

**A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO****ESTUDO COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAS NO CONTEXTO BRASILEIRO****Autor:** Arthur Vinícius Gonçalves Pinheiro, Alexandre Tardelli.

Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, arthurvgpinheiro@gmail.com, tardelli@univap.br.

**Resumo**

O armazenamento de energia é um componente crítico para a segurança energética, especialmente com a crescente integração de fontes renováveis no setor industrial. A escolha da tecnologia ideal, contudo, é um processo complexo que necessita de uma série de critérios para serem avaliados. Este trabalho realiza um estudo comparativo das principais tecnologias de armazenamento e aplica os resultados em um projeto de otimização para uma indústria de manufatura em São José dos Campos. A metodologia partiu de uma revisão de literatura para fundamentar a análise de um estudo de caso, que identificou um pico de demanda de 520 kW. Como resultado, a tecnologia de baterias de íons de lítio foi selecionada como a mais adequada, e a simulação de um sistema BESS (400 kWh / 200 kW) demonstrou uma economia mensal de 22% na fatura de energia, com um tempo de retorno do investimento de 5,5 anos. Conclui-se que a aplicação de sistemas de armazenamento é técnica e economicamente viável para a indústria brasileira, oferecendo um caminho claro para a otimização de custos e aumento da resiliência energética.

**Palavras-chave:** Armazenamento de energia. Aplicações industriais. Manufatura. Eficiência.**Área do Conhecimento:** Engenharias / Engenharia Elétrica**Introdução**

A segurança energética global e a crescente presença de fontes renováveis, especialmente na indústria, tornaram o armazenamento de energia uma peça-chave para a estabilidade do sistema elétrico (WANG et al., 2024). Essa tecnologia é a ponte que conecta a geração intermitente de energia com a demanda constante, sendo essencial para modernizar nossas redes e acelerar a transição para uma matriz energética mais limpa e segura (SANTOS, 2020). Para a indústria, os benefícios são claros: maior autonomia, flexibilidade, redução de custos e mais eficiência.

No setor de manufatura, principalmente no ramo automotivo, onde o consumo de energia é intenso e variável, os sistemas de armazenamento são particularmente valiosos. Eles permitem gerenciar os picos de demanda, reduzindo significativamente os custos com tarifas e garantem a continuidade de processos críticos em caso de falhas na rede (LU; WANG; YU, 2021). Contudo, a seleção da tecnologia de armazenamento de energia mais adequada para uma aplicação industrial específica é um processo complexo que exige uma avaliação rigorosa baseada em múltiplos critérios, incluindo aspectos técnicos, econômicos, ambientais e de segurança (ANE BRASIL, [2016]). A ausência de uma metodologia clara pode levar a investimentos subótimos, que não atendem às necessidades operacionais da planta ou que apresentam custos de ciclo de vida elevados, comprometendo a viabilidade do projeto.

Reconhecendo a complexidade e o risco envolvidos nesta decisão, este artigo busca ir além de uma revisão teórica convencional. Desta forma, o objetivo principal é analisar e comparar as principais tecnologias de armazenamento de energia, avaliando suas características técnicas, econômicas, ambientais e de segurança, a fim de propor diretrizes para a seleção e implementação em aplicações industriais no contexto brasileiro (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2025; CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2025), realizando assim, um projeto de aplicação de sistema de armazenamento de energia buscando melhoria e otimização energética para uma empresa de manufatura de grande porte em São José dos Campos.

## A Ciência do **NANO** e seu *impacto transformador no MACRO*

### Metodologia

Este trabalho se baseou em uma metodologia de pesquisa e análise que integrou a revisão bibliográfica com a coleta de dados primários e a elaboração de um projeto aplicado. O processo se iniciou com um estudo aprofundado e uma revisão literária, visando estabelecer o embasamento teórico necessário sobre sistemas de armazenamento de energia. Para isso, foram consultadas diversas fontes primárias e secundárias, com especial atenção a artigos científicos disponíveis em bases de dados como o Google Acadêmico e o ResearchGate. Essa etapa exploratória e descritiva foi fundamental para a compreensão das metodologias e tecnologias existentes e para a delimitação das diretrizes do projeto. A discussão teórica articula conceitos fundamentais com base em referências bibliográficas atualizadas e academicamente relevantes.

