
VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA INTEGRAÇÃO FV-BESS: UMA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE POTÊNCIA E RETORNO FINANCEIRO EM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Vinicius de Moraes¹, Daniel Amorim², Pedro Barreto³, Luiz Bonifácio⁴, Lucas Belentani⁵, Fabio Milanez⁶

RESUMO

O crescimento da geração fotovoltaica tem contribuído significativamente para a transição energética, porém sua natureza intermitente impõe desafios relacionados à estabilidade e à confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Nesse contexto, os Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) surgem como uma alternativa capaz de mitigar oscilações de potência, ampliar a flexibilidade operacional e otimizar o aproveitamento da energia renovável. Este trabalho analisa a integração entre sistemas fotovoltaicos e BESS sob os aspectos técnicos e econômicos, destacando os principais componentes do sistema, estratégias de controle, qualidade de energia e aplicações voltadas à estabilidade de potência. Como estudo de caso, foi considerada uma residência com demanda instalada de 44.676 W, utilizando parâmetros de mercado para estimar custos de implantação, operação e substituição do sistema. A viabilidade econômica foi avaliada por meio dos indicadores Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback Descontado. Os resultados demonstraram um investimento inicial de R\$ 80.000,00, com fluxo de caixa líquido anual de R\$ 11.240,00, resultando em VPL positivo de R\$ 6.053,84 e TIR de 11,12%, superior à taxa de desconto adotada de 10% ao ano. O payback descontado foi alcançado no décimo sétimo ano de operação, mesmo considerando a necessidade de retrofit do sistema de armazenamento no décimo ano. Conclui-se que a integração FV-BESS apresenta viabilidade técnica e econômica para aplicações residenciais de elevada demanda, além de contribuir para a estabilidade energética, qualidade da energia elétrica e fortalecimento da geração distribuída no contexto da transição energética.

Palavras-chave:

BESS; energia fotovoltaica; armazenamento de energia; viabilidade econômica; estabilidade de potência; geração distribuída.

¹ Centro Universitário UniSenaiPR; e-mail: vinidemoraesreis@gmail.com

² Centro Universitário UniSenaiPR; e-mail: danielamorimlima5@gmail.com

³ Centro Universitário UniSenaiPR; e-mail: pedrobarreto2612@gmail.com

⁴ Centro Universitário UniSenaiPR; e-mail: lfb.bonifacio@gmail.com

⁵ Centro Universitário UniSenaiPR; e-mail: lucassbelentani@gmail.com

⁶ Centro Universitário UniSenaiPR; e-mail: fabio.milanez@sistemafiep.org.br

Technical and Economic Feasibility of PV-BESS Integration: An Analysis of Power Stability and Financial Return in Distributed Generation

ABSTRACT

The expansion of photovoltaic generation has played a significant role in the energy transition; however, its intermittent nature poses challenges related to power stability and reliability of electricity supply. In this context, Battery Energy Storage Systems (BESS) emerge as an effective solution to mitigate power fluctuations, increase operational flexibility, and optimize the use of renewable energy sources. This study analyzes the integration of photovoltaic systems with BESS from both technical and economic perspectives, highlighting the main system components, control strategies, power quality aspects, and applications aimed at power stability. As a case study, a residential installation with an installed demand of 44.676 W was considered, using market-based parameters to estimate implementation, operation, and replacement costs. Economic feasibility was assessed through Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Discounted Payback indicators. The results showed an initial investment of R\$ 80,000.00 and an annual net cash flow of R\$ 11,240.00, resulting in a positive NPV of R\$ 6,053.84 and an IRR of 11.12%, exceeding the adopted discount rate of 10% per year. The discounted payback period was achieved in the seventeenth year of operation, even considering the battery system retrofit required in the tenth year. It is concluded that the integration of photovoltaic generation and BESS is technically and economically feasible for high-demand residential applications, while also contributing to energy stability, power quality improvement, and the advancement of distributed generation within the energy transition framework.

Key-words: BESS; photovoltaic energy; energy storage; economic feasibility; power stability; distributed generation.

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética global atravessa um período de transição acelerada, impulsionada pela necessidade de descarbonização e pela crescente viabilidade econômica das fontes renováveis. Nesse cenário, a geração fotovoltaica (FV) consolidou-se como um dos principais pilares da transição energética, com o Brasil atingindo a marca histórica de 52,2 GW de capacidade instalada no início de 2025 (REVISTA FATOR BRASIL, 2026). Entretanto, a natureza intermitente e variável da radiação solar impõe desafios significativos à estabilidade e à confiabilidade das redes elétricas, evidenciados pelo aumento de intervenções para corte de geração renovável devido à sobrecarga de oferta em períodos de baixa demanda (CLICK PETRÓLEO E GÁS, 2026).

Para mitigar essas limitações, os Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (Battery Energy Storage Systems - BESS) surgem como uma solução tecnológica estratégica. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2024), o BESS atua como um recurso energético distribuído capaz de operar de forma coordenada, permitindo a suavização de rampas de potência e a oferta de serviços ancilares, como regulação de frequência e tensão. Em contextos de microrredes, a integração BESS-FV possibilita a gestão inteligente através de estratégias como o peak shaving e a arbitragem tarifária, transformando unidades consumidoras em fontes de potência previsíveis (ADVANCES IN BATTERY ENERGY STORAGE MANAGEMENT, 2026).

