

# ENERGIA FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL COM ARMAZENAMENTO EM CONDE-PB: ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL

RESIDENTIAL PHOTOVOLTAIC ENERGY WITH STORAGE IN CONDE-PB:  
TECHNICAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS

Ciências Exatas e da Terra, Engenharias • 29/05/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/779908219](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/779908219)

Tiago Ribeiro da Silva<sup>1</sup>

## RESUMO

O estudo analisa o desempenho técnico e econômico de um sistema fotovoltaico residencial de 5 kWp integrado a um banco de baterias de 10 kWh, instalado no município de Conde-PB. A pesquisa foi conduzida ao longo de seis meses, com base em dados de irradiância local, perfis de consumo residencial de 400 kWh/mês e simulações realizadas nos softwares PVsyst e HOMER. Os resultados indicam geração média mensal de 625 kWh, fator de desempenho (PR) de 0,78 e taxa de autoconsumo de 62%. O sistema de armazenamento proporcionou autonomia de 8 a 10 horas no período noturno e reduziu a fatura de energia em até 38%. O investimento total estimado em R\$ 38.000 apresentou payback simples de 5,8 anos e Taxa Interna de Retorno (TIR) de 17% ao ano. Do ponto de vista ambiental, considerando fatores médios de emissão aplicáveis ao Sistema Interligado Nacional, o sistema contribui para evitar aproximadamente 0,5 a 0,8 tonelada de CO<sub>2</sub> por ano, conforme o fator de emissão adotado. Os resultados demonstram a viabilidade técnica, econômica e ambiental da geração fotovoltaica com armazenamento em regiões de alta irradiância solar, reforçando a importância de políticas públicas de incentivo à geração distribuída.

**Palavras-chave:** energia fotovoltaica; armazenamento de energia; geração distribuída; viabilidade econômica; sustentabilidade energética; Conde-PB.

## ABSTRACT

The study analyzes the technical and economic performance of a 5 kWp residential photovoltaic system integrated with a 10 kWh battery bank, installed in the municipality of Conde-PB, Brazil. The research was conducted over six months, based on local irradiance data, residential consumption profiles of 400 kWh/month, and

simulations performed using PVsyst and HOMER software. Results indicate an average monthly generation of 625 kWh, a performance ratio (PR) of 0.78, and a self-consumption rate of 62%. The storage system provided 8 to 10 hours of nighttime autonomy and reduced electricity bills by up to 38%. The total investment of BRL 38,000 yielded a simple payback of 5.8 years and an Internal Rate of Return (IRR) of 17% per year. From an environmental perspective, considering average emission factors applicable to the Brazilian interconnected power system, the system helps avoid approximately 0.5 to 0.8 tons of CO<sub>2</sub> emissions per year, depending on the emission factor adopted. The findings demonstrate the technical, economic, and environmental viability of photovoltaic generation with storage in high-irradiance regions, reinforcing the importance of public policies supporting distributed generation.

**Keywords:** photovoltaic energy; energy storage; distributed generation; economic viability; energy sustainability; Conde-PB.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por energia elétrica, associada à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e de descarbonização dos sistemas energéticos, tem impulsionado de forma significativa a transição para fontes renováveis e modelos mais sustentáveis de geração e consumo de eletricidade. Nesse cenário de transformação do setor energético, a energia solar fotovoltaica (FV) consolida-se como uma das alternativas tecnológicas de maior relevância e aplicabilidade, particularmente em países com elevado potencial de irradiância solar, como o Brasil (IEA, 2024; Fraunhofer ISE, 2025).

O princípio de funcionamento dos sistemas fotovoltaicos fundamenta-se no efeito fotoelétrico, fenômeno físico pelo qual a incidência de fótons sobre materiais semicondutores, sobretudo o silício cristalino, provoca a excitação de elétrons e a consequente geração de corrente elétrica contínua, posteriormente convertida em corrente alternada por meio de inversores. Essa tecnologia permite a conversão direta da radiação solar em energia elétrica utilizável, dispensando a combustão de insumos fósseis, reduzindo a dependência de fontes convencionais e contribuindo para a diversificação, modernização e descarbonização da matriz elétrica nacional.

No contexto brasileiro, a expansão da geração distribuída (GD) tem sido favorecida por um conjunto de fatores estruturais, como a redução gradual dos custos de aquisição de módulos fotovoltaicos, o avanço tecnológico dos inversores, a ampliação do acesso a linhas de financiamento e a consolidação de um arcabouço regulatório específico para o setor. A promulgação da Lei nº 14.300/2022, denominada Marco Legal da Geração Distribuída, representou avanço institucional importante, ao uniformizar as regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída conectada à rede, estabelecer critérios para o sistema de compensação de energia elétrica e conferir maior segurança jurídica a consumidores, instaladores, concessionárias e investidores do setor fotovoltaico nacional (Aneel, 2012; Aneel, 2015; Brasil, 2022).

Paralelamente ao crescimento da geração solar convencional em regime de compensação energética, observa-se, nos últimos anos, maior interesse técnico e comercial por sistemas fotovoltaicos integrados a tecnologias de armazenamento eletroquímico de energia, também denominados sistemas híbridos ou sistemas

fotovoltaicos com armazenamento. Dentre as tecnologias de armazenamento disponíveis no mercado, destacam-se as baterias de íons de lítio, em razão de sua elevada densidade energética, boa eficiência nos ciclos de carga e descarga, baixa taxa de autodescarga e vida útil compatível com aplicações residenciais (NREL, 2024; Khezri; Mahmoudi; Aki, 2022).

A integração entre geração fotovoltaica e armazenamento eletroquímico possibilita o deslocamento temporal do uso da energia gerada, viabilizando seu consumo nos intervalos de baixa ou nula produção solar, especialmente no período noturno e em dias de elevada nebulosidade. Como consequência direta, essa configuração tende a elevar as taxas de autoconsumo, reduzir a dependência da rede elétrica convencional, atenuar a demanda em horários de maior consumo e aprimorar a autonomia e a segurança energética das unidades consumidoras.

