

Análise da Correção de Fator de Potência com Sistema Integrado de Armazenamento de Energia por Baterias em Ambiente Industrial

Sílvia Sousa Resende
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
silviasresende@ufu.br

Jacinto Costa Damião
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
jacinto.damiao@ufu.br

Poliana Caldeira dos Santos
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
poliana.caldeira@ufu.br

Thales Lima Oliveira
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
thales@ufu.br

Lucas Pereira Pires
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Triângulo Mineiro
Uberaba, Brasil
lucas.pires@uftm.edu.br

João Victor Machado de Souza
Engenharia de Produtos
UCB Power
São Paulo, Brasil
joao.souza@ucbsa.com.br

Resumo - A transição energética tem sido um tema central no setor elétrico, incentivando a adoção de tecnologias que promovam sustentabilidade e eficiência energética. Nesse contexto, os sistemas de armazenamento de energia por baterias (BESS – do inglês *Battery Energy Storage System*) têm se destacado não apenas para o suporte à geração renovável, mas também como uma solução em estudo de viabilidade para correção do fator de potência em instalações industriais. Este estudo analisa a aplicação de um BESS em uma fábrica, avaliando seu impacto na melhoria do fator de potência e na qualidade da energia elétrica. Os resultados indicam que o BESS, além de corrigir o fator de potência, contribui para a redução de penalidades tarifárias e promove uma operação mais estável e eficiente do sistema elétrico industrial.

Palavras-Chave: Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias, Correção de Fator de Potência, Qualidade de Energia, BESS.

I. INTRODUÇÃO

A transição energética tem impulsionado mudanças significativas no setor elétrico, promovendo a adoção de tecnologias sustentáveis que atendem à crescente demanda por energia limpa e eficiente. No Brasil, a energia fotovoltaica foi o grande destaque da última década, com um crescimento expressivo em sua capacidade instalada [1]. Contudo, o próximo marco dessa transformação aponta para o armazenamento de energia como uma solução essencial para superar desafios relacionados à intermitência das fontes renováveis, à estabilidade da rede elétrica e à qualidade do fornecimento de energia. Nesse cenário, os Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) têm se consolidado como uma tecnologia promissora para atender a essas demandas [2].

O mercado de armazenamento de energia por baterias no Brasil ainda está em fase inicial, mas já demonstra avanços significativos. A possibilidade de instalar BESS tanto "antes do medidor" quanto "depois do medidor" abre caminhos para aplicações práticas em programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e em projetos de prova de conceito (POC) [3]. Além disso, o primeiro leilão de reserva de capacidade com baterias, previsto para este ano, reflete o crescente interesse e investimento na tecnologia, sinalizando um futuro promissor para o setor. Apesar disso, algumas barreiras regulatórias e desafios técnicos ainda precisam ser

superados para que o armazenamento de energia alcance todo o seu potencial no mercado brasileiro [4].

Um dos pontos cruciais para o desenvolvimento sustentável do setor é a criação de uma cadeia produtiva nacional robusta. Atualmente, a maior parte dos equipamentos é importada, o que aumenta custos e limita a competitividade local. A instalação de fábricas brasileiras, além de fortalecer o mercado interno, garante suporte técnico para manutenção e pós-venda, elementos essenciais para a confiabilidade e longevidade dos sistemas de armazenamento. Este movimento não apenas contribui para o crescimento do setor, mas também promove a geração de empregos e a inovação tecnológica no país [5].

Neste contexto, o presente artigo apresenta um estudo realizado na fábrica de baterias de lítio da UCB Power, localizada em Extrema-MG. O objetivo principal é investigar a aplicação de um BESS na correção do fator de potência em um ambiente industrial. Entre os diversos benefícios que o armazenamento por baterias pode oferecer, a correção do fator de potência é de grande relevância para otimizar o consumo energético e reduzir custos operacionais. Este estudo prático será analisado com base em dados obtidos por softwares de gerenciamento de energia e na comparação das faturas de energia elétrica antes e após a instalação do sistema, contribuindo com informações relevantes para o desenvolvimento e aplicação da tecnologia no contexto brasileiro.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias

Os Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS, do inglês *Battery Energy Storage Systems*) têm se destacado como uma das soluções mais versáteis e promissoras para o setor elétrico, especialmente em um cenário de transição energética e crescente inserção de fontes renováveis intermitentes, como a energia solar e eólica. Os BESS são compostos por módulos de baterias conectados a sistemas de controle e inversores, que juntos desempenham funções críticas para o armazenamento e fornecimento de energia elétrica com alta eficiência e confiabilidade [6].

