fotovoltaico.

3.9 Proteções elétricas do protótipo

Esta etapa visa os dispositivos de proteção que asseguram segurança, confiabilidade e conformidade do sistema. Os dispositivos foram dimensionados conforme boas práticas da NBR 5410 (instalações BT) e da NBR 16690/ IEC 62548 (arranjos FV) :

- Limite típico de queda de tensão $\leq 3\%$ em circuitos DC terminais;
- Proteção contra sobrecorrente $\geq 1,25 \times$ a corrente de projeto (carga contínua) e compatível com a tensão CC;
- Dispositivos instalados próximos à fonte (módulo/bateria/inversor).

3.9.1 Cálculos das correntes de projeto

3.9.1.1 Arranjo FV x controlador

Conforme visto na Tabela 4, a corrente nesse ramal é de 5 A, aplicando a proteção contra sobrecarga temos a Equação (27), a seguir :

$$I_{proj} = 1,25 \times I_{fv} = 6,25A \quad (27)$$

Portanto, definiu-se o fusível gPV 10 A para esse ramal. Também foi definido um disjuntor bipolar AC 10 A para função de interruptor.

3.9.1.2 Controlador x bateria

A corrente nesse ramal também é 5 A, conforme a Tabela 4. Portanto, a corrente de projeto é o mesmo da Equação (27). Contudo, para proteção da bateria adotamos o fusível gPV 20 A, instalado no positivo da bateria.

3.9.1.3 Bateria x inversor

Considerando a Equação (25) mais conservadora, definiu-se o disjuntor bipolar CC 63A para esse ramal.

3.9.1.4 Bateria x ramal de iluminação

Conforme visto na Tabela 4, a corrente nesse ramal é de 1,67 A, aplicando a proteção contra sobrecarga temos a Equação (28):

$$I_{c'} = 1,25 \times 1,67 \approx 2,1A \quad (28)$$

Portanto, definiu-se o fusível in-line 5 A para no início do ramal.

3.9.1.5 Saída CA do inversor

A corrente de projeto da saída do inversor foi calculada pela seguinte Equação (29) :

$$I_{ca} = \frac{P_{inv}}{V} = \frac{500}{127} \approx 3,94 A \quad (29)$$

Com isto, foi definido como dispositivo de proteção nesse ponto, o disjuntor termomagnético 10 A.

Após dimensionado as devidas proteções temos como resumo a Tabela 5, conforme a seguir

Tabela 5 - Resumo do dimensionamento dos dispositivos de segurança

Ramal	Corrente de projeto (A)	Dispositivo	Dimensão
Painel X Controlador	6,25	Fusível gPV	10 A
Controlador X Bateria	6,25	Fusível gPV	20 A
Bateria X Carga (Lâmpadas)	2,1	Fusível In-Line CC	5 A
Bateria x Inversor	56,62	Disjuntor CC	63 A
Saída do Inversor (127 V)	3,94	Disjuntor CA	10 A

Fonte: Elaboração própria a partir da NBR 5410 (ABNT, 2004), NBR 16690 (ABNT, 2019) E IEC 62548 (2016).

3.10 Materiais e custos

Após a etapa de dimensionamento dos componentes, foi possível definir os materiais necessários para a implementação do protótipo off-grid. Cada item listado resulta diretamente dos cálculos apresentados anteriormente, assegurando a compatibilidade e eficiência do sistema.

A Tabela 6 apresenta os materiais selecionados, suas especificações básicas, quantidades e valores estimados, consolidando o investimento necessário para a montagem do protótipo.

Tabela 6 - Lista de Materiais.

Material	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
Módulo FV 60 Wp, 12 V	1	R\$ 214,99	R\$ 214,99
Controlador de Carga PWM 10 A, 12 V	1	R\$ 43,23	R\$ 43,23
Bateria Chumbo-Ácido 60 Ah, 12 V	1	R\$ 150,00	R\$ 150,00
Inversor Senoidal Modificado 500 W (12 V– 127 V)	1	R\$ 163,40	R\$ 163,40
Lâmpadas 10 W 12 V	2	R\$ 18,00	R\$ 36,00
Cabo Elétrico 2,5 mm ²	10m	R\$ 2,47	R\$ 24,70
Cabo Elétrico 4 mm ²	2m	R\$ 3,97	R\$ 7,94
Cabo Elétrico 1,5 mm ²	10m	R\$ 1,37	R\$ 13,70
Cabo Elétrico 10 mm ²	3m	R\$ 8,46	R\$ 25,38
Porta Fusível Monopolar FH32	2	R\$ 25,00	R\$ 50,00
Fusível gPV 10 A	1	R\$ 12,00	R\$ 12,00
Fusível gPV 20 A	1	R\$ 18,00	R\$ 18,00
Disjuntor Bipolar CC 63 A	1	R\$ 110,00	R\$ 110,00
Disjuntor Bipolar CA 10 A	2	R\$ 20,00	R\$ 40,00
Fusível In-Line CC 5A	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Terminal Tubular 1,5 mm	8	R\$ 0,25	R\$ 2,00
Terminal Tubular 2,5 mm	12	R\$ 0,30	R\$ 3,60
Terminal Tubular 4-6 mm	8	R\$ 0,70	R\$ 5,60
Terminal Tubular 10 mm	8	R\$ 1,50	R\$ 12,00
Plafon Bocal	2	R\$ 6,00	R\$ 12,00
Voltímetro e Amperímetro digital DC	3	R\$ 25,00	R\$ 75,00
Trilho DIN	1	R\$ 15,90	R\$ 15,90
Chave Liga/Desliga	2	R\$ 8,00	R\$ 16,00
Terminal para bateria	2	R\$ 15,00	R\$ 30,00
		TOTAL	R\$ 1.091,44

Fonte: Elaboração Própria (2025).