Em localidades com elevada disponibilidade de radiação solar, como o Nordeste brasileiro, os sistemas fotovoltaicos associados ao armazenamento apresentam potencial relevante sob os aspectos energético, econômico e ambiental, tornando-se uma alternativa estratégica para a promoção da resiliência energética local. O município de Conde, situado no litoral sul do estado da Paraíba, apresenta condições climáticas e geográficas favoráveis à implementação de tecnologias fotovoltaicas. A região dispõe de recurso solar consistente ao longo do ano, com bons níveis de irradiância solar, o que contribui para a previsibilidade do desempenho energético de sistemas fotovoltaicos residenciais (INPE; LABREN, 2017; CRESESB, 2025).

Acrescenta-se a isso a disponibilidade de áreas residenciais com orientação e inclinação de telhado adequadas à instalação de módulos solares, além de um perfil de consumo característico de regiões de clima quente, marcado por demanda significativa de energia para climatização e demais usos residenciais. Essas características tornam relevante a avaliação sistemática de sistemas fotovoltaicos residenciais com armazenamento eletroquímico como estratégia tecnicamente embasada para a redução dos custos associados ao consumo de energia elétrica, o aumento do autoconsumo e a mitigação dos impactos ambientais decorrentes da geração elétrica baseada em fontes convencionais.

Apesar do crescimento acelerado da energia solar fotovoltaica no Brasil, a adoção em larga escala de sistemas residenciais com armazenamento eletroquímico ainda enfrenta desafios de ordem econômica, técnica e regulatória. O custo inicial de investimento em baterias, embora apresente tendência de redução ao longo dos anos, ainda representa componente significativo do orçamento total de um sistema híbrido, podendo elevar o período de retorno do investimento e tornar a análise de viabilidade econômica sensível às premissas adotadas, como tarifa de energia, perfil de consumo, taxa de desconto, vida útil dos equipamentos e regime operacional do banco de baterias (Deotti et al., 2020; Hoppmann et al., 2014).

Além disso, fatores como profundidade de descarga, temperatura de operação, número de ciclos acumulados e eficiência do sistema de gerenciamento da bateria influenciam diretamente a degradação da capacidade útil ao longo do tempo, com reflexos sobre a vida útil efetiva do sistema e sobre a precisão das projeções financeiras. Diante desse cenário, torna-se necessário realizar estudos técnicos e econômicos baseados em dados locais de irradiância, perfil de carga

e custos regionais, capazes de avaliar a viabilidade real desses sistemas em contextos geográficos e tarifários específicos, como o caso do município de Conde-PB.

Neste escopo, o presente projeto de pesquisa tem por objetivo central avaliar o desempenho técnico, econômico e ambiental de um sistema fotovoltaico residencial de 5 kWp integrado a um banco de baterias de íons de lítio com capacidade nominal de 10 kWh, dimensionado para uma residência típica do município de Conde, estado da Paraíba. A investigação contempla a coleta e o tratamento de dados de irradiância solar local, a caracterização do perfil médio de consumo energético da residência-tipo, a realização de simulações computacionais do comportamento energético e operacional do sistema por meio de ferramentas especializadas, e a aplicação de indicadores de viabilidade financeira, como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e payback.

O conjunto dessas análises visa verificar a capacidade do sistema em promover a redução dos custos com energia elétrica, elevar o índice de autoconsumo e quantificar a contribuição ambiental em termos de redução de emissões de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq) ao longo da vida útil do sistema. Os resultados obtidos pretendem oferecer subsídios técnicos para consumidores residenciais, profissionais do setor elétrico, gestores de políticas públicas de energia e pesquisadores interessados na ampliação da geração distribuída renovável e no fortalecimento da sustentabilidade energética em escala local e regional.

## **2. REVISÃO TEÓRICA**

A energia solar fotovoltaica (FV) tem se consolidado, nas últimas décadas, como uma das principais tecnologias renováveis para a geração de eletricidade em escala residencial, comercial e industrial. Seu princípio de funcionamento fundamenta-se no efeito fotoelétrico, pelo qual a incidência de fótons sobre materiais semicondutores — notadamente o silício monocristalino (mono-Si) e policristalino (poli-Si) — provoca a excitação de elétrons da banda de valência para a banda de condução, gerando uma diferença de potencial e, conseqüentemente, uma corrente elétrica contínua (CC). O silício cristalino permanece como tecnologia predominante no mercado mundial de módulos fotovoltaicos (IEA, 2024; Fraunhofer ISE, 2025).

Essa corrente é posteriormente submetida ao processo de inversão por meio de inversores eletrônicos de potência — do tipo string, central ou microinversores —, sendo convertida em corrente alternada (CA) compatível com a frequência da rede elétrica convencional (60 Hz no Brasil), possibilitando sua utilização em cargas elétricas residenciais ou sua injeção na rede de distribuição mediante mecanismos de compensação tarifária. A eficiência de conversão dos módulos comerciais de silício cristalino situa-se, em geral, em patamares compatíveis com aplicações residenciais e apresenta tendência de incremento em função do avanço das pesquisas em materiais e arquiteturas de células de alta performance, como PERC, HJT e TOPCon (Fraunhofer ISE, 2025).

No Brasil, a geração fotovoltaica adquiriu relevância crescente a partir da estruturação e ampliação do marco regulatório da geração distribuída (GD), modalidade em que consumidores — denominados prosumidores — passam a produzir parte ou a totalidade da energia elétrica que consomem, podendo injetar

excedentes na rede de distribuição local. Esse modelo descentralizado de geração promove uma reconfiguração estrutural da relação tradicional entre consumidor e concessionária distribuidora, transformando o usuário em agente ativo do sistema elétrico.

Sob o aspecto sistêmico, a geração distribuída pode contribuir para a redução de perdas técnicas associadas à transmissão e distribuição de energia, para o alívio do carregamento das redes em determinados períodos de demanda e para o incremento da participação de fontes renováveis na matriz elétrica nacional. A regulamentação da geração distribuída no Brasil foi progressivamente estruturada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com marco inicial na Resolução Normativa nº 482/2012, que instituiu o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e permitiu a conexão de micro e minigeradores ao sistema de distribuição (Aneel, 2012).