O núcleo de um BESS é formado pelas baterias, sendo as de íons de lítio as mais amplamente utilizadas devido à sua

alta densidade de energia, longa vida útil, eficiência de ciclo e menor necessidade de manutenção em comparação com outras tecnologias, como as de chumbo-ácido. O sistema de gerenciamento da bateria (*Battery Management System - BMS*) é essencial para monitorar parâmetros como tensão, temperatura e estado de carga (*State of Charge - SoC*), garantindo a operação segura e eficiente do sistema.

Os BESS também incluem inversores bidirecionais, que convertem a energia armazenada em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) e vice-versa, dependendo da necessidade. Além disso, sistemas de controle avançados permitem que o BESS desempenhe funções específicas, como resposta rápida a flutuações de carga, regulação de frequência, correção do fator de potência e armazenamento de excedentes de geração renovável para uso posterior [7].

As aplicações do BESS são amplas e variam de acordo com o setor e as necessidades específicas. No âmbito residencial, os sistemas podem ser usados para armazenamento de energia gerada por sistemas fotovoltaicos, permitindo maior autonomia e economia nas faturas de energia. No setor industrial, os BESS se destacam na mitigação de picos de demanda, na melhoria da qualidade da energia e na correção do fator de potência, reduzindo custos com penalidades tarifárias e otimizando a eficiência energética.

Ainda no setor de comércio e indústria, os sistemas de armazenamento de energia são utilizados para funções de *peak shaving* e *loading shifting*, que têm as funções de atenuação de picos e deslocamento de carga, consecutivamente. Essas funções são estratégias de gerenciamento de demanda energética utilizadas para otimizar o consumo e melhorar a eficiência dos sistemas elétricos.

O *peak shaving* envolve a redução da demanda de energia durante os períodos de pico, quando o consumo é mais elevado. Nesses momentos, sistemas de armazenamento de energia, como os BESS, podem liberar energia armazenada para suprir a carga, evitando a compra de eletricidade a preços elevados ou o acionamento de usinas de pico, que são mais caras e menos eficientes.

Já o *load shifting* é a prática de deslocar o consumo de energia de horários de pico para períodos de menor demanda, conhecidos como horários fora de pico. Isso é feito utilizando o armazenamento de energia, que permite armazenar eletricidade durante a baixa demanda e utilizá-la quando a carga é mais alta, reduzindo custos e contribuindo para a estabilidade da rede elétrica. Ambas as estratégias são eficazes para melhorar a eficiência do sistema elétrico e reduzir custos operacionais [8].

Em escala de utilidade, os BESS são utilizados para estabilizar redes elétricas, atuando como suporte em momentos de alta demanda ou baixa geração renovável. Adicionalmente, eles contribuem para a regulação da frequência e da tensão da rede, aumentando a confiabilidade do sistema elétrico.

Entre as principais vantagens dos BESS estão a flexibilidade de aplicação, a rápida resposta às variações de carga e a capacidade de integrar fontes renováveis à rede elétrica de forma eficiente. No entanto, alguns desafios precisam ser superados, como o alto custo inicial de instalação, as limitações regulatórias e a dependência de importação de componentes no Brasil. Além disso, o

gerenciamento do ciclo de vida das baterias e o descarte adequado ao final de sua vida útil são questões importantes para garantir a sustentabilidade do setor.

No Brasil, o desenvolvimento do mercado de BESS está em ascensão, impulsionado pela necessidade de modernização do sistema elétrico e pela expansão da geração distribuída. Programas de pesquisa e desenvolvimento, bem como iniciativas regulatórias como o leilão de reserva de capacidade, têm incentivado a adoção da tecnologia no país. Contudo, para que o setor alcance maturidade, é fundamental a criação de uma cadeia produtiva nacional, capaz de reduzir custos e oferecer suporte técnico local, garantindo a confiabilidade e a manutenção dos sistemas.