3.11 Montagem do protótipo

Com todos os materiais devidamente dimensionados e adquiridos, a etapa seguinte consistiu na montagem prática do protótipo fotovoltaico off-grid. O processo foi realizado em ambiente residencial, conforme o cenário proposto no item 3.2, visando condições controladas para avaliação do desempenho.

A montagem do circuito do protótipo foi organizada em uma estrutura de madeira, posteriormente fixada em um local de fácil visualização para a realização dos ensaios. O procedimento seguiu as seguintes etapas:

Passo 1 - Fixação do módulo fotovoltaico: O painel solar de 60 Wp foi instalado no telhado da residência, orientado para o Norte geográfico e inclinado segundo o ângulo recomendado pelo programa SunData ($\approx 4^\circ$), de modo a otimizar a captação da irradiação solar.

Figura 18 - Fixação do módulo fotovoltaico.



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Passo 2 - Instalação do controlador de carga: O controlador PWM de 10 A foi conectado inicialmente à bateria, conforme boas práticas de segurança, e posteriormente ao módulo fotovoltaico e às cargas, garantindo o gerenciamento adequado da energia.

Passo 3 - Banco de baterias: Foi utilizada uma bateria chumbo-ácido de 12 V / 60 Ah, conectada ao controlador de carga e ao inversor, com fusível de proteção no polo positivo, evitando riscos de sobrecarga e curto-círcuito.

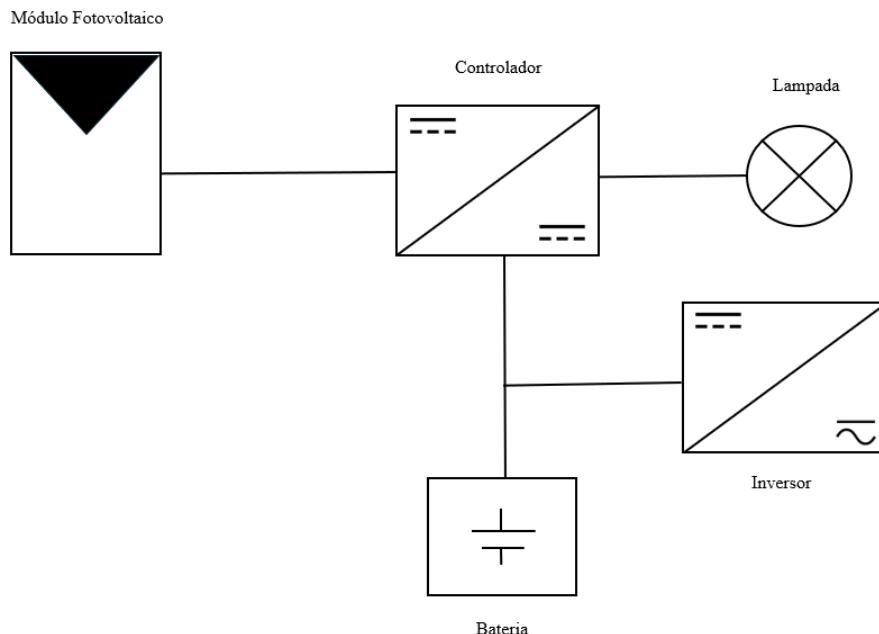
Passo 4 - Conexão do inversor: O inversor senoidal modificado (500 W) foi ligado diretamente ao banco de baterias, possibilitando a conversão da corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) para alimentação de cargas convencionais.

Passo 5 - Distribuição de cargas: Inicialmente foram conectadas duas lâmpadas LED de 10 W cada, simulando um consumo diário de 100 Wh, conforme levantado no dimensionamento.

Passo 6 - Cabeamento e proteções: Os cabos foram selecionados de acordo com os cálculos de bitola (2,5 mm², 4 mm² e 10 mm²) para cada trecho, respeitando a queda máxima de tensão de 3%. Adicionalmente, foram utilizados fusíveis e disjuntores para proteção contra sobrecorrente.

A Figura 19 ilustra o diagrama unifilar do protótipo, destacando a integração entre módulo fotovoltaico, controlador de carga, banco de baterias, inversor e cargas.

Figura 19 - Diagrama Unifilar Protótipo.



Fonte: Elaboração Própria (2025).