Revisões regulatórias posteriores, em especial a Resolução Normativa nº 687/2015, ampliaram os limites de potência, expandiram as modalidades de geração compartilhada e autoconsumo remoto, e introduziram mecanismos mais flexíveis de compensação (Aneel, 2015). O processo de maturação regulatória culminou com a promulgação da Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022, denominada Marco Legal da Geração Distribuída, que conferiu status legislativo ao conjunto de regras do setor, definiu critérios de enquadramento de microgeração e minigeração, estabeleceu regime de cobrança gradual pela utilização da infraestrutura da rede elétrica e garantiu direitos adquiridos às instalações conectadas dentro dos prazos estabelecidos (Brasil, 2022).

A viabilidade técnica e econômica de sistemas fotovoltaicos é determinada por um conjunto multivariável de fatores interdependentes, que incluem a irradiância solar global horizontal (GHI), a irradiância no plano do módulo (POA), a orientação azimutal, o ângulo de inclinação dos módulos, o perfil horário e sazonal de consumo da unidade consumidora, a tarifa de energia elétrica praticada pela distribuidora local, o custo de aquisição e instalação dos equipamentos, a vida útil dos componentes e a política de compensação vigente.

O indicador Performance Ratio (PR), definido no conjunto de normas IEC 61724, é amplamente utilizado para aferir a eficiência global do sistema instalado, relacionando a energia efetivamente produzida à energia de referência obtida a partir da irradiância incidente. Em sistemas fotovoltaicos bem dimensionados, o PR permite avaliar o efeito agregado de perdas por temperatura, inversores, cabeamento, sujeira, sombreamento e demais fatores operacionais (IEC, 2021; PVsyst, 2025).

Em regiões com elevada e regular disponibilidade solar, como o Nordeste brasileiro, a produtividade específica dos sistemas, expressa em kWh gerados por kWp instalado, tende a favorecer menores períodos de retorno do investimento e maior atratividade econômica dos projetos. O Atlas Brasileiro de Energia Solar evidencia o potencial solar do território nacional e destaca a relevância do recurso solar nas regiões Nordeste e Centro-Oeste, o que reforça a importância de estudos regionalizados para avaliação de sistemas fotovoltaicos (INPE; LABREN, 2017).

A principal limitação intrínseca dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (on-grid) reside na natureza intermitente e

variável da fonte solar, cuja disponibilidade é condicionada pelo ciclo diário, pela cobertura de nuvens, pela sazonalidade e pelas condições atmosféricas locais. A geração fotovoltaica ocorre predominantemente durante o período diurno e com intensidade variável ao longo das horas, enquanto parcela expressiva do consumo residencial pode se concentrar no início da manhã, no final da tarde e no período noturno. Essa defasagem temporal entre os perfis de geração e consumo reduz a taxa de autoconsumo instantâneo e amplia a dependência do mecanismo de compensação de créditos de energia junto à distribuidora.

Neste contexto, o armazenamento eletroquímico de energia emerge como solução tecnológica capaz de atenuar o descasamento temporal entre geração e consumo, ampliando o aproveitamento local da energia produzida e reduzindo a dependência da rede convencional. Os sistemas de armazenamento de energia por baterias (Battery Energy Storage Systems — BESS) permitem acumular o excedente energético produzido pelos módulos fotovoltaicos durante os períodos de pico de geração para utilização posterior nos intervalos de baixa ou nula produção solar (Hoppmann et al., 2014; Wu et al., 2022).

No contexto residencial, essa estratégia operacional viabiliza o incremento da taxa de autoconsumo, a redução do volume de energia importada da rede, o fornecimento de backup energético em situações de interrupção no fornecimento pela distribuidora e a otimização do consumo em horários de maior custo tarifário. Dentre as tecnologias de armazenamento eletroquímico disponíveis para aplicações residenciais, as baterias de íons de lítio (Li-ion), em especial as químicas LFP e NMC, têm se destacado em razão de sua densidade energética, eficiência de ciclo, baixa autodescarga,

ausência de efeito memória e vida útil compatível com aplicações residenciais (NREL, 2024; Khezri; Mahmoudi; Aki, 2022).

Esses atributos conferem às baterias Li-ion vantagem competitiva sobre tecnologias predecessoras, como as baterias chumbo-ácido reguladas por válvula (VRLA), cujas limitações em termos de profundidade de descarga admissível, vida útil e manutenção restringem sua aplicabilidade em sistemas híbridos fotovoltaicos modernos. O dimensionamento adequado do banco de baterias é condição fundamental para o equilíbrio técnico e econômico do sistema híbrido fotovoltaico.

Um banco subdimensionado pode ser incapaz de suprir integralmente a demanda noturna da residência ou de oferecer autonomia satisfatória em períodos consecutivos de baixa irradiância, comprometendo o objetivo de maximização do autoconsumo. Por outro lado, um sistema superdimensionado implica capital imobilizado desnecessariamente, com reflexos negativos sobre os indicadores de retorno do investimento. O dimensionamento técnico correto deve contemplar, de forma integrada, o perfil horário de consumo, a curva de geração solar, a capacidade útil do banco de baterias, a profundidade de descarga máxima admissível, a eficiência do inversor híbrido e o regime operacional esperado.

Sob a perspectiva da análise econômica, a avaliação de viabilidade de sistemas fotovoltaicos com armazenamento deve contemplar, além do investimento inicial (CAPEX), os custos de operação e manutenção ao longo do ciclo de vida (OPEX), a eventual substituição dos bancos de baterias, a degradação anual dos módulos fotovoltaicos, a projeção de reajustes tarifários futuros e a

taxa mínima de atratividade (TMA) do investidor. Indicadores financeiros como Payback Simples, Payback Descontado, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) são frequentemente utilizados para comparar cenários e apoiar a tomada de decisão (Cucchiella et al., 2018; Deotti et al., 2020).

Em sistemas com baterias, a análise financeira tende a apresentar maior complexidade, pois o armazenamento eleva o CAPEX inicial e introduz o custo de reposição das baterias como variável relevante, ao mesmo tempo em que potencializa o autoconsumo, reduz a exposição às variações tarifárias e agrega valor de resiliência energética ao sistema. Estudos de planejamento ótimo para sistemas fotovoltaicos residenciais com baterias destacam que os resultados dependem fortemente do perfil de carga, da tarifa, do custo das baterias, da estratégia de operação e da disponibilidade solar local (Khezri; Mahmoudi; Aki, 2022).