Os BESS apresentam-se, portanto, como uma tecnologia estratégica para atender às demandas do setor elétrico moderno, oferecendo soluções para desafios como a intermitência das fontes renováveis, a estabilidade da rede e a qualidade da energia. Este estudo visa aprofundar a análise de suas aplicações, com foco na correção do fator de potência, contribuindo para a consolidação dessa tecnologia no contexto brasileiro.

B. Energia Reativa e Correção de Fator de Potência

A energia elétrica é composta por três componentes principais: energia ativa, energia reativa e energia aparente [9]

- Energia ativa (P): é a energia efetivamente consumida e convertida em trabalho útil, como iluminação, aquecimento ou operação de máquinas.
- Energia reativa (Q): é a energia necessária para sustentar os campos magnéticos em equipamentos como motores, transformadores e reatores. Embora não realize trabalho útil, é essencial para o funcionamento de dispositivos indutivos.
- Energia aparente (S): é a combinação vetorial da energia ativa e reativa, representada por:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1)$$

Onde:

|S| é o módulo da energia aparente (em VA),

P é a potência ativa (em W),

Q é a potência reativa (em VAR).

A energia reativa é gerada por dispositivos indutivos, que exigem uma defasagem entre a tensão e a corrente para criar e manter os campos magnéticos. Em redes elétricas, essa defasagem é responsável pelo consumo de energia reativa, que não é aproveitada como trabalho útil, mas circula no sistema, carregando cabos e transformadores.

O fator de potência (FP) é a relação entre a energia ativa e a energia aparente:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2)$$

Ele indica a eficiência com que a energia elétrica é utilizada. Quando o fator de potência é baixo, significa que uma grande parte da energia total está sendo consumida como energia reativa, reduzindo a eficiência do sistema.

As principais razões para corrigir o fator de potência incluem:

- **Melhoria da eficiência energética:** Um FP baixo aumenta as perdas elétricas ao longo da rede, devido à maior circulação de corrente.
- **Redução de custos tarifários:** Concessionárias de energia penalizam consumidores com fator de potência abaixo do limite estabelecido (geralmente 0,92 ou 0,95).
- **Aumento da capacidade da infraestrutura elétrica:** Com a correção do FP, a capacidade de transporte de energia ativa pela rede é maximizada, reduzindo a sobrecarga de cabos e transformadores.
- **Estabilidade e qualidade de energia:** A redução de energia reativa minimiza flutuações de tensão, proporcionando maior estabilidade à rede.

A energia reativa, apesar de não realizar trabalho útil, é monitorada pelas concessionárias de energia e, em muitos casos, resulta em cobranças adicionais na fatura. Quando o fator de potência de um consumidor fica abaixo do valor mínimo estabelecido [10].

A correção do fator de potência é habitualmente realizada com a instalação de dispositivos que compensam a energia reativa no sistema, entre os quais destacam-se:

- **Bancos de Capacitores:** Dispositivos mais comuns e economicamente viáveis, usados para fornecer energia reativa capacitiva, compensando a energia reativa indutiva gerada por motores e transformadores.
- **Filtros de Harmônicas:** Além de compensar a energia reativa, ajudam a mitigar distorções harmônicas no sistema, melhorando a qualidade da energia.
- **Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS):** Embora menos tradicionais, os BESS têm ganhado espaço como uma solução viável, pois podem oferecer correção de fator de potência de forma dinâmica, além de outros benefícios como suporte à rede elétrica e armazenamento de energia.

A seleção do método de correção depende de fatores como o perfil de consumo do consumidor, o nível de energia reativa gerada e as características do sistema elétrico. Uma análise detalhada do sistema, frequentemente realizada com o auxílio de softwares de gerenciamento de energia, é essencial para determinar a melhor solução para corrigir o fator de potência e maximizar a eficiência energética.

Corrigir o fator de potência não é apenas uma medida técnica, mas uma estratégia econômica que permite às empresas reduzir custos, aumentar a eficiência operacional e contribuir para a sustentabilidade do sistema elétrico como um todo.