A Figura 20 mostra o protótipo montado e fixado em local de fácil acesso para visualização e manutenção. Forma instalados voltímetros e amperímetros digitais no sistema para auxiliar na coleta de dados durante a realização dos ensaios experimentais

Figura 20 - Protótipo montado e fixado.



Fonte: Elaboração Própria (2025).

4. Resultados e Análises

4.1 Verificações preliminares

Antes dos testes completos, foi realizada a verificação das conexões, da polaridade dos cabos e do funcionamento dos dispositivos de proteção (fusíveis, disjuntores e chave seccionadora). Também foram medidas as tensões iniciais da bateria de 12 V/60 Ah em repouso, confirmando o correto estado de carga antes do ensaio.

4.2 Curva de geração fotovoltaica

Durante o ensaio de um dia típico (07h–17h), foram coletados dados horários de tensão, corrente e potência do módulo fotovoltaico de 60 Wp. O objetivo principal foi avaliar o comportamento da geração em função das variações de irradiação solar e das condições climáticas locais.

Os resultados mostram que, entre 09h e 12h, o sistema apresentou a curva característica em “sino”, atingindo seu pico próximo ao meio-dia, com potência máxima de 51,22 W às 12h. Esse valor representa aproximadamente 85% da potência nominal do módulo (60 Wp), o que confirma o bom desempenho do sistema em condições de céu limpo.

No período da tarde, verificou-se queda acentuada da potência a partir das 14h, quando ocorreu uma chuva intensa. A potência caiu para 1,8 W e, em seguida, manteve-se próxima de zero até o fim do ensaio. Esse comportamento evidencia a forte dependência do sistema fotovoltaico em relação à radiação solar disponível, corroborando a literatura que destaca a variabilidade horária e climática como fatores limitantes para a estabilidade da geração.

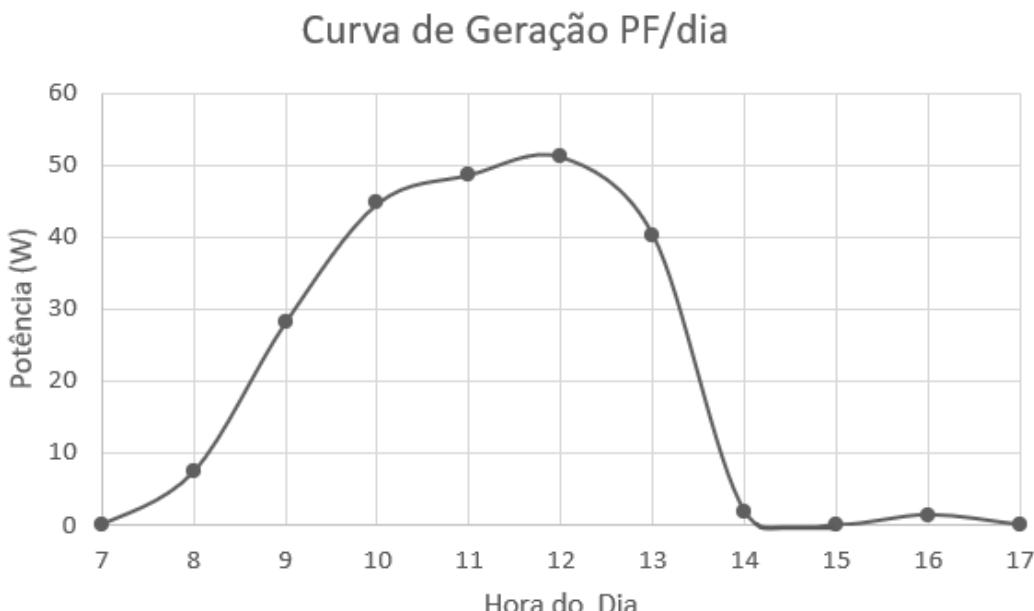
Os dados da Tabela 7 foram utilizados para construir a curva de geração diária (Figura 21), na qual se observa o pico por volta de 12 h e a queda acentuada após 14 h em razão de chuva intensa.

Tabela 7 - Dados horários de geração do painel fotovoltaico.

Hora	Tensão Painel (V)	Corrente Painel (A)	Potência(W)	Observações (clima)
07h	12	0	0	Início
08h	12,2	0,61	7,44	parcialmente nublado
09h	12,7	2,22	28,19	céu limpo
10h	13	3,44	44,72	céu limpo
11h	13,1	3,72	48,73	céu limpo
12h	13,2	3,88	51,22	céu limpo
13h	13	3,1	40,30	parcialmente nublado
14h	12	0,15	1,80	chuva intensa
15h	11,9	0	0,00	chuva intensa
16h	11,6	0,12	1,39	chuva intensa
17h	11,5	0	0,00	chuva intensa

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Figura 21 - Gráfico: Curva de geração do painel ao longo do dia.



Fonte: Elaboração Própria (2025).

De forma geral, a curva obtida confirma o comportamento esperado para um sistema fotovoltaico de pequeno porte: desempenho satisfatório em condições ideais de insolação, seguido de queda brusca em situações de nebulosidade e chuva. Essa análise é fundamental para compreender a eficiência global do sistema e reforça a importância de considerar fatores climáticos no dimensionamento e operação de sistemas off-grid.

