



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Diretoria de Graduação
Curso de Engenharia Elétrica – Belo Horizonte

ARTHUR VIEIRA SANTOS

**ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM *DATA CENTER* INSTITUCIONAL:
SEGURANÇA ENERGÉTICA, SUBSTITUIÇÃO DE *NO-BREAKS* E ANÁLISE
ECONÔMICA**

Belo Horizonte

2026

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM DATA CENTER INSTITUCIONAL: SEGURANÇA ENERGÉTICA, SUBSTITUIÇÃO DE *NO-BREAKS* E ANÁLISE ECONÔMICA¹

Arthur Vieira Santos²

Prof. Marcos Fernando dos Santos³

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a aplicação de um sistema de armazenamento de energia com baterias de lítio-íon em um data center institucional, com ênfase em sua contribuição para a segurança energética, a continuidade operacional e o gerenciamento do consumo de energia elétrica. A proposta consiste na substituição dos *no-breaks* tradicionais com baterias de chumbo-ácido por um BESS (*Battery Energy Storage System*) com baterias de lítio-íon, capaz de atuar tanto como fonte de alimentação ininterrupta em situações de falha na rede quanto como recurso de arbitragem tarifária. A metodologia adotada envolveu o levantamento do perfil de carga do data center do CEFET-MG, entre 19 de setembro e 8 de outubro de 2025, cuja demanda se manteve em torno de 11kW, a análise da operação diária nos horários de Ponta (HP) e Fora de Ponta (HFP), e a avaliação do desempenho técnico e econômico do sistema composto por três inversores híbridos em paralelismo trifásico e nove baterias LFP (fosfato de ferro e lítio). Os dados práticos e de simulação indicam uma capacidade nominal de 43,2 kWh e energia arbitrada de aproximadamente 14,9 kWh/dia, o que resulta em uma economia anual estimada de R\$ 7.600. Com base no custo total de implantação de aproximadamente R\$ 96.000, o tempo de retorno (*payback* simples) do investimento é inferior a 13 anos. Os resultados demonstraram que o sistema moderniza a infraestrutura de alimentação do data center, proporciona maior segurança no fornecimento de energia, garante continuidade operacional e permite o uso ativo das baterias na gestão do consumo de energia elétrica. A economia obtida por arbitragem tarifária constitui um benefício complementar.

Palavras-chave: armazenamento de energia; *data center*; segurança energética.

Data de submissão: 15 jun. 2026.

Data de aprovação: 19 jun. 2026.

¹ Artigo científico elaborado para conclusão do curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), *campus* Nova Gameleira.

² Graduando em Engenharia Elétrica pelo CEFET-MG. E-mail: arthurvs100@gmail.com

³ Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Campus Nova Gameleira.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento dos serviços de computação em nuvem e a expansão global da internet têm impulsionado a construção de grandes data centers, operados por corporações como Google, Microsoft e Amazon (Chalise *et al.*, 2015). Paralelamente, o consumo de energia e a demanda de potência dessas infraestruturas tornaram-se objeto de atenção, devido aos custos associados e às crescentes exigências por confiabilidade, sustentabilidade e eficiência energética.

No contexto brasileiro, as transformações do setor elétrico — caracterizadas pela integração de fontes renováveis variáveis e intermitentes, como a solar fotovoltaica e a eólica (EPE, 2019) — ampliaram a complexidade da operação e planejamento das redes, evidenciando cenários de escassez de potência nos horários de ponta.

Tradicionalmente, os data centers contam com sistemas de alimentação ininterrupta — UPS (*Uninterruptible Power Supply*), conhecidos no Brasil como *no-breaks* —, muitas vezes baseados em baterias de chumbo-ácido, e geradores a diesel, como soluções de suprimento de energia de reserva (Govindan *et al.*, 2011). No entanto, essas alternativas convencionais enfrentam limitações, como a baixa eficiência energética, altos custos operacionais e impactos ambientais negativos associados à queima de combustíveis.