III. METODOLOGIA

O estudo foi realizado na fábrica de baterias de lítio da UCB Power, localizada em Extrema-MG, com o objetivo de avaliar os impactos do Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) na correção do fator de potência. A metodologia adotada foi estruturada nas seguintes etapas:

A. Caracterização do Sistema

O sistema analisado consiste em um BESS de 100 kW/120 kWh gerenciado pelo EMS Automa, instalado no laboratório de Engenharia de Produto. O sistema é composto por um PCS (*Power Conversion System*) híbrido Megarevo (MPS0100) e

clusters de baterias de alta tensão FNS-Sacred Sun. A configuração foi projetada para possibilitar tanto a correção do fator de potência quanto outras funcionalidades, como arbitragem de energia (*load-shifting*).

O sistema gerenciador de energia (EMS) que é o responsável pela correção do fator de potência da indústria. A fig. 1 ilustra a configuração elétrica da fábrica.

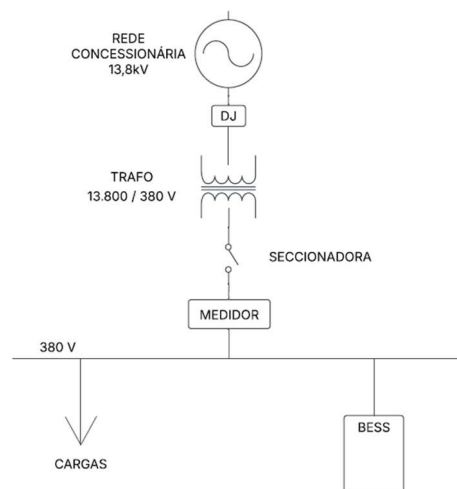


Fig. 1: Diagrama Unifilar Básico da Indústria

B. Coleta de Dados

Os dados foram coletados por meio de ferramentas de monitoramento energético e análise das faturas de energia elétrica da unidade industrial antes e após a instalação do BESS. As principais variáveis analisadas incluem:

- Consumo de energia ativa e reativa em horários de ponta e fora de ponta;
- Penalidades associadas ao excedente de energia reativa;
- Demanda máxima de potência ativa e reativa.

C. Análise de Impacto do BESS

A análise foi dividida em dois enfoques:

- Correção do Fator de Potência

O impacto do BESS na redução do excedente de energia reativa foi avaliado pela comparação entre os valores de fator de potência e multas aplicadas nas faturas antes e após a implementação do sistema. A eficiência do BESS foi mensurada pela capacidade de mitigar as penalidades e melhorar a qualidade da energia elétrica consumida pela fábrica.

- b) Arbitragem de Energia

Embora o foco principal seja a correção do fator de potência, também foram analisados os ganhos com *load-shifting*, avaliando a capacidade do BESS de armazenar energia fora de ponta para

consumo em horários de maior custo.

D. Ferramentas de Análise

Foi utilizado o software de gerenciamento de energia para monitorar a operação do BESS e calcular os ganhos obtidos. Adicionalmente, gráficos e tabelas foram gerados para visualizar:

- Curvas de consumo de energia ativa e reativa.

- Variações nos valores de multas por excedente de energia reativa.
- Comparações entre médias mensais antes e depois da instalação do BESS.

E. Resultados Esperados

A implementação do BESS é esperada para:

- Reduzir significativamente as multas por excedente de energia reativa;
- Melhorar o fator de potência para níveis aceitáveis (>0,92);
- Demonstrar a viabilidade prática de sistemas de armazenamento em aplicações industriais.

Com base na metodologia descrita, o estudo visa fornecer uma análise detalhada do desempenho do BESS no contexto industrial brasileiro e destacar sua contribuição para a eficiência energética e redução de custos.