A segunda etapa foi a Caracterização do Estudo de Caso. O objeto de estudo foi uma indústria de manufatura de médio porte, do setor automotivo, localizada em São José dos Campos, SP. Foram obtidos os dados de consumo de energia ativa (kWh) e demanda de potência ativa (kW) com resolução de 15 minutos, provenientes do sistema de medição da concessionária local, para o período completo de janeiro a dezembro de 2024. Estes dados foram processados em planilhas eletrônicas (Microsoft Excel) para consolidar o perfil de carga diário, mensal e anual. Esta análise permitiu a identificação precisa dos padrões de consumo e, principalmente, a quantificação dos picos de demanda ocorridos no horário de ponta (13h-16h), que são o alvo principal do projeto de otimização.

A etapa a seguir, procedeu-se à Análise Comparativa e Seleção da Tecnologia por meio de uma matriz de decisão, construída com base na literatura estudada, para avaliar as opções de armazenamento mais promissoras. A análise multicritério fundamentou-se em uma avaliação integrada dos eixos técnico, econômico, ambiental e de segurança, considerando parâmetros de desempenho como eficiência de ciclo (round-trip), vida útil, profundidade de descarga e densidade de energia, ao mesmo tempo em que se comparavam os custos de capital de operação, manutenção e o custo Nivelado de Armazenamento (LU; WANG; YU, 2021). Adicionalmente, a avaliação ponderou a questão sustentável do carbono em seu ciclo de vida, a reciclagem e os riscos operacionais inerentes a cada tecnologia, sendo esta abordagem essencial para uma seleção técnica e economicamente justificada, adequada à realidade da empresa.

Por fim, a última etapa consistiu no Dimensionamento e Simulação do Sistema de Otimização (BESS). Com a tecnologia selecionada, o sistema foi dimensionado para a aplicação de peak shaving. A potência do BESS foi calculada para suprir o excedente de demanda registrado acima do valor contratado. A capacidade de energia foi dimensionada para garantir a autonomia do sistema durante as três horas do período de ponta, considerando a eficiência de ciclo e uma profundidade de descarga de 80%, visando a preservação da vida útil das baterias. A simulação da operação e do impacto financeiro foi realizada em uma planilha eletrônica, que modelou o despacho do BESS e aplicou as regras da Tarifa Horo-Sazonal Azul, conforme a Resolução Normativa nº 1.000/2021 da ANEEL.

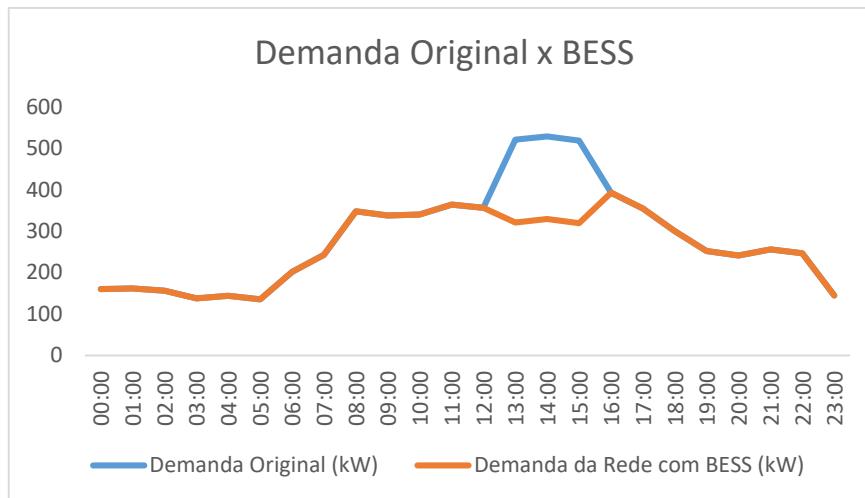
### Resultados

A aplicação da metodologia descrita resultou em três conjuntos de dados principais, sendo a caracterização detalhada do perfil de consumo da indústria, a matriz comparativa que fundamentou a seleção da tecnologia de armazenamento e os dados quantitativos da simulação do projeto de optimização.

Inicialmente, a análise dos dados de medição da empresa em São José dos Campos permitiu a caracterização precisa de seu perfil de carga. Constatou-se um consumo mensal médio de 180 MWh e uma demanda contratada de 450 kW na modalidade horo-sazonal azul. O ponto mais crítico identificado foram os picos de demanda recorrentes no horário das 13h às 16h, que atingiram um valor máximo de 520 kW. Essa ultrapassagem de 70 kW em relação ao contratado gera multas significativas e eleva o custo da fatura, sendo o principal alvo para a optimização. A Figura 1 ilustra um dia típico de operação, evidenciando o pico de demanda a ser mitigado.