Nesse cenário, os Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) surgem como alternativa tecnológica para a modernização do setor elétrico. Com destaque para as baterias de íons de lítio, reconhecidas pela alta densidade energética, elevada eficiência e curto tempo de resposta, esses sistemas oferecem maior flexibilidade operacional e possibilidade de redução de custos em comparação com as tecnologias tradicionais de chumbo-ácido.

Além do banco de baterias, esses sistemas são compostos por um conjunto de componentes integrados que incluem o Sistema de Gerenciamento de Baterias (BMS), o Sistema de Conversão de Potência (PCS) e um Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS), responsável por coordenar a operação global.

Para além do ambiente de TI, a resposta instantânea do BESS permite sua aplicação em serviços de apoio à rede elétrica, como controle de frequência e tensão,

em conformidade com as diretrizes do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), além de sua atuação como backup emergencial (Braga; Montiel; Tremura, 2025).

1.1 Problema de Pesquisa

A infraestrutura de alimentação elétrica do data center institucional apresenta riscos à continuidade operacional e permanece apoiada em um sistema de reserva energética composto de *no-breaks* tradicionais e gerador a diesel. Diante disso, a transição para uma solução baseada em Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) se justifica para mitigar esses riscos operacionais e econômicos em duas frentes principais de atuação.

A primeira frente é o fortalecimento da segurança energética e confiabilidade do fornecimento, em que o BESS atua como um sistema de alimentação ininterrupto (UPS) de resposta rápida, com garantia de suprimento contínuo e estável de energia durante falhas e instabilidades na rede elétrica. Diferentemente dos sistemas tradicionais baseados em geradores que exigem tempo de partida, as baterias de lítio-íon podem reagir em segundos ou até milissegundos, aspecto essencial diante da sensibilidade dos equipamentos eletrônicos de um data center.

A segunda frente refere-se à redução de custos por meio da arbitragem tarifária. Essa estratégia é viabilizada no Brasil porque os consumidores industriais e comerciais de alta tensão (Grupo A), bem como os optantes pela tarifa branca na baixa tensão (Grupo B), são cobrados pela concessionária local, a CEMIG, com valores diferenciados conforme o horário de utilização da energia. Essa variação nos preços ao longo do dia permite que a arbitragem de energia reduza os custos associados ao consumo no Horário de Ponta (HP) e contribua para a gestão da demanda contratada da instituição (ANEEL, 2023).

1.2 Justificativa

A relevância deste estudo decorre da possibilidade de modernizar a infraestrutura de *backup* energético do data center, substituindo os *no-breaks* tradicionais por um sistema de armazenamento de energia com resposta na ordem de milissegundos e gerenciamento bidirecional ativo. Desse modo, é possível ampliar a

segurança no fornecimento de energia e a continuidade operacional do data center, além de reduzir os custos com energia elétrica, sem comprometer o desempenho dos equipamentos de tecnologia da informação.

Para verificar os benefícios dessa proposta, será analisada a implantação de um sistema de armazenamento de energia com baterias de lítio-íon no data center do CEFET-MG. A substituição dos antigos *no-breaks*, com baterias de chumbo-ácido, por inversores híbridos e baterias LFP (LiFePO_4) pode ampliar a flexibilidade de operação e contribuir para a redução de custos, uma vez que essa tecnologia suporta maiores níveis de descarga sem comprometer a vida útil.

1.3 Objetivos

Com o propósito de direcionar o desenvolvimento deste trabalho, os objetivos são apresentados da seguinte forma:

- a) Objetivo geral: analisar a viabilidade técnica e econômica da implementação de um sistema de armazenamento de energia em baterias de lítio-íon para o data center do CEFET-MG, com foco na segurança energética, na continuidade operacional e na gestão dos custos de energia elétrica da instituição.
- b) Objetivos específicos:
 - 1. Avaliar o uso do BESS como uma fonte de alimentação ininterrupta (UPS) de resposta rápida, voltada à manutenção da continuidade operacional em situações de falhas e instabilidades na rede elétrica da concessionária local.
 - 2. Investigar o carregamento das baterias em períodos de menor custo de eletricidade e o descarregamento nos horários de ponta, avaliando o potencial de redução do custo operacional por meio da arbitragem de energia e da gestão de demanda.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta a fundamentação teórica que sustenta o desenvolvimento deste trabalho e fornece a base para a compreensão técnica e econômica dos sistemas de armazenamento de energia. Inicialmente, são abordados o princípio de funcionamento e os principais componentes de um Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS), com comparação entre as baterias de chumbo-ácido e de lítio-íon, além da análise do papel dos inversores no sistema. Por fim, apresenta-se a topologia da infraestrutura de alimentação elétrica e climatização do data center do CEFET-MG, cujas características são discutidas à luz dos critérios de classificação de disponibilidade.

2.1 Princípio de funcionamento

Um BESS opera como um reservatório de energia elétrica, capaz de armazená-la durante períodos de baixa demanda ou alta geração e fornecê-la em momentos de necessidade. Seu funcionamento baseia-se na conversão reversível de energia elétrica em energia química, realizada nas células individuais. Essas células são associadas em série e em paralelo para formar módulos e, posteriormente, o banco de baterias, de modo a atingir a tensão e a capacidade desejadas (Aghmadi; Mohammed, 2024).

2.2 Principais componentes de um sistema de armazenamento de energia

A operação de um Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) baseia-se na integração entre o meio de armazenamento físico e os equipamentos de controle e conversão. O sistema é composto essencialmente por dois elementos centrais: as baterias, responsáveis por armazenar a energia, e os dispositivos eletrônicos, que supervisionam o banco e gerenciam o fluxo de potência com a rede elétrica.

2.2.1 Baterias de Chumbo-Ácido

A bateria de chumbo-ácido é uma das tecnologias de armazenamento recarregável mais antigas e consolidadas do mercado (Chalise et al., 2015). Seu princípio de funcionamento baseia-se em uma reação eletroquímica entre placas de chumbo imersas em uma solução de ácido sulfúrico. A célula é composta por um eletrodo negativo de chumbo poroso (Pb) e um eletrodo positivo de dióxido de chumbo (PbO_2), ambos mergulhados em um eletrólito de ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluído em água. Durante a descarga, ambos os eletrodos reagem com o ácido sulfúrico para formar sulfato de chumbo (PbSO_4), e a energia química armazenada é liberada como energia elétrica. No processo de carga, uma fonte de energia externa reverte essa reação, convertendo o sulfato de chumbo de volta em chumbo e dióxido de chumbo, restaurando a capacidade da bateria.

A principal vantagem das baterias de chumbo-ácido é o baixo custo inicial, além de se tratar de uma tecnologia consolidada e amplamente empregada. No entanto, apresentam desvantagens, como baixa densidade de energia, maior peso e volume, vida útil cíclica limitada e necessidade de manutenção em modelos ventilados. Além disso, são sensíveis a descargas profundas, que podem danificar permanentemente as células.

2.2.2 Baterias de Lítio-íon

A tecnologia de lítio-íon é amplamente empregada em sistemas de armazenamento de energia, desde dispositivos eletrônicos portáteis até BESS de grande escala, devido a parâmetros como alta densidade energética, elevada eficiência e maior vida útil cíclica (Martins; Araújo, 2025).

Uma célula de lítio-íon é composta por um ânodo (geralmente de grafite) e um cátodo (um óxido metálico de lítio, como o fosfato de ferro e lítio), separados por um separador poroso e imersos em um eletrólito contendo sais de lítio.

Durante a descarga, os íons de lítio (Li^+) se movem do ânodo para o cátodo através do eletrólito, enquanto os elétrons (e^-) percorrem o circuito externo, constituindo a corrente elétrica. No processo de carga, uma fonte externa força os íons e elétrons a retornarem ao ânodo, onde a energia fica armazenada.