IV. DESENVOLVIMENTO

A. Instalação do Sistema de Armazenamento de Energia (BESS)

A implementação do Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) foi realizada no laboratório de Engenharia de Produto da fábrica da UCB Power em Extrema-MG. O equipamento instalado consiste em um sistema com capacidade de 100 kW/120 kWh, gerenciado pelo EMS, e composto pelos seguintes componentes principais:

- PCS Híbrido Megarevo (MPS0100): Equipamento responsável pela conversão bidirecional de energia, permitindo que o BESS armazene energia da rede em momentos de baixa demanda e a forneça durante picos de consumo.
- Clusters de Baterias de Alta Tensão FNS - Sacred Sun: Módulos de baterias de lítio projetados para suportar operações de alta eficiência e ciclos de carga e descarga rápidos.
- Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS): Dispositivo integrado aos clusters de baterias para monitoramento contínuo de parâmetros como temperatura, tensão e estado de carga (State of Charge - SoC), garantindo segurança e eficiência operacional.

A instalação do Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) seguiu uma sequência de etapas estruturadas para garantir sua integração eficiente ao ambiente industrial. Inicialmente, foi realizada a preparação do local, com a configuração de um espaço dedicado no laboratório e adequações na infraestrutura elétrica para suportar a integração do Sistema de Conversão de Potência (PCS) e dos clusters de baterias. Nessa fase, também foram conduzidas análises preliminares de segurança e viabilidade elétrica, assegurando a conformidade com as normas técnicas e operacionais vigentes.

Na etapa seguinte, focada na integração com o sistema elétrico da fábrica, o PCS foi conectado ao quadro geral de distribuição (QGD), permitindo ao BESS atuar diretamente na compensação de energia reativa e na estabilização da rede interna. Para monitoramento em tempo real, foram instalados

sensores e medidores inteligentes capazes de registrar energia ativa, reativa e o fator de potência.

Posteriormente, foi realizada a configuração do sistema de gerenciamento de energia (EMS), programado para operar de forma automatizada, com prioridade para a correção do fator de potência e otimização da operação do BESS de acordo com os padrões de consumo energético da fábrica. Testes iniciais foram conduzidos para validar a funcionalidade do sistema e ajustar parâmetros operacionais, como ciclos de carga e descarga e níveis de resposta a flutuações de carga.

B. Coleta de Informações e Operação Assistida

Com a instalação concluída, iniciou-se a coleta de informações para análise de desempenho do BESS, utilizando dados obtidos antes e após a implementação do sistema. Esses dados foram captados por meio de ferramentas de monitoramento, registros operacionais e faturas mensais de energia elétrica fornecidas pela concessionária.

Dentre as ferramentas utilizadas, destacam-se os medidores inteligentes, instalados no ponto de conexão entre o BESS e o QGD, responsáveis por medir em tempo real energia ativa, reativa, tensão e corrente, além de registrar o fator de potência médio da fábrica antes e após a instalação. O próprio EMS também desempenhou papel essencial ao coletar e armazenar dados operacionais, permitindo análises detalhadas dos padrões de consumo e da resposta do BESS. Relatórios diários e mensais foram gerados, facilitando o acompanhamento do impacto do sistema, especialmente na redução de penalidades por energia reativa.

Adicionalmente, foi realizada a análise das faturas de energia elétrica, com o objetivo de identificar reduções nos custos relacionados a multas por excedente de energia reativa e consumo em horários de ponta. Dados históricos foram utilizados para calcular médias mensais e verificar as economias proporcionadas pelo uso do BESS.

A coleta de dados foi estruturada em duas fases principais. A primeira, correspondente ao período pré-instalação, abrangeu a análise de quatro meses de consumo energético anteriores à implementação do sistema (abril a julho), servindo como linha de base para comparação. Segue tabela I com os parâmetros do mês de abril para conhecimento.

TABELA I – PARÂMETROS FATURA DE ENERGIA MÊS DE ABRIL DE 2024

Parâmetros	04/2024	
	Qtd. (kWh)	Valor
Consumo - Ponta	2.848	R\$ 6.070,00
Consumo em - Fora Ponta	22.118	R\$ 11.523,00
Energia Reativa Exced - Ponta		
Energia Reativa Exced - Fora Ponta	3.040	R\$ 1.256,00
Demanda de Potência Medida - Fora Ponta	170	R\$ 5.262,00
Demanda Potência Reativa Exced - Fora Ponta	194	R\$ 5.985,00
Demanda Potência Ativa - Ultrap - Fora Ponta	20	R\$ 1.281,00
Total		R\$ 31.377,00

No período pós-instalação, correspondente aos quatro meses subsequentes à implementação do sistema, os dados foram capturados de forma contínua, permitindo uma análise aprofundada do desempenho do BESS em diferentes ciclos operacionais. Os resultados foram organizados em gráficos e tabelas para facilitar a comparação com o período anterior e auxiliar na interpretação dos dados.