Esses resultados servem de base para a análise da eficiência global do sistema, apresentada na Seção 4.4, onde a energia efetivamente entregue às cargas será comparada à energia gerada pelo módulo. Assim, é possível verificar se o rendimento experimental se aproxima do valor de 50,6% obtido no dimensionamento inicial.

4.3 Ensaio de autonomia da bateria

Com o painel desligado, a bateria de 60 Ah alimentou duas lâmpadas LED de 10 W cada (potência total de 20 W). A tensão da bateria foi registrada a cada hora durante um período de 10 horas, com o objetivo de simular uma autonomia equivalente a dois dias de operação de 5 horas de iluminação.

A Tabela 8 apresenta os dados coletados no ensaio, incluindo tensão, corrente de descarga, potência instantânea, energia acumulada e estado de carga (SOC). Observa-se que, ao final das 10 horas de funcionamento, a energia acumulada atingiu cerca de 200,7 Wh, correspondendo a aproximadamente 72% do SOC, o que confirma a coerência com o dimensionamento previsto.

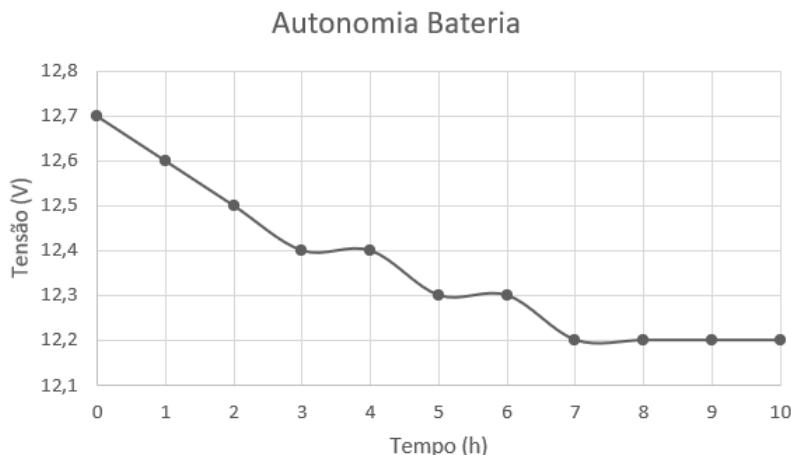
Tabela 8 - Registro da descarga da bateria de 60 Ah com carga de 20 W.

Tempo (h)	Tensão (V)	Corrente de descarga (A)	Potência (W)	Energia Acumulada (Wh)	Estado de Carga (%)
0	12,7	1,56	19,812	0	100%
1	12,6	1,58	19,908	19,908	97%
2	12,5	1,6	20	39,908	94%
3	12,4	1,62	20,088	59,996	92%
4	12,4	1,61	19,964	79,96	89%
5	12,3	1,63	20,049	100,009	86%
6	12,3	1,62	19,926	119,935	83%
7	12,2	1,64	20,008	139,943	81%
8	12,2	1,65	20,13	160,073	78%
9	12,2	1,67	20,374	180,447	75%
10	12,2	1,66	20,252	200,699	72%

Fonte: Elaboração Própria (2025).

A Figura 22 ilustra a curva de descarga da bateria ao longo do tempo, evidenciando a queda gradual da tensão durante o ensaio. Considerando que o limite de profundidade de descarga seguro é de 50% do SOC, estima-se que, além das 10 horas já registradas, a bateria ainda poderia sustentar aproximadamente 8 horas adicionais de autonomia, totalizando em torno de 18 horas de operação contínua com a carga de 20 W.

Figura 22 - Gráfico de descarga da bateria ao longo do tempo.



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Esse resultado confirma que o sistema é capaz de fornecer iluminação estável por períodos prolongados, respeitando os limites de descarga recomendados para preservar a vida útil da bateria.

4.4 Eficiência global do sistema

A eficiência global do sistema fotovoltaico corresponde à razão entre a energia efetivamente entregue às cargas (Ecarga) e a energia total gerada pelo módulo (EFV) durante o período de ensaio, conforme a Equação 30. Esse parâmetro permite avaliar as perdas nos componentes do sistema como controlador, cabos, bateria e inversor.

$$\eta = \frac{Ecarga}{EFV} \times 100\% \quad (30)$$

A medição da energia foi realizada por meio de leituras de tensão (V) e corrente (A) com voltímetro e amperímetro digitais nos respectivos pontos do circuito: saída do painel para o controlador e saída do controlador para as cargas. A potência instantânea foi obtida a partir da Equação 31, e a energia acumulada (Wh) resultou da soma das potências medidas em intervalos regulares ao longo do dia.