As baterias de lítio-íon apresentam alta densidade de energia, o que contribui para menor peso e volume em comparação com tecnologias tradicionais, como as baterias de chumbo-ácido.

Também possuem elevada eficiência de ciclo, baixa necessidade de manutenção e vida útil cíclica superior, variável conforme a composição química, as condições de operação e a profundidade de descarga (Lithium Battery Tech, 2023).

Como limitações, apresentam custo inicial mais elevado e exigem um Sistema de Gerenciamento de Baterias (BMS) para monitorar parâmetros como temperatura, tensão e corrente, de modo a garantir operação segura e reduzir riscos de falhas térmicas.

2.2.3 Inversor de Frequência

Um inversor de frequência é um dispositivo eletrônico de potência cuja principal função é converter a energia elétrica de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) (Hitachi, 2026). Sua característica mais importante é a capacidade de controlar e ajustar a frequência e a tensão da energia CA de saída. Além disso, inversores mais sofisticados e bidirecionais são peças centrais em sistemas de energia renovável, como usinas solares e BESS. Nesses casos, eles atuam como a ponte inteligente que gerencia o fluxo de energia entre as baterias ou painéis (CC) e a rede elétrica (CA).

2.3 Arbitragem de energia

A arbitragem de energia é uma estratégia de operação que utiliza sistemas de armazenamento para reduzir custos com eletricidade. Consiste em armazenar energia em períodos de menor tarifa, chamados de Horário Fora de Ponta (HFP), e utilizá-la nos períodos de maior tarifa, chamados de Horário de Ponta (HP) (REPA, [s.d.]).

No caso do CEFET-MG, consumidor do subgrupo A4, atendido em 13,8 kV pela CEMIG, o horário de ponta ocorre entre 17 h e 20 h. Em maio de 2026, a tarifa no HP era de R\$ 2,65042288/kWh, enquanto no HFP era de R\$ 0,54086058/kWh (CEMIG, 2026).

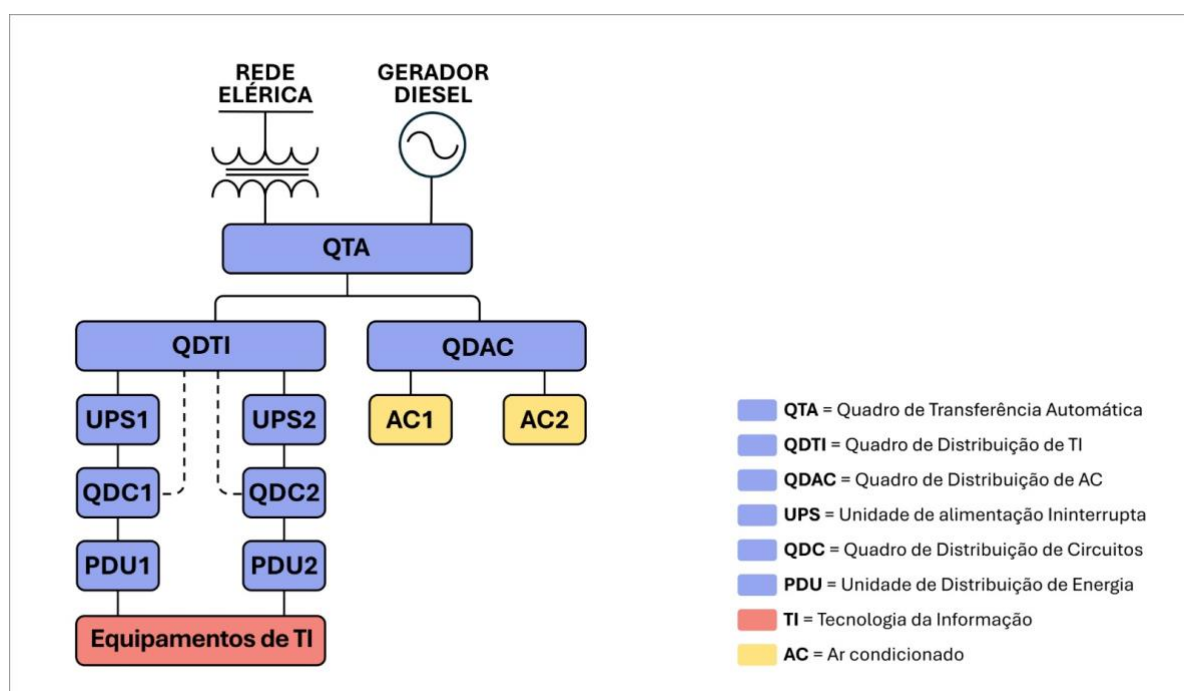
Dessa forma, se houver energia armazenada suficiente, o banco de baterias pode ser carregado no Horário Fora de Ponta e descarregado no Horário de Ponta, reduzindo o consumo de energia da rede no período de maior custo. A economia obtida corresponde à diferença entre as tarifas, descontadas as perdas do sistema.