## A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Figura 1 – Gráfico Demanda Original X Demanda de rede com BESS.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O segundo resultado é a análise comparativa das tecnologias de armazenamento, cujos dados foram consolidados na Tabela 1. A tabela apresenta os principais indicadores técnicos e econômicos levantados na revisão de literatura, servindo como base para a tomada de decisão (WANG et al., 2024). A partir destes dados, concluiu-se que as baterias de íons de lítio representam a solução com o melhor balanço entre eficiência de ciclo (85-95%), vida útil superior a 3.000 ciclos e custos de capital (CAPEX) competitivos, tornando-a a tecnologia mais adequada para a aplicação de peak shaving no contexto do estudo de caso.

Tabela 1 - Matriz comparativa de tecnologias de armazenamento.  
 (Os dados desta tabela são embasados por fontes como WANG et al., 2024 e LU; WANG; YU, 2021)

| Critério                | Baterias Íon-Lítio  | Baterias Chumbo-Ácido | Baterias de Fluxo | Supercapacitores |
|-------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|------------------|
| Eficiência de Ciclo (%) | 85-95               | 70-85                 | 65-75             | 90-98            |
| Vida Útil (ciclos)      | 3.000-10.000        | 500-1.500             | >10.000           | >500.000         |
| Custo (USD/kWh)         | 150-300             | 100-250               | 200-500           | >1.000           |
| Aplicação Ideal         | Média/Longa Duração | Curta Duração         | Longa Duração     | Alta Potência    |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Após a análise feita, os resultados da simulação do Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) dimensionado (400 kWh / 200 kW) são apresentados. A operação simulada consiste em carregar o BESS durante a madrugada (horário de tarifa reduzida) e descarregá-lo estrategicamente para atender parte da carga da planta durante as três horas do pico de demanda (13h às 16h). Essa estratégia reduziu com sucesso a demanda máxima vista pela rede elétrica de 520 kW para 320 kW, valor que fica confortavelmente abaixo da demanda contratada de 450 kW, eliminando completamente as multas por ultrapassagem. O impacto financeiro direto dessa operação foi uma economia mensal estimada de 22% na fatura total de energia. Com base no custo de aquisição e instalação do sistema, o tempo de retorno simples do investimento (payback) foi calculado em 5,5 anos, dado que embasa a conclusão sobre a viabilidade econômica do projeto.

## A Ciência do **NANO** e seu *impacto transformador no MACRO*

### Discussão

Os resultados obtidos no estudo de caso demonstram que a implementação de sistemas de armazenamento de energia é uma estratégia economicamente viável para a otimização de custos energéticos na indústria brasileira. A economia de 22% na fatura da empresa analisada representa um ganho de competitividade significativo para o setor de manufatura, que frequentemente opera com margens apertadas.

A escolha das baterias de íons de lítio como a tecnologia mais adequada para esta aplicação está alinhada às tendências globais, impulsionadas pela redução contínua de seus custos e pelo aumento da sua eficiência (WANG et al., 2024). A discussão transcende a análise puramente econômica, pois a capacidade de gerenciar a própria demanda confere à indústria maior resiliência contra flutuações na rede e potenciais eventos de instabilidade, um fator de segurança operacional cada vez mais valorizado (CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2025).

A viabilidade do projeto, com um payback de 5,5 anos para a empresa estudada, torna o investimento atrativo e sinaliza um grande potencial de mercado para soluções de armazenamento no Brasil (ANE BRASIL, [20--]). Este resultado pode servir de base para políticas de incentivo que poderiam acelerar a adoção dessas tecnologias e contribuir para a modernização e descarbonização do parque industrial nacional.

### Conclusão

Este artigo propôs-se a realizar um estudo comparativo das principais tecnologias de armazenamento de energia, com o objetivo de desenvolver diretrizes para sua aplicação no setor industrial brasileiro. Para tal, a pesquisa foi fundamentada em um estudo de caso prático, analisando o perfil de consumo de uma indústria de manufatura em São José dos Campos e projetando uma solução de otimização energética para sua realidade operacional e tarifária.