$$P = V \times I \quad (31)$$

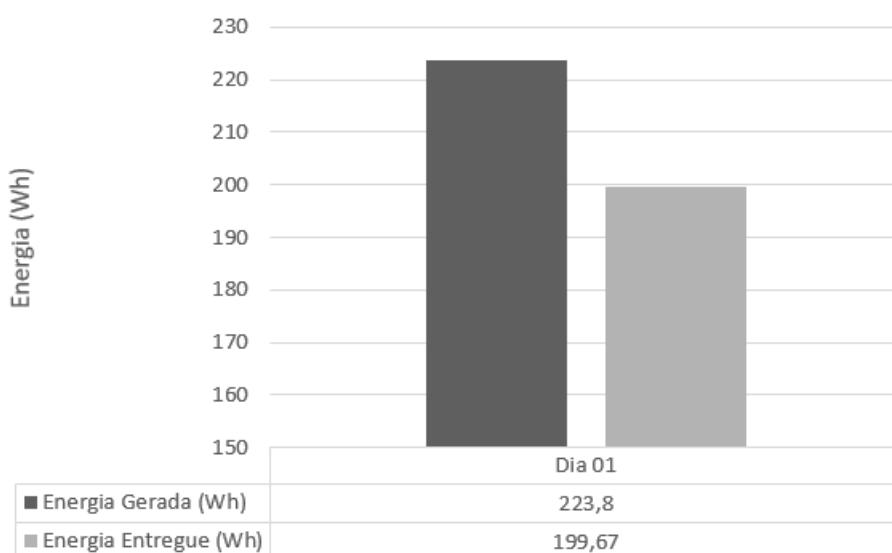
A Tabela 9 apresenta os dados coletados durante o ensaio, enquanto a Figura 23 mostra a comparação entre a energia gerada e a energia entregue, em forma de gráfico de barras.

Tabela 9 - Coleta de dados da energia gerada pelo painel e da energia entregue às cargas.

Hora	Tensão FV (V)	Corrente FV (A)	Potência FV (W)	Energia FV acumulada (Wh)	Tensão carga (V)	Corrente carga (A)	Potência carga (W)	Energia carga acumulada (Wh)
08h	12,2	0,61	7,44	7,44	12,2	1,64	20,01	20,01
09h	12,7	2,22	28,19	35,64	12,6	1,58	19,91	39,92
10h	13	3,44	44,72	80,36	12,9	1,52	19,61	59,52
11h	13,1	3,72	48,73	129,09	13	1,52	19,76	79,28
12h	13,2	3,88	51,22	180,30	13,1	1,5	19,65	98,93
13h	13	3,1	40,30	220,60	12,9	1,52	19,61	118,54
14h	12	0,15	1,80	222,40	12,1	1,65	19,97	138,51
15h	11,9	0	0,00	222,40	11,9	1,68	19,99	158,50
16h	11,6	0,12	1,39	223,80	11,7	1,75	20,48	178,97
17h	11,5	0	0,00	223,80	11,5	1,8	20,70	199,67
Total			EFV Total	223,80			Ecarga Total	199,67

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Figura 23 - Eficiência global do sistema (%).



Fonte: Elaboração Própria (2025).

No intervalo 8h – 13h, $E_{FV} = 220,6 \text{ Wh}$ e $E_{carga} = 118,54 \text{ Wh}$, logo obteve-se uma eficiência global de aproximadamente 53,73 %, valor bastante próximo ao estimado na etapa de dimensionamento (50,6%). Esse resultado confirma a relevância de considerar as perdas reais nos componentes do sistema para uma avaliação mais fiel do seu desempenho.

4.5 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos nos ensaios do protótipo fotovoltaico permitem uma análise integrada do desempenho do sistema em condições reais de operação. A curva de geração do módulo (Seção 4.2) apresentou o formato característico em “sino”, atingindo potência máxima próxima de 51 W às 12h, valor condizente com a potência nominal do painel de 60 Wp, considerando perdas de temperatura, sujeira e orientação. No entanto, verificou-se queda abrupta de geração a partir das 14h devido à ocorrência de chuva intensa, o que evidencia a sensibilidade do sistema a condições climáticas adversas, conforme também discutido por Pereira et al. (2017).

O ensaio de autonomia da bateria (Seção 4.3) demonstrou que o banco de 60 Ah foi capaz de alimentar uma carga constante de aproximadamente 20 W por 10 horas, acumulando cerca de 200,7 Wh consumidos, o que correspondeu a 72% do estado de carga (SOC). A partir desse resultado, estimou-se que, até o limite de 50% de profundidade de descarga (DoD), a bateria ainda teria capacidade de fornecer aproximadamente 159 Wh adicionais, prolongando a autonomia total para cerca de 18 horas de operação contínua. Esse desempenho confirma a coerência do dimensionamento realizado, além de reforçar a importância de manter limites de descarga conservadores para assegurar a vida útil do banco de baterias (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Na análise da eficiência global do sistema (Seção 4.4), constatou-se que a energia entregue às cargas (199,67 Wh) representou aproximadamente 53,7% da energia total gerada pelo painel (223,8 Wh). Esse valor se aproxima da eficiência teórica de 50,6% estimada no dimensionamento, validando a metodologia aplicada e confirmando a relevância de considerar as perdas distribuídas ao longo da cadeia de conversão (controlador PWM, cabos, bateria e inversor). Resultados semelhantes são reportados em sistemas off-grid de pequeno porte, nos quais as perdas nos estágios de armazenamento e conversão podem reduzir a eficiência global para valores inferiores a 60% (EPE, 2023).