No entanto, a implementação desses sistemas ainda enfrenta barreiras, embora o cenário econômico tenha se tornado mais favorável. Projeções indicam que o custo das baterias LFP deve cair para aproximadamente US\$ 240/kWh até 2035, enquanto tecnologias emergentes como íons de sódio podem atingir US\$ 180/kWh no mesmo período (EPE, 2024). No Brasil, a recente Lei 15.269/2025 reconheceu oficialmente o armazenamento como infraestrutura estratégica, pavimentando o caminho para novos modelos de receita (revenue stacking) que combinam economia

direta na conta de luz com a remuneração por suporte à rede (REVISTA FATOR BRASIL, 2026).

Torna-se fundamental, portanto, analisar a viabilidade técnica e econômica dessas soluções para diferentes perfis de carga residencial, comercial e industrial, garantindo que a transição energética seja acompanhada de previsibilidade financeira e estabilidade operacional.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Sistemas de armazenamento por baterias (BESS): Fundamentos e panorama tecnológico

2.1.1. Definição e Contexto Estratégico:

O Battery Energy Storage System (BESS) é uma solução tecnológica baseada em baterias projetada para armazenar eletricidade e disponibilizá-la conforme a demanda operacional. Recentemente, o armazenamento de energia foi reconhecido no Brasil como infraestrutura estratégica por meio da Lei nº 15.269/2025 (BRASIL, 2025), o que reflete sua importância na transição energética. Segundo a Azzon Energia Solar (2026), o funcionamento do BESS integra células de bateria, sistemas de monitoramento (BMS) e conversão (PCS), permitindo a gestão de energia proveniente da rede ou de fontes renováveis intermitentes.

2.1.2 Componentes Principais do Sistema:

2.1.3 Battery Management System (BMS):

O BMS é o componente crítico para a segurança e longevidade do sistema. Ele realiza o monitoramento contínuo de parâmetros como tensão, corrente e temperatura em cada célula (ADVANCES..., 2026). Sua função primária é evitar sobrecargas, descargas excessivas e superaquecimento, além de realizar o balanceamento das células para garantir a eficiência energética. Em sistemas de

grande escala, o BMS atua no diagnóstico de falhas e manutenção preditiva, mitigando riscos de falhas térmicas.

2.1.4 Células de Bateria:

As células são as unidades fundamentais de armazenamento químico. Atualmente, a tecnologia de Lítio Ferro Fosfato (LFP) predomina em sistemas estacionários devido à estabilidade térmica e longa vida útil (SISTEMAS..., 2026). O mercado brasileiro tem demonstrado uma expansão acelerada, com crescimento de 400% na integração de baterias ao setor solar (CLICK PETRÓLEO E GÁS, 2026). Tendências globais também apontam para o uso de baterias de íon de sódio (Na-ion) para reduzir a dependência de minerais críticos (THE SPANISH..., 2025).

2.1.5 Power Conversion System (PCS):

O PCS atua como um inversor bidirecional, convertendo Corrente Contínua (CC) das baterias em Corrente Alternada (CA) para a rede, e vice-versa. Este componente é vital para a regulação de tensão e estabilidade de frequência (EPE, 2024). Inovações recentes destacam o uso de tecnologia grid-forming em sistemas BESS para reforçar a confiabilidade do suprimento elétrico em regiões isoladas, como o estado do Acre (EPE, 2026; PV MAGAZINE BRASIL, 2026).

2.2 Integração BESS-Fotovoltaica e Estabilidade de Potência

A energia solar fotovoltaica tem se consolidado como uma das fontes mais promissoras de energia renovável, destacando-se por sua disponibilidade abundante, baixo impacto ambiental e crescente viabilidade econômica. No contexto do setor público, os sistemas fotovoltaicos surgem como uma oportunidade estratégica para reduzir os custos com o consumo de energia elétrica, além de promover uma imagem

institucional mais alinhada com práticas sustentáveis. A instalação desses sistemas pode ser realizada sobre coberturas de edificações públicas, estacionamentos ou áreas ociosas, aproveitando ao máximo a irradiação solar disponível.

2.2.1. Captação da Radiação Solar pelos Módulos Fotovoltaicos:

O primeiro estágio do processo de conversão de energia solar ocorre nos módulos fotovoltaicos, que são dispositivos capazes de capturar a radiação solar e convertê-la em energia elétrica em forma de tensão contínua (VDC). Os módulos fotovoltaicos são, normalmente, instalados em telhados ou no solo, de forma a otimizar a captação da luz solar. Cada módulo tem uma potência nominal e uma tensão típica que geralmente variam entre 30 e 50 VDC, dependendo do modelo e das condições de instalação.

Os módulos são conectados entre si, formando strings, ou séries de módulos, que permitem alcançar a tensão e a corrente necessárias para o funcionamento do sistema fotovoltaico. A quantidade de módulos e a maneira como são conectados (em série ou paralelo) são definidas com base nas especificações elétricas do projeto.

2.2.2. Agrupamento em Stringbox e Proteção CC:

Após a captação da radiação solar, a energia em corrente contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos é direcionada para a caixa de junção CC (também conhecida como stringbox). Essa caixa agrega os diferentes circuitos elétricos, protegendo o sistema contra sobrecorrentes e surtos elétricos, garantindo a segurança e a estabilidade do sistema.

Nesse ponto, a energia já está em corrente contínua e circula pelo sistema. É fundamental que os cabos, disjuntores e dispositivos de proteção contra surtos (DPS) sejam adequadamente especificados, de acordo com as normas técnicas, como as NBR 16690 e NBR 5410, que regem a instalação e a segurança desses sistemas no Brasil.