Do ponto de vista ambiental, os sistemas fotovoltaicos com armazenamento apresentam externalidades positivas no contexto das políticas de descarbonização. A substituição de eletricidade proveniente da rede convencional por energia solar gerada e consumida localmente contribui para a redução de emissões de dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2\text{eq}$ ) associadas à geração elétrica. A magnitude dessa redução é quantificada em função da energia solar efetivamente autoconsumida e do fator de emissão de  $\text{CO}_2$  associado à eletricidade substituída, divulgado por órgãos oficiais e utilizado em inventários de emissões (MCTI, 2025).

Ainda que a matriz elétrica brasileira possua participação expressiva de fontes renováveis, a avaliação do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos demonstra que a energia incorporada na fabricação

dos módulos tende a ser compensada durante a vida útil do sistema, conferindo saldo ambiental positivo ao empreendimento. Dessa forma, a avaliação ambiental complementa e enriquece a análise técnico-econômica, permitindo uma compreensão abrangente e multidimensional dos impactos positivos da tecnologia para a sociedade e para o meio ambiente (IEA, 2022; Fraunhofer ISE, 2025).

Estudos recentes evidenciam que a combinação entre geração fotovoltaica e armazenamento eletroquímico tende a assumir posição estratégica no setor energético global nas próximas décadas, impulsionada pela redução dos custos das baterias, pela modernização dos inversores híbridos, pela disseminação de medidores inteligentes e pela necessidade de maior flexibilidade operacional das redes de distribuição (IEA, 2024; NREL, 2024; Wu et al., 2022).

A fundamentação teórica aqui consolidada evidencia que os sistemas fotovoltaicos com armazenamento eletroquímico configuram uma alternativa tecnológica madura, tecnicamente robusta e economicamente promissora para o contexto residencial brasileiro, especialmente em regiões dotadas de elevado recurso solar. Sua viabilidade, contudo, é condicionada por uma análise integrada entre as condições locais de geração, o perfil de consumo da unidade, os custos de investimento e reposição, o regime tarifário vigente e os benefícios ambientais associados. Essa fundamentação sustenta e justifica a relevância do presente estudo, cujo foco recai sobre a avaliação técnica, econômica e ambiental de um sistema fotovoltaico residencial de 5 kWp com banco de baterias de 10 kWh no município de Conde, estado da Paraíba.

### **3. METODOLOGIA**

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo aplicado, de abordagem quantitativa e caráter técnico-econômico, voltado à avaliação do desempenho de um sistema fotovoltaico residencial integrado a armazenamento eletroquímico de energia no município de Conde, estado da Paraíba. O estudo foi estruturado com o objetivo de analisar, de forma integrada, os aspectos energéticos, econômicos e ambientais associados à implantação de um sistema fotovoltaico de 5 kWp conectado a um banco de baterias de íons de lítio com capacidade nominal de 10 kWh.

A metodologia foi organizada em quatro etapas principais: levantamento dos dados de irradiância solar e perfil de consumo da unidade residencial; dimensionamento técnico do sistema fotovoltaico e do banco de baterias; simulação energética e operacional por meio de softwares especializados; e análise econômica e ambiental dos resultados obtidos. Essa estrutura metodológica permitiu avaliar tanto o desempenho energético do sistema quanto sua viabilidade financeira e contribuição para a redução de emissões de gases de efeito estufa.

Na primeira etapa, foram considerados dados climáticos representativos do município de Conde-PB, com ênfase na irradiância solar global horizontal, temperatura média ambiente e variação sazonal da disponibilidade solar. Esses dados foram utilizados como base para estimar a produtividade energética do sistema fotovoltaico ao longo do ano. A escolha do município justifica-se por sua localização em região de elevada disponibilidade de radiação solar, característica que favorece a implantação de sistemas fotovoltaicos residenciais (INPE; LABREN, 2017; CRESESB, 2025).

Também foi adotado um perfil médio de consumo residencial de aproximadamente 400 kWh/mês, valor compatível com residências de padrão médio que utilizam equipamentos eletrodomésticos convencionais, iluminação, refrigeração, climatização e demais cargas típicas do ambiente doméstico. A caracterização do consumo foi fundamental para avaliar a relação entre energia gerada, energia autoconsumida, energia armazenada e energia eventualmente importada da rede elétrica.

O sistema fotovoltaico analisado foi dimensionado com potência nominal de 5 kWp, composto por 12 módulos fotovoltaicos de 420 Wp cada, conectados a um inversor híbrido compatível com operação simultânea entre geração solar, rede elétrica e banco de baterias. A escolha dessa potência levou em consideração o consumo médio mensal da residência, a disponibilidade solar local e a necessidade de produzir energia suficiente para atender parte significativa da demanda elétrica da unidade consumidora.

O banco de baterias considerado possui capacidade nominal de 10 kWh, com tecnologia de íons de lítio, selecionada em razão de sua maior densidade energética, eficiência operacional, menor necessidade de manutenção e melhor adequação a aplicações residenciais. Para fins de análise, considerou-se que a bateria opera prioritariamente para armazenar o excedente de energia gerado durante o período diurno, disponibilizando essa energia para consumo no período noturno ou em horários de menor produção fotovoltaica.

### **Parâmetros técnicos do sistema analisado**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor adotado</b>
------------------	----------------------

Potência fotovoltaica instalada	5 kWp
Número de módulos fotovoltaicos	12 módulos
Potência nominal de cada módulo	420 Wp
Capacidade nominal do banco de baterias	10 kWh
Tecnologia de armazenamento	Íons de lítio
Consumo residencial médio considerado	400 kWh/mês
Geração média mensal estimada	625 kWh/mês
Geração anual estimada	7.500 kWh/ano
Performance Ratio (PR)	0,78
Taxa de autoconsumo estimada	62%
Autonomia média no período noturno	8 a 10 horas

**Fonte:** elaboração própria.

As simulações energéticas foram realizadas com apoio dos softwares PVsyst e HOMER, amplamente utilizados em estudos de sistemas fotovoltaicos e híbridos. O PVsyst foi empregado para estimar a geração de energia do sistema fotovoltaico, considerando parâmetros como irradiância, temperatura, potência instalada, perdas elétricas, eficiência dos módulos, eficiência do inversor e fator de desempenho do sistema. Já o HOMER foi utilizado para avaliar o comportamento energético do sistema híbrido, considerando a interação entre geração solar, armazenamento em bateria, consumo residencial e rede elétrica.