Além da redução de custos, o sistema de armazenamento em baterias pode aumentar a flexibilidade operacional do data center e substituir a função tradicional dos *no-breaks*, atuando tanto como fonte de *backup* quanto como recurso ativo de gerenciamento energético.

2.4 Infraestrutura elétrica do data center do CEFET-MG

O sistema de energia que atende ao data center do CEFET-MG é apresentado na Figura 1. A infraestrutura de alimentação elétrica é composta por duas fontes: a rede da concessionária e um gerador a diesel. A rede elétrica constitui a fonte principal de suprimento, enquanto o gerador atua como fonte alternativa em situações de falha ou interrupção no fornecimento. Ressalta-se que este trabalho se limita à substituição direta da UPS1; por isso, o BESS implantado não contempla o circuito de refrigeração nem altera a UPS2.

Figura 1 - Sistema de energia do data center do CEFET-MG



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Após o QTA, a alimentação é distribuída para dois quadros principais: o QDTI, responsável pela alimentação dos equipamentos de tecnologia da informação (TI), e o QDAC, responsável pela alimentação dos sistemas de ar-condicionado. Essa divisão permite separar as cargas críticas de TI das cargas associadas à climatização do ambiente.

No circuito destinado aos equipamentos de TI, a alimentação proveniente do QDTI é direcionada para dois sistemas de alimentação ininterrupta, identificados como UPS1 e UPS2. Esses equipamentos têm a função de fornecer energia estabilizada e manter os equipamentos críticos em funcionamento durante o intervalo entre a falha da rede elétrica e a entrada do gerador, ou durante pequenas interrupções no fornecimento.

A partir das UPS, a energia é encaminhada para os quadros QDC1 e QDC2, que realizam a distribuição para as unidades de distribuição de energia, denominadas PDU1 e PDU2. As PDU, por sua vez, alimentam os equipamentos de TI instalados nos *racks*, como servidores, *switches* e sistemas de armazenamento.

Paralelamente, o QDAC alimenta os sistemas de climatização do *data center*, representados por AC1 e AC2. Esses equipamentos são fundamentais para manter a temperatura adequada de operação dos servidores e demais componentes eletrônicos.

Com base nessa configuração, observa-se que o data center possui redundância parcial em alguns sistemas, como a presença de dois UPS, dois circuitos de distribuição para TI e dois equipamentos de ar-condicionado. Entretanto, alguns elementos da infraestrutura o gerador, como o QTA, e os quadros principais de distribuição, permanecem sem redundância.

A instalação do data center do CEFET-MG apresenta características compatíveis com uma infraestrutura Tier II, principalmente pela presença de componentes redundantes e pela existência de uma fonte alternativa de energia (TIA, 2012; UPTIME, 2026). Contudo, por não possuir caminhos elétricos totalmente independentes em todos os níveis, a infraestrutura pode ser caracterizada como um sistema de redundância parcial.