Entre os principais indicadores avaliados, destacam-se a redução nas multas por energia reativa, a melhoria do fator de potência e a eficiência no uso da energia elétrica. Segue a tabela II referente ao mês de setembro para um entendimento maior dos benefícios proporcionados pela integração do BESS ao sistema elétrico da fábrica.

TABELA II – PARÂMETROS FATURA DE ENERGIA MÊS DE SETEMBRO DE 2024

Parâmetros	09/2024	
	Qtd. (kWh)	Valor
Consumo em kWh - Ponta	1.817	R\$ 3.632,00
Consumo em kWh - Fora Ponta	23.819	R\$ 10.506,00
Energia Reativa Exced em kWh - Ponta	578	R\$ 202,00
Energia Reativa Exced em kWh - Fora Ponta	1.225	R\$ 429,00
Demanda de Potência Medida - Fora Ponta	-	R\$ 2.431,00
Demanda Potência Reativa Exced - Fora Ponta	-	R\$ 0,00
Demanda Potência Ativa - Ultrap - Fora Ponta	-	R\$ 0,00
Total		R\$ 17.200,00

C. Resultados da Instalação

Os testes iniciais demonstraram que o BESS foi integrado com sucesso ao sistema elétrico da fábrica, operando de forma eficiente e segura. As funcionalidades de monitoramento em tempo real e resposta dinâmica permitiram ajustes rápidos e efetivos, garantindo a otimização do fator de potência e a redução de custos operacionais.

Os resultados foram organizados em gráficos e tabelas para facilitar a comparação e interpretação. A etapa de instalação e coleta de informações forneceu uma base sólida para a análise de desempenho e validação do impacto do BESS no cenário industrial, sendo essencial para o sucesso do estudo apresentado.

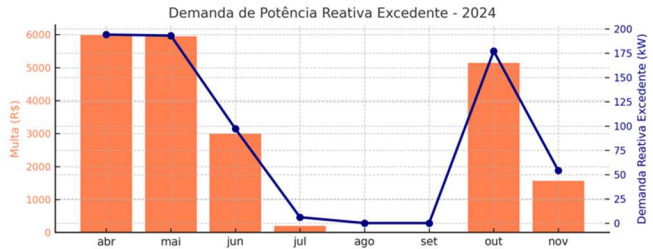


Fig. 2 – Gráfico da demanda de potência reativa excedente – 2024 (Fonte: UCB Power)

O gráfico da fig. 2 apresenta a evolução mensal da demanda de potência reativa excedente (em kW) e o valor das multas correspondentes (em R\$) ao longo de 2024. Os dados refletem os impactos da instalação do BESS, gerenciado pelo EMS, na correção do fator de potência.

Nos meses de abril e maio, os valores de demanda reativa excedente foram elevados, resultando em multas que ultrapassaram R\$ 5.000,00. Com a implementação do BESS, observou-se uma queda significativa na demanda a partir de junho, eliminando quase completamente as multas em julho e agosto.

No entanto, em outubro, houve um pico na demanda reativa, gerando uma multa de aproximadamente R\$ 4.000,00. Esse aumento foi atribuído à necessidade de testes em novas baterias de baixa tensão fabricadas no Brasil em função de uma licitação conquistada pela empresa. Em novembro, o

sistema voltou a controlar a demanda reativa, reduzindo as multas para menos de R\$ 2.000,00.

De maneira geral, o gráfico demonstra a eficácia do BESS em reduzir custos associados ao excedente de reativo, destacando a importância de monitoramento contínuo e ajustes para lidar com variações pontuais.

Já o gráfico apresentado na figura 3 ilustra o consumo mensal de energia (em kWh) e os valores pagos (em R\$) no horário de ponta ao longo de 2024. Apesar da instalação do BESS, o consumo no horário de ponta permaneceu relativamente estável, variando entre 2.500 kWh e 3.200 kWh. Esse comportamento reflete as limitações do sistema, cuja capacidade de 100 kW/120 kWh não é suficiente para atender plenamente a demanda nos horários de pico.