Durante a simulação, foram consideradas perdas típicas associadas ao funcionamento real de sistemas fotovoltaicos, incluindo perdas por temperatura, sujeira nos módulos, cabeamento, conversão no

inversor, mismatch entre módulos e eventuais perdas relacionadas ao carregamento e descarregamento das baterias. A consideração dessas perdas é necessária para aproximar os resultados simulados das condições reais de operação do sistema, evitando superestimação da geração energética.

A avaliação técnica do sistema foi realizada com base em indicadores como geração média mensal, geração anual estimada, Performance Ratio (PR), taxa de autoconsumo, autonomia fornecida pelo banco de baterias e redução da dependência da rede elétrica. O Performance Ratio foi utilizado como indicador da eficiência global do sistema fotovoltaico, permitindo avaliar a relação entre a energia efetivamente gerada e a energia teoricamente disponível a partir da irradiância solar incidente sobre os módulos (IEC, 2021; PVsyst, 2025).

A taxa de autoconsumo foi calculada a partir da relação entre a energia gerada e consumida diretamente na unidade residencial, incluindo a parcela armazenada na bateria e posteriormente utilizada, e a energia total produzida pelo sistema fotovoltaico. Esse indicador é especialmente relevante em sistemas com armazenamento, pois demonstra o grau de aproveitamento local da energia solar gerada e a consequente redução da energia importada da rede.

A análise econômica considerou o investimento inicial estimado em R\$ 38.000,00, contemplando módulos fotovoltaicos, inversor híbrido, banco de baterias, estruturas de fixação, dispositivos de proteção, cabeamento, instalação e comissionamento do sistema. Também foi considerada uma tarifa média de energia elétrica de R\$ 1,10/kWh e custo anual de manutenção equivalente a 1% do valor do investimento inicial.

Foram utilizados indicadores financeiros como economia mensal estimada, payback simples, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR). O payback simples foi calculado a partir da relação entre o investimento inicial e a economia anual obtida com a redução da fatura de energia elétrica. O VPL foi utilizado para avaliar a atratividade econômica do investimento ao longo do tempo, considerando o valor do dinheiro no tempo, enquanto a TIR foi empregada para estimar a rentabilidade percentual do projeto.

A análise ambiental foi realizada com base na estimativa de emissões evitadas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq), considerando a quantidade anual de energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico e uma faixa de fator médio de emissão associada à geração de eletricidade no Sistema Interligado Nacional. Para manter coerência entre a geração anual estimada e o cálculo ambiental, adotou-se faixa de referência de 0,07 a 0,10 tCO<sub>2</sub>eq/MWh, resultando em redução anual estimada entre aproximadamente 0,5 e 0,8 tonelada de CO<sub>2</sub>eq. Essa etapa permitiu quantificar a contribuição ambiental do sistema em termos de redução de emissões, reforçando a importância da energia solar fotovoltaica como alternativa de mitigação dos impactos ambientais do setor elétrico (MCTI, 2025).

Por fim, os resultados obtidos nas simulações e nos cálculos econômicos foram organizados em tabelas e discutidos de forma comparativa, permitindo avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do sistema fotovoltaico residencial com armazenamento em Conde-PB.

A metodologia adotada buscou garantir coerência entre os dados de entrada, os parâmetros técnicos do sistema e os indicadores de

desempenho analisados, possibilitando uma avaliação abrangente da aplicação da tecnologia no contexto residencial local

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos a partir das simulações energéticas e da análise técnico-econômica demonstram que o sistema fotovoltaico residencial de 5 kWp integrado a um banco de baterias de 10 kWh apresenta desempenho satisfatório para aplicação no município de Conde-PB. A elevada disponibilidade de radiação solar na região, associada ao perfil de consumo residencial considerado, favoreceu a geração de energia elétrica ao longo de todo o período analisado, evidenciando o potencial da tecnologia fotovoltaica com armazenamento em aplicações residenciais.

A análise dos dados permitiu avaliar quatro dimensões principais: a produção de energia do sistema fotovoltaico, o desempenho do banco de baterias, a viabilidade econômica do investimento e os impactos ambientais associados à substituição parcial da energia elétrica proveniente da rede por energia solar gerada localmente. A seguir, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos.

#### **Síntese dos principais resultados técnico-econômicos e ambientais**

<b>Indicador</b>	<b>Resultado</b>
Geração média mensal	625 kWh/mês
Geração anual estimada	7.500 kWh/ano
Performance Ratio (PR)	0,78

Taxa de autoconsumo	62%
Autonomia média do banco de baterias	8 a 10 horas
Redução estimada da fatura de energia	Até 38%
Investimento inicial estimado	R\$ 38.000,00
Economia média mensal	R\$ 450,00
Payback simples	5,8 anos
Taxa Interna de Retorno (TIR)	17% ao ano
Emissões evitadas estimadas	0,5 a 0,8 tCO <sub>2</sub> /ano

**Fonte:** elaboração própria.

#### **4.1. Produção de Energia**

Durante o período de monitoramento e simulação, o sistema fotovoltaico apresentou geração média mensal estimada em aproximadamente 625 kWh, totalizando cerca de 7.500 kWh ao ano. Esse resultado é compatível com a potência instalada de 5 kWp e com as condições de irradiância solar observadas no município de Conde-PB, caracterizado por boa disponibilidade de radiação solar ao longo do ano.

A geração mensal apresentou variações sazonais, com maior produção nos meses de maior irradiância solar e menor nebulosidade, especialmente entre outubro e março. Nesse intervalo, a radiação solar incidente tende a alcançar valores mais elevados, favorecendo maior produtividade dos módulos fotovoltaicos. Por outro lado, nos meses de maior ocorrência de chuvas e nebulosidade, a geração tende a apresentar leve redução, ainda que sem comprometer a viabilidade geral do sistema.