3 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos adotados para a implantação e análise do Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) no data center do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) são sintetizados nesta seção. A abordagem combinou procedimentos práticos e analíticos e caracteriza-se como estudo de caso de natureza quantitativa, com foco na avaliação técnica e econômica da solução proposta. A metodologia está estruturada em cinco etapas:

1ª Etapa: obtenção do perfil de carga:

Mapeamento contínuo das grandezas elétricas na entrada do Quadro de Distribuição da Tecnologia da Informação (QDTI), utilizando um analisador de energia trifásico. A medição ocorreu entre 19/09/2025 e 08/10/2025.

2ª Etapa: instalação e comissionamento do BESS:

Substituição física da unidade UPS1 (três no-breaks Engetron de 2009 com baterias de chumbo-ácido) pelo BESS, concluída em 04/04/2026. O BESS implantado é composto por três inversores híbridos Deye de 8kW em paralelismo trifásico acoplados a nove módulos de baterias Unipower (LiFePO₄, 48V/100Ah).

3ª Etapa: testes práticos e ajustes:

Simulação de falhas na rede da concessionária para medir o tempo de comutação dos inversores ao assumirem a carga. Foi realizada a parametrização dos inversores para validar os ciclos diários de recarga total das baterias no Horário Fora de Ponta (HFP) e despacho ativo (arbitragem) no Horário de Ponta (HP).

4ª Etapa: coleta de dados pós-instalação:

Monitoramento do sistema em operação, realizado em duas frentes: reinstalação do analisador no quadro crítico (QDC1) em dois períodos de abril e maio de 2026 para registro de potência fornecida pela UPS1 e transientes elétricos, além da ativação da plataforma de telemetria em nuvem dos inversores Deye.

5ª Etapa: análise de viabilidade econômica:

Avaliação financeira baseada nas tarifas horárias vigentes da CEMIG para o Subgrupo A4. Utilizou-se o método do *payback* simples para determinar o tempo de retorno do investimento.

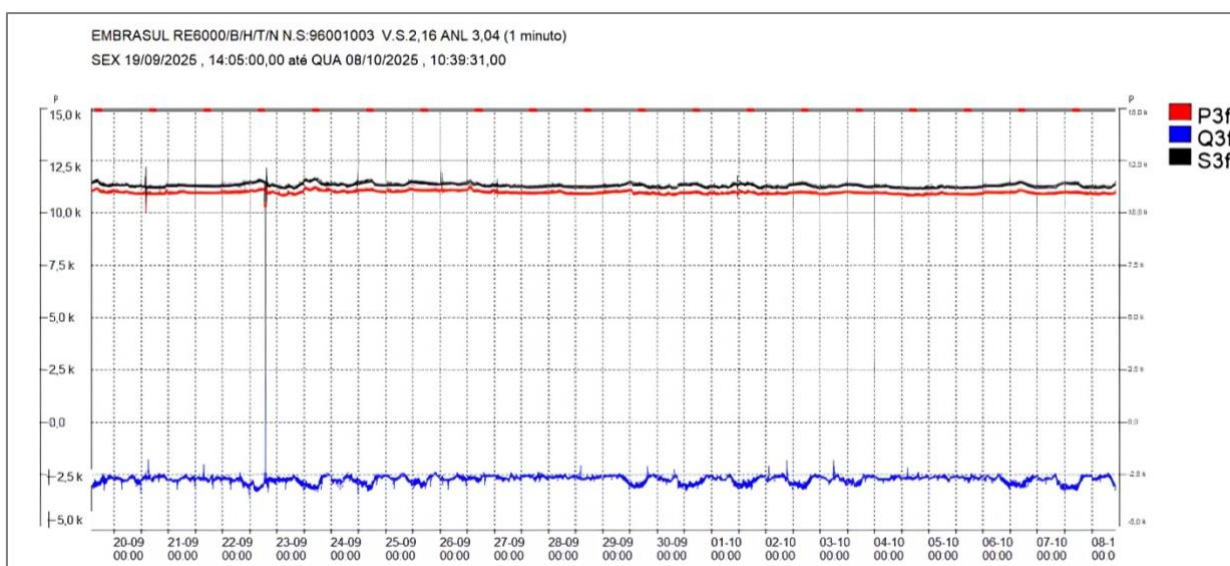
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são analisados os resultados obtidos com a implantação do BESS no data center do CEFET-MG. A discussão contempla a caracterização do perfil de carga anterior à instalação, o comportamento operacional do sistema em condições reais de uso, os dados registrados pelo analisador de energia e pelo monitoramento dos inversores e a estimativa de retorno financeiro do investimento.