De forma geral, os resultados apontam que o sistema se mostra tecnicamente viável para aplicações de baixa potência em localidades isoladas, fornecendo autonomia energética adequada para cargas de iluminação. Contudo, o desempenho é fortemente influenciado pelas condições climáticas e pela qualidade do banco de baterias, fatores que devem ser considerados em estudos futuros para ampliar a confiabilidade do sistema.

4.6 Análise de viabilidade técnica e econômica

O protótipo desenvolvido, com custo total aproximado de R\$ 1.091,44, foi dimensionado para atender a cargas básicas de iluminação e pequenos equipamentos. Para verificar sua viabilidade, foi considerado o valor parcial de R\$ 607,62, referente aos cinco principais itens do sistema, destacados na Tabela 6. A partir desse investimento, foi realizada a comparação entre três cenários distintos:

- (1) consumo pela rede elétrica urbana;
- (2) uso de geradores a gasolina em localidades isoladas;
- (3) sistema fotovoltaico off-grid.

Segundo a ANEEL (2025), o custo médio da tarifa residencial de energia elétrica no Brasil situa-se em torno de R\$ 0,85/kWh. Já os geradores a gasolina apresentam custos muito superiores, devido ao consumo de combustível. Dados da EPE (2023) indicam que um gerador de pequeno porte consome, em média, 0,4 a 0,8 L/kWh. Considerando o preço médio da gasolina

em R\$ 6,00/L, o custo energético situa-se entre R\$ 2,40 e R\$ 4,80/kWh, sem contabilizar os gastos adicionais com manutenção e óleo lubrificante (PEREIRA et al., 2020).

O protótipo solar, por sua vez, apresenta produção anual estimada em 45,6 kWh/ano. O custo nivelado de energia (LCOE simplificado) é calculado pela Equação 32:

$$\text{LCOE} = \frac{607,62}{45,6 \times N} \quad (32)$$

onde N é o número de anos de operação. Assim, obtemos:

- Para 3 anos: R\$ 4,44/kWh
- Para 5 anos: R\$ 2,66/kWh

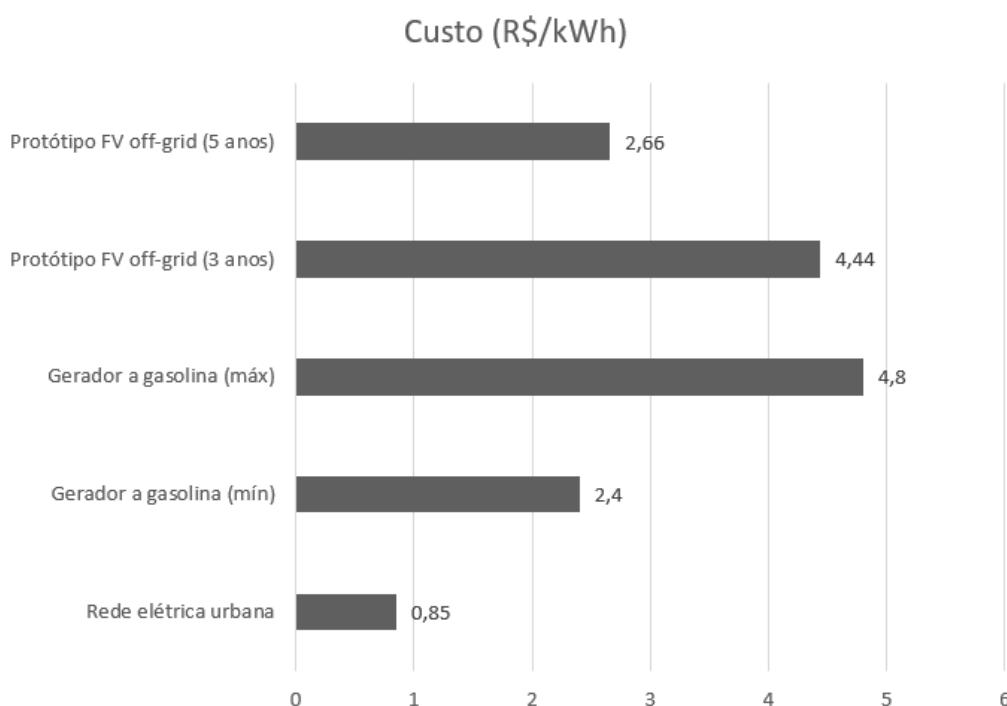
A Tabela 10 apresenta o comparativo entre os cenários analisados e a Figura 24 ilustra os custos médios de forma gráfica.

Tabela 10 - Comparação de custos de energia em diferentes cenários.

Cenário	Custo médio (R\$/kWh)	Observações principais
Rede elétrica urbana	~ 0,85	Mais econômico; disponível apenas em áreas conectadas
Gerador a gasolina (isolado)	2,40 – 4,80	Alto custo; depende do preço do combustível; exige manutenção periódica
Protótipo FV off-grid (R\$ 1.091,44)	4,44 – 2,66 (3 - 5 anos)	Competitivo frente ao gerador; não depende de combustível; exige troca periódica da bateria

Fonte: Elaboração própria a partir de ANEEL (2025), EPE (2023) e Villalva & Gazoli (2012).