2.2.3. Conversão de Tensão Contínua em Tensão Alternada

A energia contínua segue sua trajetória até o inversor fotovoltaico, que desempenha um papel fundamental na conversão da tensão contínua gerada pelos módulos em tensão alternada (VAC). Essa conversão é essencial, pois a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos precisa ser compatível com os padrões da rede elétrica. O inversor, além de realizar a conversão de CC para CA, também monitora o desempenho do sistema e controla o ponto de máxima potência (MPPT), garantindo a operação eficiente do sistema fotovoltaico.

Outra função importante do inversor é a sincronização da fase e frequência da energia injetada na rede elétrica. Isso assegura que a energia gerada pelo sistema fotovoltaico seja compatível e possa ser integrada de forma segura e eficiente à rede pública de distribuição.

2.2.4. Integração com o Quadro Elétrico da Instalação

Após a conversão para corrente alternada, a energia gerada pelo sistema fotovoltaico é enviada ao quadro geral de distribuição (QGD) da instalação. Nesse ponto, a energia está pronta para ser utilizada nos sistemas elétricos internos da edificação pública, seja para consumo próprio, seja para injeção na rede elétrica, caso o sistema seja conectado à rede.

A integração do sistema fotovoltaico com o quadro elétrico da instalação permite uma utilização eficiente da energia solar gerada, promovendo uma redução nos custos de energia e contribuindo para a sustentabilidade ambiental da instituição. Para compreender de que maneira a configuração desse sistema impacta a dinâmica de atendimento à carga e a interface com a rede elétrica, faz-se necessário analisar as diferentes topologias de sistemas fotovoltaicos disponíveis. A escolha entre uma arquitetura puramente conectada à rede, isolada ou combinada dita não apenas os custos de implementação, mas também o nível de resiliência energética da instalação. A Tabela 1 apresenta uma análise comparativa resumida entre os sistemas *On-Grid*, *Off-Grid* e Híbridos, destacando suas principais características, vantagens e desvantagens.

Tabela 1 - Comparação de Sistemas Fotovoltaicos

Sistemas	Características	Vantagens	Desvantagens
On-Grid	• Conectam-se diretamente à rede da distribuidora; • Toda a energia gerada é utilizada pela instalação em tempo real. Se houver excedente, ele é injetado na rede e gera créditos de energia (em kWh); • Não requerem baterias; • Dependem da presença da rede para funcionar — em caso de queda da rede, o inversor desliga (por norma de segurança da concessionária).	• Menor custo de implantação; • Retorno rápido do investimento (payback reduzido); • Simples de manter.	• Não funcionam em caso de falta de energia (sem backup); • Dependência das regras de compensação da distribuidora.
Off-Grid	• Toda a energia é gerada e consumida localmente; • Incluem banco de baterias (geralmente de lítio ou chumbo-ácido) para armazenar energia para uso noturno ou dias nublados; • Possuem controladores de carga e inversores específicos (off-grid ou híbridos).	• Autonomia total em relação à concessionária; • Ideal para áreas rurais, comunidades isoladas, sistemas de bombeamento, etc.	• Custo mais elevado (baterias representam até 50% do custo total); • Requer dimensionamento preciso e manutenção mais rigorosa.
Híbrido	• Conectados à rede elétrica e também a um sistema de baterias; • Podem ser configurados para priorizar o autoconsumo, carregar as baterias ou exportar excedente à rede; • Inversores híbridos fazem a gestão inteligente das fontes e cargas; • Permitem operação em modo de backup ou ilha.	• Flexibilidade operacional; • Continuidade de fornecimento mesmo com falha da rede; • Possibilidade de arbitrar entre geração, consumo, armazenamento e exportação.	• Custo intermediário (entre on-grid e off-grid); • Requer maior sofisticação no projeto e monitoramento.

Conforme sintetizado na Tabela 1, embora os sistemas *On-Grid* apresentem menor custo de implantação e rápido retorno financeiro, sua dependência direta da rede da distribuidora impede a continuidade do fornecimento em cenários de queda ou instabilidade na rede pública. Por outro lado, a topologia Híbrida surge como uma solução técnica superior para o contexto de edificações públicas que buscam estabilidade de potência e flexibilidade operacional. Ao agregar inversores inteligentes e a capacidade de gerenciar o fluxo de energia entre a geração, o

consumo local e a rede, o sistema híbrido viabiliza tanto a operação em modo de *backup* quanto a otimização financeira dos perfis de consumo. Essa versatilidade é alcançada por meio da incorporação de sistemas de armazenamento, detalhados a seguir.

2.2.5 Integração do Sistema de Armazenamento (BESS):

A tecnologia BESS, ao ser combinada com sistemas fotovoltaicos, traz uma série de benefícios adicionais, complementando a produção de energia e garantindo uma gestão inteligente da energia gerada.

Maximização da Eficiência Energética: A energia solar fotovoltaica gera eletricidade durante o dia, enquanto a demanda de energia pode ocorrer de forma constante ou até mesmo em horários de pico, muitas vezes à noite. O uso de baterias de armazenamento permite que a energia gerada durante o dia seja armazenada e utilizada em momentos em que a produção solar não é suficiente, como à noite ou em dias nublados. Isso proporciona uma utilização contínua da energia renovável, garantindo maior autossuficiência energética para as instalações públicas.

Estabilidade e Confiabilidade: A produção de energia solar é variável, dependendo da irradiação solar, que pode ser afetada por condições climáticas, como nuvens ou chuvas. A intermitência da energia fotovoltaica pode gerar flutuações de tensão ou falhas momentâneas, o que pode afetar a qualidade da energia fornecida. Com o sistema BESS, é possível suavizar essas variações, garantindo uma energia estável e contínua, minimizando as quedas abruptas de tensão e as oscilações que podem ocorrer com sistemas fotovoltaicos isolados.