4.1 Levantamento e caracterização do perfil de carga

Antes da instalação do sistema de armazenamento de energia, foi realizado o monitoramento de grandezas elétricas na entrada do quadro de distribuição principal (QDTI) do data center do CEFET-MG. Os dados foram obtidos por um analisador de energia trifásico do fabricante Embrasul, modelo RE6000, configurado com intervalo de amostragem de 1 minuto, das 14h04 do dia 19/09/2025 às 10h39 do dia 08/10/2025. A Figura 2 apresenta as leituras das potências ativa, reativa e aparente, trifásicas, nesse período de medição.

FIGURA 2 – Registros de potências trifásicas totais no QDTI do data center do CEFET-MG



Fonte: Medições realizadas pelos autores com o analisador Embrasul RE6000.

Observa-se que a demanda de potência ativa é praticamente constante, de aproximadamente 11kW. A potência aparente registrada foi de aproximadamente

11,3kVA e a potência reativa variou entre -2,5kVAr e -3kVAr. O fator de potência permaneceu entre 0,965 e 0,975 capacitivo. Esse perfil é favorável ao projeto, pois a estabilidade da demanda facilita o dimensionamento das baterias.

4.2 Instalação do sistema de armazenamento de energia

A segunda etapa do estudo consistiu no acompanhamento da instalação do BESS em substituição aos no-breaks, que constituíam a fonte de alimentação ininterrupta 1 (UPS1) do data center.

Essa UPS era atendida por três no-breaks trifásicos de 10kVA/8kW do modelo DWTT-10-Plus-PR, do fabricante Engetron, adquiridos no ano de 2009. Cada um desses no-breaks possui um banco interno de 38 baterias de chumbo-ácido de 12V e capacidade nominal de 7,2Ah (Engetron, 2009). Sob as condições normais de carga, esse sistema apresentava uma autonomia limitada, estimada em cerca de apenas 10 minutos. Essa restrição evidenciava a obsolescência do arranjo, limitando a atuação do *backup* a transientes e interrupções de curta duração.

No dia 04/04/2026, o BESS entrou em operação. A nova infraestrutura é composta por três inversores híbridos do fabricante Deye, modelo SUN-8K-SG02LP2-US-AM2, operando em paralelismo trifásico, e um banco de armazenamento contendo nove baterias de lítio Unipower UPFLP48100 (48V/100Ah cada).

A Figura 3 mostra a central elétrica do data center após a instalação dos novos equipamentos. Permanecem, ainda, os três *no-breaks* que compõem a UPS2.

Os inversores híbridos foram instalados em parede, com afastamentos laterais de 50cm entre si e das estruturas da sala. Os nove módulos de baterias foram instalados em um *rack* vertical de 44U e 570mm de profundidade. Cada módulo ocupa 3 unidades de *rack* (3U). A área de piso ocupada pelo *rack* é semelhante à de um dos *no-breaks* substituídos.

Figura 3 – Vista interna da central elétrica do *data center* do CEFET-MG



Fonte: Registro fotográfico do servidor Dângelo Silva Miranda (2026)

A Figura 3 evidencia a reorganização física da sala elétrica após a retirada dos três *no-breaks* e instalação dos novos equipamentos e demonstra que a nova configuração proporcionou melhor aproveitamento do espaço físico, redução da área ocupada pelos equipamentos no piso e maior organização dos circuitos de conexão, aspectos relevantes para a operação e manutenção do sistema.