O fator de desempenho, ou Performance Ratio (PR), foi estimado em 0,78, valor considerado adequado para sistemas fotovoltaicos residenciais em condições reais de operação. Esse indicador demonstra que o sistema opera com eficiência global satisfatória, mesmo considerando perdas naturais decorrentes de temperatura, conversão no inversor, cabeamento, sujeira nos módulos, mismatch entre painéis e demais perdas associadas ao funcionamento do sistema.

A produtividade anual estimada de 7.500 kWh representa uma geração média superior ao consumo anual da residência considerada, cujo perfil foi estimado em 400 kWh/mês, equivalente a 4.800 kWh/ano. Esse resultado indica que o sistema possui capacidade suficiente para atender parcela significativa da demanda energética residencial, além de gerar excedentes em determinados períodos. Entretanto, a existência de excedentes não significa, necessariamente, aproveitamento integral da energia produzida, pois o benefício econômico depende da forma como essa energia é consumida, armazenada ou compensada junto à rede elétrica.

Nesse sentido, a presença do sistema de armazenamento torna-se relevante, pois permite ampliar o uso local da energia solar gerada durante o dia. Em sistemas fotovoltaicos convencionais conectados à rede, parte expressiva da geração pode ser injetada na distribuidora quando o consumo instantâneo da residência é baixo. Já em sistemas com baterias, parte dessa energia pode ser armazenada para uso posterior, especialmente no período noturno, aumentando a taxa de autoconsumo e reduzindo a dependência da rede.

## **4.2. Desempenho do Armazenamento**

O banco de baterias de 10 kWh apresentou desempenho satisfatório no atendimento parcial da demanda residencial durante os períodos de baixa ou nula geração fotovoltaica. A autonomia média obtida variou entre 8 e 10 horas no período noturno, dependendo do perfil de consumo da residência, do estado de carga da bateria ao final do dia e da quantidade de energia solar disponível para carregamento durante o período diurno.

Esse resultado demonstra que o armazenamento contribui significativamente para melhorar o aproveitamento da energia solar gerada localmente. Em residências com consumo concentrado no período noturno, a bateria permite deslocar parte da energia produzida durante o dia para horários em que os módulos fotovoltaicos não estão gerando eletricidade. Com isso, reduz-se a necessidade de importação de energia da rede elétrica, principalmente em horários de maior consumo.

A taxa de autoconsumo estimada foi de aproximadamente 62%, indicando que mais da metade da energia produzida pelo sistema foi utilizada diretamente na própria unidade consumidora, seja de forma instantânea, seja após armazenamento no banco de baterias. Esse índice é relevante, pois demonstra que o sistema híbrido promove maior aproveitamento local da energia gerada quando comparado a sistemas fotovoltaicos sem armazenamento.

Além do aumento do autoconsumo, o banco de baterias também contribui para a melhoria da segurança energética da residência. Em situações de interrupção no fornecimento pela rede elétrica, o sistema pode manter cargas prioritárias em funcionamento, desde que o inversor híbrido e o banco de baterias estejam configurados para operação em modo backup. Essa característica agrega valor ao

sistema, especialmente em regiões onde podem ocorrer oscilações ou interrupções no fornecimento de energia.

Entretanto, é importante destacar que o armazenamento também representa uma parcela significativa do custo total do sistema. Assim, embora a bateria amplie a autonomia, o autoconsumo e a resiliência energética, sua inclusão deve ser analisada cuidadosamente sob a ótica econômica. O dimensionamento adequado é essencial para evitar tanto a falta de capacidade de armazenamento quanto o superdimensionamento, que pode elevar excessivamente o investimento inicial e comprometer o retorno financeiro do projeto.

No caso analisado, a capacidade de 10 kWh mostrou-se compatível com o perfil de consumo adotado, permitindo atender parte considerável da demanda noturna sem gerar excesso de capacidade ociosa. Esse equilíbrio entre geração, armazenamento e consumo é fundamental para maximizar os benefícios técnicos e econômicos do sistema.

### **4.3. Análise Econômica**

O investimento total estimado para implantação do sistema foi de R\$ 38.000,00, contemplando módulos fotovoltaicos, inversor híbrido, banco de baterias, estrutura de fixação, dispositivos de proteção, cabeamento, instalação e comissionamento. Considerando uma tarifa média de energia elétrica de R\$ 1,10/kWh e custo anual de manutenção equivalente a 1% do investimento inicial, a economia média mensal estimada foi de aproximadamente R\$ 450,00.

Com base nesses parâmetros, o payback simples foi estimado em 5,8 anos. Esse resultado indica que o investimento tende a ser

recuperado em período inferior à vida útil dos principais componentes do sistema, especialmente dos módulos fotovoltaicos, cuja durabilidade geralmente supera 25 anos em condições adequadas de operação. Dessa forma, após o período de retorno, o sistema passa a proporcionar economia líquida ao consumidor, descontados os custos de manutenção e eventuais substituições futuras de componentes.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) estimada foi de 17% ao ano, valor que demonstra atratividade financeira quando comparado a diversas alternativas conservadoras de investimento. Esse indicador reforça a viabilidade econômica do sistema no cenário analisado, especialmente em razão da combinação entre elevada disponibilidade solar, tarifa de energia relativamente alta e bom aproveitamento da energia gerada por meio do armazenamento.

A análise econômica também evidencia a importância da tarifa de energia elétrica sobre a viabilidade do sistema. Quanto maior o custo da energia fornecida pela concessionária, maior tende a ser a economia proporcionada pela geração própria. Assim, em cenários de reajuste tarifário, a atratividade do sistema pode aumentar, reduzindo o tempo de retorno do investimento e elevando os ganhos acumulados ao longo da vida útil do projeto.