Redução de Custos Operacionais: O armazenamento de energia em baterias também contribui para a redução de custos com energia elétrica ao permitir que a energia gerada seja utilizada em horários de pico, quando os preços da eletricidade são mais altos. Isso é particularmente vantajoso para o setor público, que frequentemente enfrenta grandes custos com a demanda de energia. O uso de BESS em conjunto com a fotovoltaica ajuda a mitigar os custos de consumo da rede elétrica, contribuindo para uma gestão financeira mais eficiente.

Sustentabilidade e Imagem Institucional: A combinação de sistemas fotovoltaicos e BESS também fortalece a imagem institucional das entidades públicas, demonstrando um compromisso com a sustentabilidade e a utilização de tecnologias verdes. Com a crescente demanda por soluções ambientalmente responsáveis, a implementação dessa tecnologia contribui para os objetivos globais de redução de emissões de carbono e preservação ambiental.

Aproveitamento Máximo da Energia Solar: Com o sistema BESS, é possível aproveitar o excesso de energia solar gerada durante o dia, que, de outra forma, seria desperdiçada ou transferida para a rede elétrica. As baterias permitem armazenar essa energia excedente, otimizando o uso da energia fotovoltaica e aumentando o retorno sobre o investimento. Em ambientes públicos, onde a sustentabilidade e a eficiência energética são prioridades, o BESS pode ser fundamental para maximizar os benefícios do sistema fotovoltaico.

2.3 Controle e Qualidade de Energia em Sistemas FV-BESS:

2.3.1 Suavização de Rampa (Ramp-rate Control):

O controle de suavização de rampa (ramp-rate control) constitui um dos principais mecanismos de controle empregados na integração de sistemas fotovoltaicos (FV) com sistemas de armazenamento em baterias (Battery Energy Storage Systems – BESS), visando mitigar os efeitos da variabilidade intrínseca da geração solar. A intermitência associada à passagem de nuvens pode provocar variações abruptas na potência ativa injetada na rede, resultando em flutuações de tensão, degradação da qualidade da energia e possíveis violações de requisitos operacionais estabelecidos por códigos de rede.

Nesse contexto, o controle de rampa tem como objetivo limitar a taxa de variação temporal da potência entregue ao sistema elétrico, impondo uma restrição dinâmica à saída do sistema combinado FV-BESS. Essa restrição pode ser expressa por:

$$\left| \frac{dP_{out}(t)}{dt} \right| \leq R_{max}$$

Em que **$P_{out}(t)$** representa a potência injetada na rede no instante **t** e **R_{max}** define a taxa máxima admissível de variação, geralmente especificada como uma fração da potência nominal do sistema por unidade de tempo (por exemplo, $\pm 10\%/min$). A atuação do BESS é determinada pela diferença entre a potência gerada pelo sistema fotovoltaico e a potência efetivamente entregue à rede, conforme:

$$P_{BESS}(t) = P_{out}(t) - P_{PV}(t)$$

Em que **$P_{PV}(t)$** é a potência ativa instantânea gerada pelos módulos fotovoltaicos e **$P_{BESS}(t)$** representa a potência líquida do sistema de armazenamento, assumindo valores positivos para regimes de descarga (injeção de potência) e valores negativos para regimes de carga (absorção de energia).

Dessa forma, quando ocorrem variações rápidas na geração fotovoltaica, o sistema de armazenamento atua de forma compensatória, injetando potência na rede em situações de queda súbita de geração ou absorvendo energia durante aumentos abruptos. Esse comportamento permite desacoplar parcialmente a variabilidade da fonte primária da resposta elétrica observada na rede.

A implementação do controle de rampa proporciona benefícios relevantes, tais como a redução de oscilações de tensão, mitigação de flicker e melhoria da estabilidade operacional, especialmente em redes com baixa inércia ou elevada penetração de geração distribuída. Contudo, sua eficácia depende diretamente do correto dimensionamento do sistema de armazenamento, incluindo sua capacidade energética e potência nominal, bem como da gestão adequada do estado de carga (*State of Charge* – SOC), uma vez que limitações operacionais podem restringir a capacidade de resposta do BESS ao longo do tempo.

2.3.2 Mitigação de Impactos e Qualidade da Energia Elétrica

A qualidade da energia elétrica em sistemas modernos é significativamente influenciada pela presença de distorções harmônicas, pelo fator de potência e pela regulação de frequência. Com a crescente penetração de fontes renováveis baseadas em eletrônica de potência, como a geração fotovoltaica, que reduz a inércia equivalente do sistema elétrico, tais aspectos tornam-se ainda mais críticos.

Os harmônicos, originados principalmente por inversores e conversores eletrônicos operando como cargas não lineares, provocam distorções nas formas de onda de tensão e corrente, podendo resultar em aumento de perdas térmicas, envelhecimento precoce de isolamentos e mau funcionamento de dispositivos sensíveis]. Do mesmo modo, o fator de potência e a regulação de frequência demandam atenção, pois o primeiro representa a eficiência na conversão da energia útil frente à circulação de potência reativa, enquanto a segunda está atrelada ao equilíbrio instantâneo entre a geração e a demanda da rede.

Nesse cenário, os sistemas BESS destacam-se como uma solução multifuncional eficaz para a melhoria dos índices de qualidade da energia. Por meio de inversores bidirecionais robustos, o BESS pode atuar como um filtro ativo de potência, compensando dinamicamente componentes harmônicas e reduzindo a distorção harmônica total (THD) das formas de onda. Adicionalmente, esses conversores eletrônicos são capazes de injetar ou absorver potência reativa de forma customizada, contribuindo diretamente para a correção do fator de potência local e para a regulação dos níveis de tensão no ponto de acoplamento comum.