Figura 24 - Comparação de custos médios de energia (R\$/kWh) em diferentes cenários.



Fonte: Elaboração própria a partir de ANEEL (2025), EPE (2023) e Villalva & Gazoli (2012).

Os resultados mostram que, em áreas urbanas, a rede elétrica continua sendo a opção mais econômica, tornando o protótipo inviável financeiramente se comparado apenas sob o aspecto do custo por kWh. Entretanto, em localidades isoladas,

onde a alternativa geralmente é o uso de geradores a combustíveis fósseis, o sistema fotovoltaico off-grid se mostra mais competitivo e sustentável, apresentando custo similar ou até inferior a médio prazo, além de benefícios ambientais.

Esse panorama evidencia que a principal contribuição do sistema não está na substituição da rede elétrica convencional, mas sim na garantia de autonomia energética em regiões remotas, onde o custo do gerador é elevado e o fornecimento contínuo de energia é crítico. Dessa forma, a análise de viabilidade técnica e econômica sustenta a relevância do protótipo e prepara o terreno para as conclusões finais apresentadas no próximo capítulo.

5. Conclusão

Consideramos que alcançamos o objetivo proposto para este estudo no sentido de analisar os benefícios do uso de um sistema fotovoltaico off-grid de baixa potência, desenvolvido em formato de protótipo aplicado à iluminação residencial. A partir do levantamento bibliográfico, do dimensionamento técnico e da montagem prática, foi possível compreender tanto os aspectos teóricos quanto as limitações e potencialidades do sistema.

Os resultados obtidos demonstraram que o protótipo atendeu satisfatoriamente às cargas propostas, garantindo autonomia energética para duas lâmpadas de 10 W com capacidade de armazenamento em bateria de 60 Ah. Além disso, verificou-se que o sistema apresentou funcionamento estável, confirmando a importância de componentes como o controlador de carga e as proteções elétricas no desempenho e na segurança da aplicação.

A análise de viabilidade técnica e econômica evidenciou que, em áreas urbanas, a energia proveniente da rede elétrica permanece mais vantajosa financeiramente. Contudo, em localidades isoladas, onde a alternativa principal costuma ser o uso de geradores a combustíveis fósseis, o sistema fotovoltaico off-grid se mostrou competitivo, sustentável e capaz de oferecer autonomia energética a custos semelhantes ou até inferiores em médio prazo.

Como limitações do estudo, destaca-se a vida útil reduzida das baterias de chumbo-ácido e a necessidade de manutenção periódica. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a análise de tecnologias alternativas de armazenamento, como baterias de íons de lítio, bem como a realização de ensaios em diferentes condições de irradiação para ampliar a confiabilidade dos resultados.

Dessa forma, conclui-se que o sistema fotovoltaico off-grid desenvolvido não apenas atende à função de fornecer energia em situações de consumo básico e emergencial, como também se configura como uma alternativa viável para regiões remotas, promovendo sustentabilidade, independência energética e redução de impactos ambientais.

Agradecimentos

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização e sucesso deste artigo.

Referências

- ABNT. (2004). NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- ABNT/CEPEL – CRESESB. (2014). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB.
- ABNT. (2019). NBR 16690: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – Requisitos de projeto. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- Alves, M. O. L. (2019). Energia Solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.
- ANEEL. (2025). Expansão da geração e panorama tarifário. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).
- ANEEL. (2025). Geração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica (SCEE). Brasília. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>.

ANEEL. (2012). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para acesso de microgeração e minigeração distribuída e o sistema de compensação de energia elétrica. Brasília, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Beneduce, F. C. A. (1999). Energia solar fotovoltaica sem mistérios. Fortaleza: Banco do Nordeste.

BLUESOL. (2017). Sistemas fotovoltaicos isolados. Ribeirão Preto: Bluesol. <https://blog.bluesol.com.br/diferenca-sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-e-isolados/>.

Bortoloto, V. A. et al. (2017). Geração de Energia Solar On grid e Off grid. In: 6ª Jornada Científica e Tecnológica da Fatec de Botucatu, São Paulo. Jornacitec Botucatu–São Paulo. Out de 2017. <http://www.jornacitec.fatecbot.edu.br/>.

Brasil. (2022). Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída e dispõe sobre o SCEE. Diário Oficial da União.

CAPES. (2025). Portal de Periódicos CAPES. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). <https://www.periodicos.capes.gov.br/>.

Carneiro, R. L. et al. (2017). Aspectos essenciais das Baterias Chumbo-Ácido e Princípios Físico-Químicos e Termodinâmicos do seu Funcionamento. Revista Virtual de Química. 9(3), 889-911.

CRESESB. (2014). Células Fotovoltaicas: Princípios e Funcionamento. Centro de Referência em Energia Solar e Engenharia de Sistemas Biomédicos – CRESESB. <https://www.cresesb.cepel.br/>.