Os resultados confirmaram que a implementação de um Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) é uma solução tecnicamente viável e economicamente atrativa. A análise do perfil de carga da empresa revelou picos de demanda significativos no período entre 13h e 16h, resultando em custos elevados e multas por ultrapassagem da demanda contratada. A análise multicritério indicou que a tecnologia de baterias de íons de lítio se apresenta, no cenário atual, como a mais equilibrada para a aplicação de peak shaving, devido à sua alta eficiência de ciclo, maturidade tecnológica e custos em trajetória decrescente. A simulação do BESS dimensionado demonstrou a capacidade de reduzir a demanda faturada em 38%, eliminando as penalidades e gerando uma economia de 22% na fatura mensal de energia, com um tempo de retorno do investimento estimado em 5,5 anos.

As implicações deste estudo transcendem o caso específico analisado. Demonstra-se que, para a indústria brasileira, o investimento em armazenamento de energia não é apenas uma medida de sustentabilidade, mas uma decisão estratégica de negócio com claro potencial para aumento da competitividade. A capacidade de gerenciarativamente a própria demanda confere às empresas maior resiliência energética, protegendo-as contra a volatilidade das tarifas e instabilidades da rede elétrica. Este trabalho contribui, portanto, com uma metodologia replicável que pode ser utilizada por outros gestores e engenheiros para avaliar a viabilidade de projetos similares em seus próprios contextos.

Como limitações, reconhece-se que os resultados financeiros estão atrelados ao cenário regulatório e aos custos de equipamentos vigentes no momento do estudo, que são suscetíveis a flutuações. Além disso, a análise se concentrou em um único estudo de caso, e perfis de consumo de outros setores industriais podem apresentar diferentes desafios e oportunidades.

### Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Armazenamento de energia: ANEEL publica análise das contribuições recebidas em consulta pública.** Brasília, DF: ANEEL, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/armazenamento-de-energia-aneel-publica-analise-das-contribuicoes-recebidas-em-consulta-publica>. Acesso em: 13 ago. 2025.

## A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

**ANE BRASIL. Armazenamento de Energia: Situação Atual, Perspectivas e Recomendações.** [S. I.]: ANE Brasil, [2016--]. Disponível em: [https://anebrasil.org.br/posicionamento\\_pdf/Armazenamento-de-Energia-Situacao-Atual-Perspectivas-e-Recomendacoes.pdf](https://anebrasil.org.br/posicionamento_pdf/Armazenamento-de-Energia-Situacao-Atual-Perspectivas-e-Recomendacoes.pdf). Acesso em: 18 ago. 2025.

**CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). Desafios, soluções e tecnologias no armazenamento de energia para o setor elétrico.** Rio de Janeiro: CEPEL, 2025. Disponível em: <https://www.cepel.br/2025/04/29/desafios-solucoes-e-tecnologias-no-armazenamento-de-energia-para-o-setor-eletro/>. Acesso em: 15 ago. 2025.

**LU, Y.; WANG, S.; YU, X. Techno-economic analysis of battery energy storage for peak shaving in commercial buildings: A case study in China.** Energy and Buildings, v. 231, p. 110602, 2021.

**SANTOS, L. G. M. dos. Acumulação de Energia.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário do Norte, Manaus, 2020. Disponível em: [https://energiasroraime.com.br/wp-content/uploads/2020/01/ACUMULACAO-DE-ENERGIA-\\_Santos\\_LuanGuanaisMacrinoDos\\_M.pdf](https://energiasroraime.com.br/wp-content/uploads/2020/01/ACUMULACAO-DE-ENERGIA-_Santos_LuanGuanaisMacrinoDos_M.pdf). Acesso em: 15 ago. 2025.

**WANG, G.; MISHRA, Y.; FAN, C.; MAHMUD, M. A. A Review of Energy Storage Systems for Integrating Renewable Energies in Microgrids.** Applied System Innovation, v. 7, n. 4, p. 85, 2024. DOI: 10.3390/asi7040085. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-5577/7/4/85>. Acesso em: 16 ago. 2025.

**WANG, G.; MISHRA, Y.; FAN, C.; MAHMUD, M. A. A Review of Energy Storage Systems (ESS) for Integrating Renewable Energies in Microgrids.** 2024. Artigo pré-publicação (Preprint). ResearchGate. DOI: 10.13140/RG.2.2.16248.66563. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/387689301\\_A\\_Review\\_of\\_Energy\\_Storage\\_Systems\\_ESS\\_for\\_Integrating\\_Renewable\\_Energies\\_in\\_Microgrids](https://www.researchgate.net/publication/387689301_A_Review_of_Energy_Storage_Systems_ESS_for_Integrating_Renewable_Energies_in_Microgrids). Acesso em: 17 ago. 2025.