Além do suporte à tensão, o BESS desempenha um papel fundamental na regulação de frequência do sistema elétrico devido à sua elevada velocidade de resposta dinâmica. Frente a desequilíbrios abruptos entre carga e geração, o sistema de armazenamento pode emular inércia virtual; em situações de subfrequência, o sistema injeta potência ativa na rede de forma quase instantânea, ao passo que, em

condições de sobrefrequência, absorve o excedente energético. Assim, a integração sinérgica entre sistemas fotovoltaicos e BESS configura-se como uma abordagem indispensável para mitigar os impactos da intermitência renovável, assegurando a estabilidade e a conformidade com os padrões de qualidade da energia elétrica.

2.4 Análise de Viabilidade Econômica e Memorial de Cálculos do BESS:

A avaliação da viabilidade econômica e o dimensionamento do Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) foram estruturados tomando como referência o perfil de carga de uma residência de dois pavimentos. Conforme o levantamento de potência demonstrado na tabela 3, esta unidade consumidora apresenta uma demanda instalada total de 44.676 W. Esse consumo é distribuído entre a iluminação dos ambientes (4.860 W), tomadas de uso geral (9.016 W) e, de forma mais expressiva, equipamentos de uso específico que somam 30.800 W, tracionados pela presença de múltiplos aparelhos de ar-condicionado e chuveiros elétricos distribuídos nas suítes e áreas comuns.

Tabela de Potências									
Dependência	Dimensões		Potência de iluminação (W)	TUG's			TUE's		Total Potência (W)
	Área (m²)	Perímetro (m)		Quantidade	Potência (VA)	Potência (W)	Discriminação	Potência (W)	
Primeiro Piso									
Sala	32.72	23.90	700	5	500	460			
Escritório	10.50	13.00	200	3	300	276			
Sala de Jantar	15.75	16.00	300	4	400	368			
Cozinha	17.10	16.60	300	5	2000	1840			
Sala de Visita	27.44	21.00	600	4	400	368	Ar Condicionado	2800	
Dispensa	3.44	7.50	60	1	100	92			
WC	3.52	7.60	60	1	600	552			
Varanda	13.00	19.10	120	3	300	276			
Área de Serv.	17.55	6.00	300	2	1200	1104			
Segundo Piso									
Sacada	13.00	19.10	120	3	300	276			
Suíte 1	28.50	21.40	600	4	400	368	Ar Condicionado	2800	
WC Suíte 1	7.50	12.40	100	2	1200	1104	Chuveiro elétrico	5600	
Suíte 2	24.00	19.80	500	3	300	276	Ar Condicionado	2800	
WC Suíte 2	5.33	9.60	100	1	600	552	Chuveiro elétrico	5600	
Suíte 3	16.38	16.30	300	2	200	184	Ar Condicionado	2800	
WC Suíte 3	5.18	9.50	100	1	600	552	Chuveiro elétrico	5600	
Hall	6.80	12.60	100	1	100	92			
Sala de TV	17.74	16.90	300	3	300	276	Ar Condicionado	2800	
Total			4860	48	9800	9016		30800	44676

Tabela 2 – Tabela de potências de uma casa de dois pavimentos

Para suprir essa alta demanda elétrica e garantir estabilidade energética à residência, a modelagem financeira do sistema exige um investimento inicial I_0 de R\$ 80.000,00. (NREL, [2024]) e (GREENER, [2025]).

$$I_0 = Capex_{FV} + Capex_{BESS}$$

$$I_0 = R\$35.000 + R\$45.000 = 80.000$$

O retorno financeiro é viabilizado pela economia anual projetada a partir da geração fotovoltaica média compensada estimada para suportar o consumo dessa residência (INPE, [2017]) e a tarifa de energia atual (COPEL, [2026]). Deduzindo os custos operacionais do sistema, obtém-se um fluxo de caixa líquido positivo de R\$ 11.240,00 ao ano, o que representa um acumulado bruto de R\$ 112.400,00 ao longo dos primeiros dez anos de operação.

$$\text{Economia Anual} = (\text{Geração Média (FV)} \cdot \text{Tarifa de Energia}) \cdot 12 \text{ meses}$$

$$(1200 \cdot 0,85) \cdot 12$$

$$\text{Fluxo de caixa} = \text{Economia Anual} - \text{Opex total}$$

$$12240 - 1000 = R\$11.240,00$$

$$\text{Fluxo de caixa (10 anos)} =$$

$$11240 \cdot 10 \text{anos} = R\$112.400,00$$

No entanto, o planejamento econômico exige a previsão de um retrofit do sistema no décimo ano, com custo estimado de R\$ 25.000,00. Consequentemente, o fluxo de caixa para este período específico sofre o impacto direto da manutenção, resultando em um saldo líquido pontual negativo de R\$ -13.760,00.