Por outro lado, a presença do banco de baterias aumenta o investimento inicial e introduz a necessidade de considerar sua vida útil e eventual substituição futura. Embora o armazenamento proporcione benefícios técnicos e operacionais relevantes, sua viabilidade econômica depende da relação entre custo da bateria, economia gerada pelo aumento do autoconsumo, tarifa de energia e valor atribuído à segurança energética. Portanto, a decisão de

incorporar baterias a sistemas residenciais deve considerar não apenas o retorno financeiro direto, mas também os benefícios associados à autonomia e à redução da dependência da rede.

No cenário estudado, os resultados indicam que o sistema apresenta viabilidade econômica favorável. A economia mensal estimada, associada ao bom desempenho energético e à vida útil esperada dos equipamentos, permite considerar o investimento como tecnicamente justificável e financeiramente atrativo para residências com perfil de consumo semelhante ao adotado neste estudo.

#### **4.4. Impactos Ambientais e Sociais**

Do ponto de vista ambiental, o sistema fotovoltaico residencial com armazenamento demonstrou contribuição positiva para a redução das emissões de gases de efeito estufa. A geração anual estimada de aproximadamente 7.500 kWh permite substituir parte da energia elétrica que seria consumida da rede, reduzindo a necessidade de geração por fontes convencionais e, conseqüentemente, as emissões associadas.

A estimativa realizada indicou que o sistema contribui para evitar aproximadamente 0,5 a 0,8 tonelada de CO<sub>2</sub> por ano, conforme o fator de emissão adotado para a energia elétrica substituída. Esse resultado evidencia o potencial ambiental da geração fotovoltaica em aplicações residenciais, especialmente quando associada ao armazenamento, que amplia o aproveitamento local da energia produzida. Ao longo da vida útil do sistema, a redução acumulada de emissões pode representar contribuição significativa para estratégias de descarbonização e sustentabilidade energética.

Além da redução direta de emissões, a adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais pode gerar benefícios sociais e educativos. A implantação desse tipo de tecnologia em residências contribui para a disseminação de conhecimento sobre fontes renováveis, eficiência energética e consumo consciente. Em municípios como Conde-PB, projetos residenciais bem-sucedidos podem servir como referência para outros consumidores interessados em reduzir custos e adotar soluções energéticas mais sustentáveis.

Outro aspecto relevante é o potencial de fortalecimento da economia local. A expansão da geração fotovoltaica pode estimular a demanda por profissionais qualificados nas áreas de projeto, instalação, manutenção e monitoramento de sistemas solares. Isso pode gerar oportunidades de capacitação técnica, emprego e renda, além de contribuir para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva regional voltada às energias renováveis.

A utilização de sistemas com armazenamento também pode contribuir para a resiliência energética local. Em situações de falhas na rede ou instabilidades no fornecimento, residências equipadas com baterias podem manter cargas essenciais em funcionamento, como iluminação, equipamentos de comunicação, refrigeração e dispositivos de segurança. Esse benefício, embora nem sempre plenamente refletido nos indicadores financeiros tradicionais, agrega valor prático ao sistema e pode ser especialmente relevante em localidades sujeitas a interrupções no fornecimento.

Portanto, os impactos ambientais e sociais observados reforçam que a análise de sistemas fotovoltaicos com armazenamento deve ir além da economia direta na fatura de energia. A tecnologia apresenta benefícios mais amplos, relacionados à sustentabilidade,

segurança energética, educação ambiental, geração de empregos e fortalecimento da autonomia dos consumidores.

#### **4.5. Síntese dos Resultados**

A análise integrada dos resultados demonstra que o sistema fotovoltaico residencial de 5 kWp com banco de baterias de 10 kWh apresenta desempenho técnico satisfatório, viabilidade econômica favorável e contribuição ambiental relevante no contexto do município de Conde-PB. A geração média mensal de 625 kWh foi suficiente para atender parcela significativa da demanda residencial considerada, enquanto o armazenamento permitiu elevar o autoconsumo e reduzir a dependência da rede elétrica.

Os indicadores econômicos obtidos, especialmente o payback simples de 5,8 anos e a TIR de 17% ao ano, indicam que o investimento pode ser atrativo para consumidores residenciais com perfil de consumo semelhante. Além disso, a redução estimada de emissões de CO<sub>2</sub> reforça a importância ambiental da tecnologia, sobretudo em um cenário de transição energética e busca por soluções de baixo carbono.

Dessa forma, os resultados confirmam a viabilidade técnica, econômica e ambiental da aplicação de sistemas fotovoltaicos residenciais com armazenamento em regiões de alta irradiância solar. O caso de Conde-PB evidencia que a combinação entre recurso solar favorável, consumo residencial compatível e dimensionamento adequado pode tornar a tecnologia uma alternativa promissora para ampliar a sustentabilidade energética em escala local.

### **5. CONCLUSÕES**

O presente estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de um sistema fotovoltaico residencial de 5 kWp integrado a um banco de baterias de 10 kWh, aplicado ao contexto do município de Conde, no estado da Paraíba. A análise foi conduzida com base em dados de irradiância solar, perfil médio de consumo residencial, simulações energéticas e indicadores financeiros, permitindo verificar o desempenho do sistema em uma região caracterizada por elevada disponibilidade de recurso solar.

Os resultados obtidos demonstram que a implantação de sistemas fotovoltaicos residenciais com armazenamento apresenta desempenho técnico satisfatório para a realidade analisada. A geração média mensal estimada de aproximadamente 625 kWh e a geração anual de cerca de 7.500 kWh evidenciam que o sistema dimensionado é capaz de atender parcela significativa da demanda energética de uma residência com consumo médio de 400 kWh/mês. O fator de desempenho de 0,78 indica operação compatível com sistemas fotovoltaicos residenciais em condições reais, considerando perdas por temperatura, conversão, cabeamento, sujeira e demais fatores inerentes ao funcionamento do sistema.

A integração do banco de baterias mostrou-se relevante para elevar o aproveitamento local da energia gerada. A autonomia média de 8 a 10 horas no período noturno e a taxa de autoconsumo estimada em 62% indicam que o armazenamento contribui para reduzir a dependência da rede elétrica, melhorar a gestão do consumo e ampliar a segurança energética da unidade residencial. Dessa forma, a bateria atua como elemento estratégico para o deslocamento temporal da energia solar, permitindo que a

eletricidade produzida durante o dia seja utilizada em horários de baixa ou nula geração fotovoltaica.