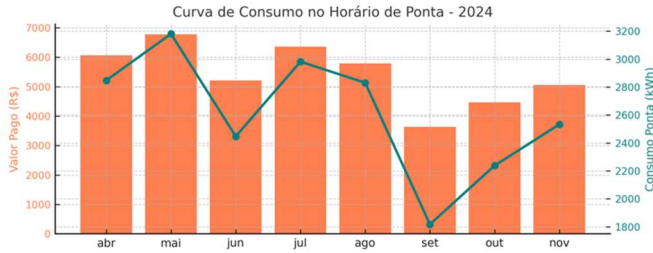


Figura 3 – Curva de Consumo no Horário de Ponta – 2024 (Fonte: UCB Power)

Os valores pagos acompanham essa tendência, com leves oscilações. Em maio, verificou-se um aumento no custo, enquanto setembro apresentou uma redução acentuada, possivelmente devido a variações tarifárias ou à eficiência do sistema. Em novembro, tanto o consumo quanto o custo voltaram a crescer ligeiramente.

Embora o BESS tenha contribuído para reduções de custos em outras áreas, sua capacidade limitada restringe a atuação na redução de consumo no horário de ponta. Isso reforça a necessidade de estratégias complementares, como a ampliação do sistema, instalação de UFV e melhorias na gestão da demanda.

O gráfico ilustrado na fig. 4 evidencia o consumo de energia reativa excedente (em kWh) e as multas associadas (em R\$) ao longo de 2024. Em maio, observou-se um pico significativo, com o maior consumo excedente e a maior multa do período. Nos meses seguintes, houve uma redução progressiva, confirmando a efetividade do BESS na correção do fator de potência.

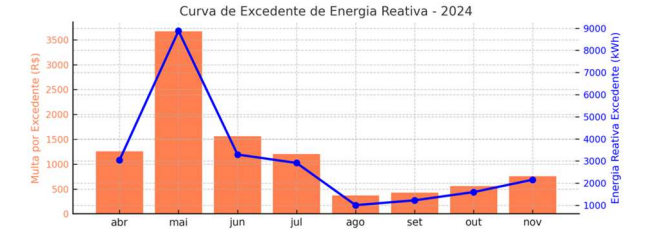


Fig. 4 – Curva de excedente de energia reativa – 2024 (Fonte: UCB Power)

Embora outubro e novembro tenham registrado uma leve elevação no consumo excedente e nas multas, os valores permaneceram abaixo dos registrados no início do ano, indicando uma melhora geral na gestão de energia reativa e menor impacto financeiro para a fábrica.



Fig. 5 – Redução da Multa por Energia Reativa – 2024 (Fonte: UCB Power)

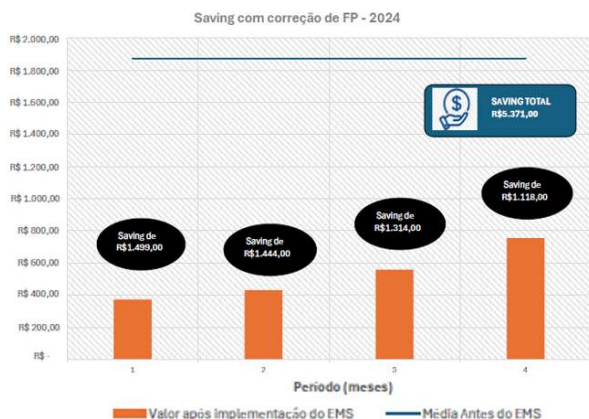


Fig. 6 – Saving com correção do Fator de Potência – 2024 (Fonte: UCB Power)

A implementação do BESS demonstrou resultados expressivos na redução de custos relacionados à energia reativa excedente. Conforme apresentado na fig. 5, a média das multas caiu de R\$ 1.873,00 para R\$ 529,25, representando uma redução de 28,26%. Já a fig. 6 destaca uma economia acumulada de R\$ 5.371,00 ao longo do ano, reforçando os benefícios financeiros do sistema.

V. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na correção do fator de potência demonstram o potencial de viabilidade econômica do investimento, especialmente pela expressiva redução nas penalidades associadas à energia reativa excedente. O sistema BESS analisado, desenvolvido internamente pela própria empresa como parte de um projeto de validação tecnológica, não implicou custos de aquisição ou comissionamento, o que reforça sua atratividade como solução piloto para aplicações industriais.

Embora a instalação de bancos de capacitores seja uma alternativa consolidada para correção de fator de potência, a adoção do BESS foi motivada por sua maior versatilidade. Além de atuar na compensação da energia reativa, o sistema viabiliza suporte à operação em situações de falha da concessionária, contribui para a estabilidade da rede interna, melhora a qualidade da energia entregue às cargas e possibilita o armazenamento de energia para uso em horários de ponta. Essas funcionalidades, ao serem integradas em um único sistema, não apenas ampliam os benefícios técnicos, como também promovem a redução adicional de custos operacionais e conferem maior confiabilidade ao suprimento de energia da fábrica.

Apesar de sua capacidade atual não ser suficiente para eliminar por completo o consumo em horário de ponta,

o BESS apresentou desempenho satisfatório frente aos objetivos iniciais. Diante desses resultados, recomenda-se a continuidade do desenvolvimento, com a ampliação da capacidade instalada, integração com fontes de geração renovável — como sistemas fotovoltaicos — e realização de estudos complementares de viabilidade econômica. Tais ações podem consolidar o uso do BESS como uma solução multifuncional, sustentável e tecnicamente eficaz para o ambiente industrial brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - FEELT, ao CNPq e à FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- [1] F. M. Campos et al., “Tecnologias e aplicações de sistemas de armazenamento de energia para suporte à integração de fontes renováveis no Brasil,” Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS), 2022.
- [2] V. A. Martins, A. C. Vieira, A. F. da S. L. de Andrade, A. L. da Costa, D. S. Silva, F. J. das Neves Júnior, L. G. de Rezende e R. A. S. Rios, “Desafios e oportunidades no uso do armazenamento de energia por baterias na transição energética brasileira,” Observatório de la Economía Latinoamericana, vol. 22, no. 7, e5777, 2024.
- [3] S. Amin e M. Boloorch, “Behind the Meter: Battery Energy Storage Concepts, Requirements, and Applications,” IEEE Smart Grid Newsletter, Sep. 2020. [Online]. Disponível em: <https://smartgrid.ieee.org/newsletters/september-2020/behind-the-meter-battery-energy-storage-concepts-requirements-and-applications>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- [4] K. Nolte e F. I. C. Thompson, “Untitled,” Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2024.
- [5] Diário do Comércio, “UCB vai investir R\$ 380 mi em Extrema para expansão produtiva,” Diário do Comércio, 2025. [Online]. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/economia/ucb-vai-investir-r-380-mi-extrema-expansao-produtiva/>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- [6] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Sistemas de Armazenamento em Baterias – Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento,” Ministério de Minas e Energia, Nota Técnica EPE-DEE-NT-098/2019, 2019. [Online]. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-441/EPE-DEE-NT-098_2019_Baterias%20no%20planejamento.pdf. Acesso em: 20 dez. 2024.
- [7] V. N. S. Diaz et al., “Fundamentos sobre sistema de armazenamento de energia,” in Tecnologias de Armazenamento de Energia Aplicadas ao Setor Elétrico Brasileiro, 2020, pp. 73.
- [8] Accuenergy, “What is Peak Shaving and Load Shifting?” [Online]. Disponível em: <https://www.accuenergy.com/articles/what-is-peak-shaving-and-load-shaving/>. Acesso em: 19 dez. 2024.
- [9] L. H. Medeiros, “Fator de potência na área industrial,” [dados complementares da publicação ausentes].
- [10] N. M. Silva, J. F. Silva e L. A. Almeida, “Análise e gestão da energia reativa em sistemas industriais,” Revista Brasileira de Energia, vol. 36, no. 1, pp. 45–58, 2020. [Online]. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/rbe/article/view/12345>. Acesso em: 21 dez. 2024.