Retrofit no 10º ano = Fluxo de Caixa - LCOS

$$11.240 - 25000 = R\$ - 13.760,00$$

Para mensurar a rentabilidade real do projeto habitacional ao longo de 20 anos, aplica-se o método do Valor Presente Líquido (VPL) com uma taxa de desconto k de 10%. O valor presente da anuidade das receitas operacionais atinge R\$ 95.692,42, enquanto o impacto do retrofit descontado a valor presente é de R\$ -9.638,58. A equação global, atestando a viabilidade técnica e financeira para a residência, resulta em um VPL positivo de R\$ 6.053,84:

$$VPL = VP_{anuidade} - VP_{retrofit} - I_0$$

$$VPL = 95.692,42 - 9.638,58 - 80.000$$

$$VPL = R\$6.053,84$$

A atratividade do investimento frente ao elevado consumo da casa é confirmada pelo cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR). Mediante a simulação de diferentes cenários para o fluxo de caixa, necessita-se do ponto de equilíbrio matemático que é alcançado utilizando um algoritmo seguindo o método de Newton-Raphson conforme os seguintes experimentos:

Experimento 1: $K = 10\%$

$$-80000 + \sum_{t=1}^9 \frac{11240}{(1+10)^t} + \frac{-13760}{(1+10)^{10}} + \sum_{t=11}^{20} \frac{11240}{(1+10)^t} = 7044$$

Experimento 2: $K = 12\%$

$$-80000 + \sum_{t=1}^9 \frac{11240}{(1+12)^t} + \frac{-13760}{(1+12)^{10}} + \sum_{t=11}^{20} \frac{11240}{(1+12)^t} = -1633$$

Conclui-se que:

$$Resultado = 10 < Taxa Interna de Retorno > 12$$

Experimento 3: $K = 11,12\%$

$$-80000 + \sum_{t=1}^9 \frac{11240}{(1+11,12)^t} + \frac{-13760}{(1+11,12)^{10}} + \sum_{t=11}^{20} \frac{11240}{(1+11,12)^t} = 0$$

Mediante a simulação de diferentes cenários para o fluxo de caixa, verificou-se que o ponto de equilíbrio matemático é alcançado exatamente com uma taxa de 11,12%.

Por fim, a análise do payback descontado detalha o horizonte de tempo necessário para a recuperação do investimento inicial. Partindo do déficit de R\$ -80.000,00 no ano zero, as economias geradas reduzem o saldo devedor progressivamente, atingindo um saldo acumulado de R\$ -15.268,57 no nono ano. O custo do retrofit no décimo ano eleva momentaneamente esse saldo negativo para R\$ -20.573,65. Contudo, a estabilidade operacional nos anos seguintes retoma a amortização contínua. O limite de retorno do projeto da residência consolida-se no 17º ano de operação: neste período, o valor presente do fluxo anual (R\$ 2.223,77) supera o déficit residual do ano anterior (R\$ -1.700,11), garantindo o break-even e fechando o caixa com o primeiro saldo acumulado positivo no valor de R\$ 523,66. Mostrado na tabela a seguir:

Ano	Fluxo de Caixa	Valor Presente	Saldo Acumulado
0	R\$ -80000	R\$ -80000	R\$ -80000
1 a 9	R\$11240/ano	R\$ 64731,43	R\$ -15268,57
10	R\$ -13760	R\$ -5.305,08	R\$ -20573,65
11	R\$11240	R\$ 3939,55	R\$ -16634,1
12	R\$11240	R\$ 3581,41	R\$ -13052,69
13	R\$11240	R\$ 3255,82	R\$ -9796,87
14	R\$11240	R\$ 2959,84	R\$ -6837
15	R\$11240	R\$ 2690,77	R\$ -4146,26
16	R\$11240	R\$ 2446,15	R\$ -1700,11
17	R\$11240	R\$ 2223,77	R\$ 523,66

Tabela 3 - Análise do Payback descontado

3. METODOLOGIA

Esta seção detalha a metodologia adota para realizar o memorial de cálculo e as premissas adotadas para a análise de viabilidade econômica da integração entre o sistema fotovoltaico (FV) e o sistema de armazenamento de energia em baterias (BESS). Os parâmetros técnicos e econômicos foram embasados em dados consolidados da literatura do setor, estimativas acadêmicas e condições de mercado, definidos a seguir:

A análise econômica de sistemas energéticos inicia-se pela definição de sua estrutura de custos, tradicionalmente dividida em despesas de capital (CAPEX) e despesas operacionais (OPEX). O CAPEX (Capital Expenditure) corresponde aos custos iniciais de aquisição, instalação e comissionamento dos equipamentos, incluindo, por exemplo, módulos fotovoltaicos, inversores, sistemas de armazenamento e infraestrutura associada. Esses valores são frequentemente expressos em unidades como R\$/kWp ou R\$/kWh, dependendo da natureza do sistema.

Por sua vez, o OPEX (Operational Expenditure) refere-se às despesas recorrentes ao longo da vida útil do projeto, abrangendo atividades de operação, manutenção, monitoramento e eventuais reparos. Em sistemas de energia renovável, o OPEX costuma representar uma fração relativamente pequena do CAPEX, tipicamente entre 1% e 2% ao ano. Na modelagem econômica, os fluxos de caixa são estruturados considerando o CAPEX concentrado no instante inicial (ano zero) e o OPEX distribuído ao longo dos períodos subsequentes, permitindo a análise temporal dos custos e receitas do projeto.

As variáveis do memorial de cálculo definem-se pelos seguintes tópicos:

Tarifa de Energia: Adotou-se o custo de R\$ 0,85/kWh, sobre o qual incidem os tributos e encargos setoriais aplicáveis (ICMS, PIS e COFINS). Este valor atua como base para o cálculo da receita gerada ou do custo evitado pela autogeração.

Geração Média Fotovoltaica: A geração estimada para suportar a demanda do sistema foi fixada em 1200 kWh/mês. Este parâmetro foi dimensionado considerando o Performance Ratio regional, com dados extraídos do Atlas Brasileiro de Energia Solar (INPE, [2017]).