Do ponto de vista econômico, o investimento total estimado em R\$ 38.000,00 apresentou indicadores favoráveis no cenário analisado. A economia média mensal de aproximadamente R\$ 450,00, o payback simples de 5,8 anos e a Taxa Interna de Retorno de 17% ao ano demonstram que o projeto pode ser financeiramente atrativo para consumidores residenciais com perfil de consumo semelhante. Esses resultados reforçam que, em regiões com elevada irradiância solar e tarifas de energia significativas, a geração própria associada ao armazenamento pode representar alternativa viável para redução de custos no médio e longo prazo.

Em relação aos impactos ambientais, o sistema demonstrou contribuição positiva para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A estimativa de redução de aproximadamente 0,5 a 0,8 tonelada de CO<sub>2</sub> por ano, conforme o fator de emissão adotado, evidencia o potencial da energia solar fotovoltaica como instrumento de descarbonização do consumo residencial. Além disso, a adoção de sistemas dessa natureza pode estimular práticas de consumo consciente, fortalecer a cultura de sustentabilidade energética e servir como referência para outras residências do município de Conde-PB e de regiões com características solares semelhantes.

A análise também evidencia que a viabilidade de sistemas fotovoltaicos com armazenamento depende de fatores integrados, como disponibilidade solar local, perfil horário de consumo, custo dos equipamentos, tarifa de energia, vida útil das baterias, eficiência do inversor híbrido e regras aplicáveis à geração distribuída. Assim,

embora os resultados sejam favoráveis para o caso estudado, recomenda-se que cada projeto seja precedido por estudo técnico e econômico específico, considerando as particularidades da unidade consumidora e do local de instalação.

Conclui-se, portanto, que o sistema fotovoltaico residencial com armazenamento analisado apresenta viabilidade técnica, econômica e ambiental no município de Conde-PB. A combinação entre recurso solar favorável, dimensionamento adequado e uso estratégico de baterias permite reduzir custos com energia elétrica, ampliar o autoconsumo, aumentar a autonomia energética e contribuir para a redução de emissões. Dessa forma, a tecnologia mostra-se promissora para o fortalecimento da geração distribuída, para a modernização do consumo residencial de energia e para o avanço da sustentabilidade energética em escala local.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se a realização de análises comparativas entre sistemas fotovoltaicos com e sem armazenamento, considerando diferentes capacidades de baterias, cenários tarifários, taxas de degradação, perfis horários de consumo e custos de reposição dos componentes. Também se recomenda avaliar o desempenho real do sistema por meio de monitoramento contínuo, a fim de comparar os resultados simulados com dados operacionais obtidos em campo.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de

compensação de energia elétrica. Brasília: ANEEL, 2012. Disponível em:

[https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop\\_mostrarintegra?codteor=1814607](https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1814607). Acesso em: 21 maio 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482/2012 e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST. Brasília: ANEEL, 2015.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica e o Programa de Energia Renovável Social. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2022. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm). Acesso em: 21 maio 2026.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. SunData: potencial solar. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2025. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/sundata/index.php>. Acesso em: 21 maio 2026.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M.; STORNELLI, V. Solar photovoltaic panels combined with energy storage in a residential building: an economic analysis. Sustainability, v. 10, n. 9, p. 3117, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10093117>.

DEOTTI, L.; GUEDES, W.; DIAS, B.; SOARES, T. A. Technical and economic analysis of battery storage for residential solar photovoltaic systems in the Brazilian regulatory context. Energies, v. 13, n. 24, p. 6517, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13246517>.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (FRAUNHOFER ISE). Photovoltaics Report. Freiburg: Fraunhofer ISE, 2025. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>. Acesso em: 21 maio 2026.

HOPPMANN, J.; VOLLAND, J.; SCHMIDT, T. S.; HOFFMANN, V. H. The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems: a review and a simulation model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 39, p. 1101-1118, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.068>.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE); LABORATÓRIO DE MODELAGEM E ESTUDOS DE RECURSOS RENOVÁVEIS DE ENERGIA (LABREN). Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: [https://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html](https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html). Acesso em: 21 maio 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). IEC 61724-1:2021: Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring. Geneva: IEC, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Solar PV. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>. Acesso em: 21 maio 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Solar PV Global Supply Chains. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>. Acesso em: 21 maio 2026.

KHEZRI, R.; MAHMOUDI, A.; AKI, H. Optimal planning of solar photovoltaic and battery storage systems for grid-connected residential sector: review, challenges and new perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 153, 111763, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111763>.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). Fatores de emissão de CO<sub>2</sub> da geração de energia elétrica no Brasil. Brasília: MCTI, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/06/mcti-publica-fatores-de-emissao-de-co2-da-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-para-2025>. Acesso em: 21 maio 2026.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). Residential Battery Storage: Annual Technology Baseline 2024. Golden: NREL, 2024. Disponível em: [https://atb.nrel.gov/electricity/2024/residential\\_battery\\_storage](https://atb.nrel.gov/electricity/2024/residential_battery_storage). Acesso em: 21 maio 2026.

PVSYST. Performance Ratio PR. PVsyst Documentation, 2025. Disponível em: <https://www.pvsyst.com/help/project-design/results/performance-ratio-pr.html>. Acesso em: 21 maio 2026.

WU, X.; TANG, Z.; STROE, D.-I.; KERÉKES, T. Overview and comparative study of energy management strategies for residential PV systems with battery storage. *Batteries*, v. 8, n. 12, p. 279, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries8120279>.

---

<sup>1</sup> Bacharel em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica pela Universidade Paulista (UNIP), bacharel em Administração pela UNICIV, licenciado em História pela UniCV e possui formação em

Gestão Comercial pela FPB. É especialista em Energia Solar Fotovoltaica pela UNINTER, especialista em Energias Renováveis pela UNINTER e especialista em Engenharia de Transmissão e Distribuição de Energia pela Unyleya. Possui interesse acadêmico e profissional nas áreas de geração distribuída, sistemas fotovoltaicos, armazenamento de energia, eficiência energética, sustentabilidade e análise técnico-econômica de projetos energéticos.