Costa, A. R. S. (2022). Montagem e estudo de um sistema solar fotovoltaico off-grid para bombeamento de água. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

CRESESB/CEPEL. (2025). SunData: irradiação solar diária média. <https://cresesb.cepel.br/>.

Dalmarco, A. R. (2017). Regulação, energia e inovação. EditoraLumen Juris.

Energes. (2020). Inversor solar. https://energes.com.br/inversor-solar/?srsltid=AfmBOopyOc4XsYOiL40OmEQsL_OhX3zuYIz0hmLmmf8E_2T6WAjFaRn7.

EPE. (2023). Balanço Energetico Nacional 2023. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Ferreira, R. (2021). Análise da Viabilidade Econômica da Substituição de Banco de Baterias: Chumbo-Ácido x Ni-Cd, Considerando Diferentes Temperaturas Ambiente. Seminar on Power Electronics and Control - SEPOC.

Google Maps. (2025). Mapa da região de Manaus/AM. <https://www.google.com/maps>.

Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2012). Fundamentos de Física. (10.ed). Editora LTC.

HANGAR MMA. (2023). Como é a bateria de uma aeronave. <https://hangarmma.com.br/blog/como-e-a-bateria-de-uma-aeronave/>.

IBERDROLA. (2025). História da energia solar. <https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/energia-solar-fotovoltaica/historia-energia-solar>.

IEA. (2023). World Energy Outlook 2023. Paris: International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.

INPE/CCST/LABREN. (2017). Atlas Brasileiro de Energia Solar. (2^aed.). Editora do INPE.

IBER. (2024). O impacto ambiental das baterias de chumbo-ácido: conheça os riscos e saiba como reciclar responsávelmente. Instituto Brasileiro para a Evolução Responsável – IBER. <https://iberbrasil.org.br/blog/2024/03/26/o-impacto-ambiental-das-baterias-de-chumbo-acido-conheca-os-riscos-e-saiba-como-reciclar-responsavelmente/>. Acesso em: 14 set. 2025.

Integração Solar. (2023). Como funciona um gerador fotovoltaico. <https://www.integracaosolar.com.br/como-funciona-um-gerador-fotovoltaico>.

Lana, T. R. et al. (2021). Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. Revista Mythos. 12(2), 51–61. DOI: 10.36674/mythos.v14i2.467.

Lima, J. R. & Nunes, L. A. S. (2022). Geração de energia fotovoltaica on-grid e off-grid. Trabalho de Conclusão de Curso. Ciência e Tecnologia, Mossoró. chrome-extension://efaidnbmnnibpcapcglclefindmkaj/https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/f5026db4-03f9-4ea3-9261-90603b96fa7e/content

Lins, L. R. P. (2018). Dimensionamento de sistema fotovoltaico off-grid para escritório móvel. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Ceará.

Macedo, W. N. (2006). Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede. São Paulo, Brasil: Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. Brasil. 183 p.

Michelini, A. (2020). Baterias de lítio. São Paulo: STA Eletrônica. <https://www.sta-eletronica.com.br/resources/downloads/ebookbateriasdelitio.pdf>.

Neosolar. (2025). Energia solar fotovoltaica. 2025. <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica>.

Oliveira, M. & Pereira, F. (2011). Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica. (2.ed). Editora Porto: Publindústria.

ONU. (2015). Transformando Nossa Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova Iorque: Organização das Nações Unidas (ONU).

Ottonelli, J. (2021). Oportunidades e desafios do setor de energia solar fotovoltaica no Brasil. Revista Econômica do Nordeste. 52(4), 93–110.

Pereira, E. et al. (2017). Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. Editora do INPE.

Pereira, N. X. (2019). Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Bauru.

Pereira, A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [free ebook]. Santa Maria. Editora da UFSM.

Pinho, J. et al. (2008). Sistemas híbridos: soluções energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia.

Pinho, J. & Galdino, M. (2014). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Editora CEPEL/CRESES.

Posto das Baterias. (2025). Kit off-grid de até 2,1 kWh/mês com autonomia de até 24h. https://www.postodasbaterias.com.br/kit-off-grid-de-ate-21-kwh-mes-com-autonomia-de-ate-24h.html?srsltid=AfmBOoqanhzIxtJqdJA_3OTjQE0xiAtXBwtNmRU0yhssOsS53oS5vBj_.

Rother, H. (2007). Revisão sistemática x revisão narrativa. Acta Paulista de Enfermagem. 20(2), 5- 6.

SCIELO (2025). SciELO Brasil. Scientific Electronic Library Online (SCIELO). <https://scielo.org/>.

SECPower. (2021). Conheça os principais tipos de baterias de lítio. <https://secpower.com.br/conheca-os-principais-tipos-de-baterias-de-litio/>.

Shitsuka, R. et al. (2014). Matemática fundamental para a tecnologia. (2.ed.). Editora Érica.

Villalva, M. G. & Gazoli, J. R. (2012). Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. Editora Érica.

Villalva, M. G. (2015). Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. (2.ed). Editora Érica.