Custo de Capital do Sistema Fotovoltaico CAPEX (FV): O investimento inicial referente aos equipamentos e instalação da usina fotovoltaica foi estipulado em R\$ 35.000,00, tomando como referência os dados de mercado mapeados pelo Estudo Estratégico de Geração Distribuída (GREENER, [2025]).

Custo de Capital do Sistema de Armazenamento CAPEX (BESS): O investimento inicial para o banco de baterias e seus inversores foi estimado em R\$ 45.000,00, fundamentado nos relatórios de custos de tecnologias de armazenamento do National Renewable Energy Laboratory (NREL, [2024]).

Custo Operacional OPEX: Os custos recorrentes de operação e manutenção preventiva do sistema foram estimados em R\$ 1.000,00 ao ano, com base em projeções acadêmicas.

Custo de Substituição (Retrofit): Foi previsto um desembolso de R\$ 25.000,00 a cada 10 anos de operação para o retrofit ou substituição do sistema de

armazenamento. Esta variável é um componente crítico para a determinação precisa do Custo Nivelado de Armazenamento (Levelized Cost of Storage - LCOS).

Taxa de Desconto (k): Estabeleceu-se uma taxa de desconto de 10% ao ano. Esta porcentagem representa o custo de oportunidade do capital, balizada pela rentabilidade média de investimentos conservadores de renda fixa no Brasil, como títulos do Tesouro Direto.

3.1 Indicadores de Decisão Econômica e Análise Numérica

Para a avaliação do projeto, foram adotados métodos consagrados de análise de fluxo de caixa descontado. O Valor Presente Líquido (VPL) foi utilizado para trazer todos os fluxos de caixa líquidos futuros ao valor presente, permitindo avaliar se a soma das receitas supera o investimento inicial e os custos ao longo do tempo. A formulação matemática do VPL é dada por:

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FCt}{(1+k)^t}$$

Onde **FCt** representa o fluxo de caixa no período **t** , **k** é a taxa de desconto e **I_0** é o investimento inicial total (CAPEX BESS + CAPEX FV)

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FCt}{(1+TIR)^t} - I_0$$

Devido à natureza polinomial da equação do VPL em relação à taxa de desconto, a obtenção da TIR requer a aplicação de métodos numéricos para encontrar sua raiz real. Para este fim, empregou-se o Método de Newton-Raphson, um algoritmo iterativo de rápida convergência. A regra de iteração do método é expressa por:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$$

Neste escopo de aplicação, a função $f(x)$ corresponde à própria função do VPL, cuja variável independente é a taxa de atratividade, e $f'(x)$ representa a sua respectiva derivada de primeira ordem. O processo iterativo prossegue até que a aproximação da **TIR** satisfaça um critério de tolerância pré-estabelecido.

O Payback Descontado (PBD) também foi adicionado à análise para determinar, a partir de uma visualização individual anual do escopo apresentado pelo valor presente líquido, o período necessário para que o investimento inicial seja recuperado considerando a atualização do fluxo de caixas e a taxa de desconto preestabelecida. Matematicamente, o PBD é o valor de t que satisfaz a seguinte condição:

$$\sum_{t=1}^{PBD} \frac{FCt}{(1+k)^t}$$

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A integração do Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) à geração fotovoltaica demonstrou-se uma estratégia eficaz não apenas para promover a transição energética, mas sobretudo para garantir a estabilidade de potência em cenários de alto consumo. O dimensionamento técnico do sistema, fundamentado no perfil de uma unidade residencial com expressiva demanda instalada de 44.676 W, comprovou a capacidade da tecnologia em absorver os picos de carga gerados por equipamentos de uso específico, como aparelhos de climatização e aquecimento elétrico. A atuação conjunta dos sistemas de conversão e gerenciamento do BESS (como o PCS e o BMS) atende aos rigorosos requisitos de estabilidade, assegurando o suprimento contínuo e a confiabilidade da instalação mesmo diante de flutuações na geração solar ou picos de demanda da residência.

A análise integrada de viabilidade técnica e econômica confirmou que a associação de sistemas fotovoltaicos ao BESS constitui uma solução eficaz para a estabilidade de potência em unidades com elevada demanda instalada. Embora o modelo referencial habitacional exija um investimento inicial expressivo e apresente um horizonte de amortização de 17 anos devido à curva de custos do retrofit, os indicadores financeiros como o VPL positivo e a TIR de 11,12% ratificam a sustentabilidade do projeto no longo prazo. Diante desse cenário, conclui-se que uma das principais estratégias para otimizar a atratividade financeira dessa tecnologia reside na segmentação e direcionamento do projeto por perfis de consumo. Dado que a rentabilidade percentual do sistema é diretamente proporcional à magnitude e à estrutura da tarifa de energia aplicada, a viabilidade econômica do BESS expande-se significativamente ao migrar para perfis comerciais e industriais. Nesses setores, onde as tarifas de demanda e de consumo nos horários de ponta são substancialmente mais elevadas, o gerenciamento energético por baterias potencializa a receita gerada por meio de estratégias de *peak shaving* e arbitragem tarifária. Portanto, recomenda-se para trabalhos futuros a replicação desta metodologia analítica em cenários comerciais e industriais, mapeando o impacto de tarifas de alta tensão na aceleração do retorno financeiro e na consolidação do BESS como pilar da transição energética.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. Síntese da Viabilidade e Autonomia Retome o fato de que a integração do BESS com a geração fotovoltaica provou ser uma solução robusta para o cenário avaliado. Reforce que, apesar da alta densidade de carga da residência (44.676 W) e do investimento intensivo em capital inicial, o sistema alcança o break-even dentro de sua vida útil (17 anos). Isso comprova que a busca por estabilidade e segurança energética é uma decisão tecnicamente viável e financeiramente sustentável a longo prazo.

2. A Resiliência da Modelagem Financeira Destaque a importância de um planejamento econômico realista. A previsão do retrofit no décimo ano demonstra que a adoção de baterias exige rigor no fluxo de caixa. Conclua que o projeto foi capaz de absorver esse forte impacto financeiro sem comprometer a atratividade global do investimento, validando o VPL positivo e a Taxa Interna de Retorno de 11,12%.

3. O Papel na Transição Energética Aborde o impacto macro da sua pesquisa. O uso do armazenamento otimiza o aproveitamento da energia limpa gerada e protege a unidade consumidora contra flutuações e instabilidades da rede elétrica tradicional. Essa aplicação prática ilustra de forma clara o avanço da transição energética em nível de geração distribuída.

4. Expansão da Pesquisa e Trabalhos Futuros Toda boa conclusão acadêmica aponta para os próximos passos. Como a metodologia de simulação de viabilidade econômica e estabilidade de potência se provou precisa e eficaz para esta unidade habitacional, sugira que as próximas etapas da pesquisa apliquem este mesmo modelo analítico para perfis de carga mais complexos. Você pode propor a expansão do estudo para avaliar a viabilidade técnica e o retorno financeiro do BESS em instalações comerciais e plantas industriais, criando um comparativo de viabilidade entre diferentes setores.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ADVANCES in Battery Energy Storage Management: Control and Economic Synergies. **arXiv**, [s. l.], 6 fev. 2026. Disponível em: <https://arxiv.org/html/2602.06365v1>. Acesso em: 29 abr. 2026.

BRASIL. **Lei nº 15.269, de 2025**. Altera a legislação do setor elétrico para reconhecer o armazenamento de energia como infraestrutura estratégica. Brasília, DF: Presidência da República, 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota Técnica: Microrredes - Análises técnicas, econômicas e regulatórias**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 29 abr. 2026.

REVISTA FATOR BRASIL. **BESS no Brasil: por que armazenamento virou tema estratégico para projetos solares**. [S. l.], 28 fev. 2026. Disponível em: <https://www.revistafatorbrasil.com.br/2026/02/28/bess-no-brasil-por-que-armazenamento-virou-tema-estrategico-para-projetos-solares/>. Acesso em: 29 abr. 2026.

THE SPANISH Energy Storage Market: Foundations for a Clean Energy Future. **MDPI - Energies**, [S. l.], v. 18, n. 21, 3 nov. 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/21/5788>. Acesso em: 29 abr. 2026.

SISTEMAS de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS): Guia Completo. Azzon Energia Solar. [S. l.], 6 abr. 2026. Disponível em: <https://www.azzon.com.br/blog/bess-armazenamento-energia-baterias>. Acesso em: 29 abr. 2026.

EPE recomenda solução com sistemas de armazenamento de energia por baterias (BESS) para aumento da confiabilidade no Acre. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). [S. l.], 21 jan. 2026. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-recomenda-solucao-inedita-com-baterias-grid-forming-para-aumentar-a-confiabilidade-do-suprimento-no-acre>. Acesso em: 29 abr. 2026.

EPE propõe uso de BESS com tecnologia grid-forming para reforçar confiabilidade no Acre. pv magazine Brasil. [S. l.], 22 abr. 2026. Disponível em: <https://www.pv-magazine-brasil.com/2026/04/22/epe-propoe-uso-de-bess-com-tecnologia-grid-forming-para-reforcar-confiabilidade-no-acre/>. Acesso em: 29 abr. 2026.

BESS no Brasil: por que armazenamento virou tema estratégico para projetos solares. **Revista Fator Brasil**, [s. l.], 28 fev. 2026. Disponível em: <https://www.revistafatorbrasil.com.br/2026/02/28/bess-no-brasil-por-que-armazenamento-virou-tema-estategico-para-projetos-solares/>. Acesso em: 29 abr. 2026.

BREALEY, R. A.; MYERS, S. C.; ALLEN, F. **Principles of Corporate Finance**. 13. ed. New York: McGraw-Hill, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota Técnica: Microrredes - Análises técnicas, econômicas e regulatórias**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 29 abr. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Projected Costs of Generating Electricity**. Paris: IEA, 2020.

LAZARD. **Levelized Cost of Storage Analysis – Version 7.0**. New York: Lazard, 2023.

O MERCADO solar brasileiro cresceu 400% com baterias — e a maioria dos brasileiros ainda não sabe o que isso vai fazer com a conta de luz. **Click Petróleo e Gás**, [s. l.], 29 abr. 2026. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/energia-solar-baterias-brasil-crescimento-400-davila/>. Acesso em: 29 abr. 2026.

ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R. W.; JAFFE, J. **Corporate Finance**. 11. ed. New York: McGraw-Hill, 2019.

NOTA TÉCNICA: Armazenamento de Energia por Baterias – Inserção no Sistema Interligado Nacional. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 4 jun. 2026.

ATLAS Brasileiro de Energia Solar: 2ª Edição. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 2017. Disponível em: <http://www.inpe.br>. Acesso em: 4 maio. 2026.

RANKING de Tarifas Residenciais das Distribuidoras de Energia Elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Brasília, DF, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel>. Acesso em: 4 maio. 2026.

ESTUDO Estratégico: Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída. Greener. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.greener.com.br>. Acesso em: 4 maio. 2026.

ANNUAL Technology Baseline: Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Golden, CO, 2024. Disponível em: <https://www.nrel.gov>. Acesso em: 4 maio. 2026.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]