4.3 Testes práticos e comportamento operacional do banco de baterias

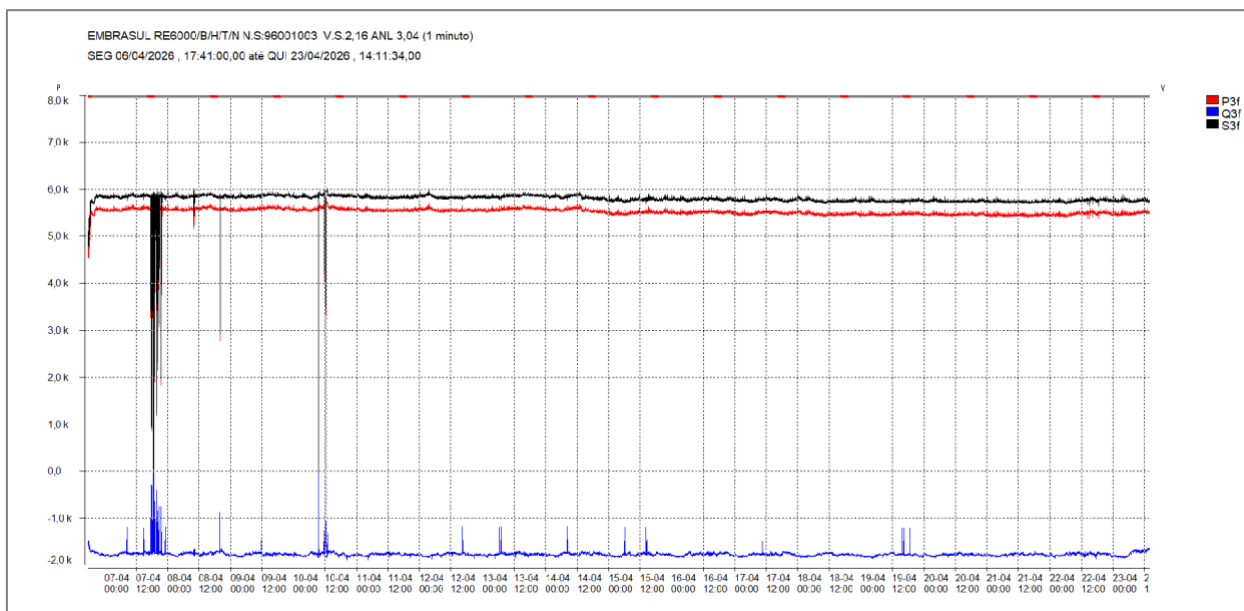
Após a finalização das etapas de instalação e comissionamento, foram conduzidos testes práticos em condições reais de operação no *data center* do CEFET-MG. O objetivo foi validar o desempenho do BESS em duas frentes de atuação: a segurança energética (função UPS) e a otimização de custos (função de arbitragem tarifária).

4.3.1 Operação como UPS e Autonomia Emergencial

Para homologar a função de alimentação ininterrupta do sistema, foram realizados testes de interrupção no fornecimento de energia elétrica. Durante esses testes, os inversores híbridos atuaram de forma imediata. O tempo de comutação para o modo isolado, com suprimento por parte das baterias, ocorreu em escala de milissegundos, mantendo a estabilidade das tensões e da frequência nos barramentos de alimentação do QDC1 (responsável pela PDU1), o que evitou qualquer reinicialização nos servidores de TI (SANTOS; SILVA, 2010). Mesmo com o desligamento da UPS2 (QDC2), os inversores conseguiram assumir os 11kW de carga do data center, sem qualquer interrupção do fornecimento de energia à PDU1.

O analisador Embrasul RE6000 foi novamente instalado na entrada do QDC1 para monitoramento de grandezas elétricas das 17h41 do dia 06/04/2026 às 14h11 do dia 23/04/2026. A Figura 4 mostra os valores de potência ativa, reativa e aparente medidos nesse período.

Figura 4 - Registros de potências trifásicas no QDC1 do data center do CEFET-MG



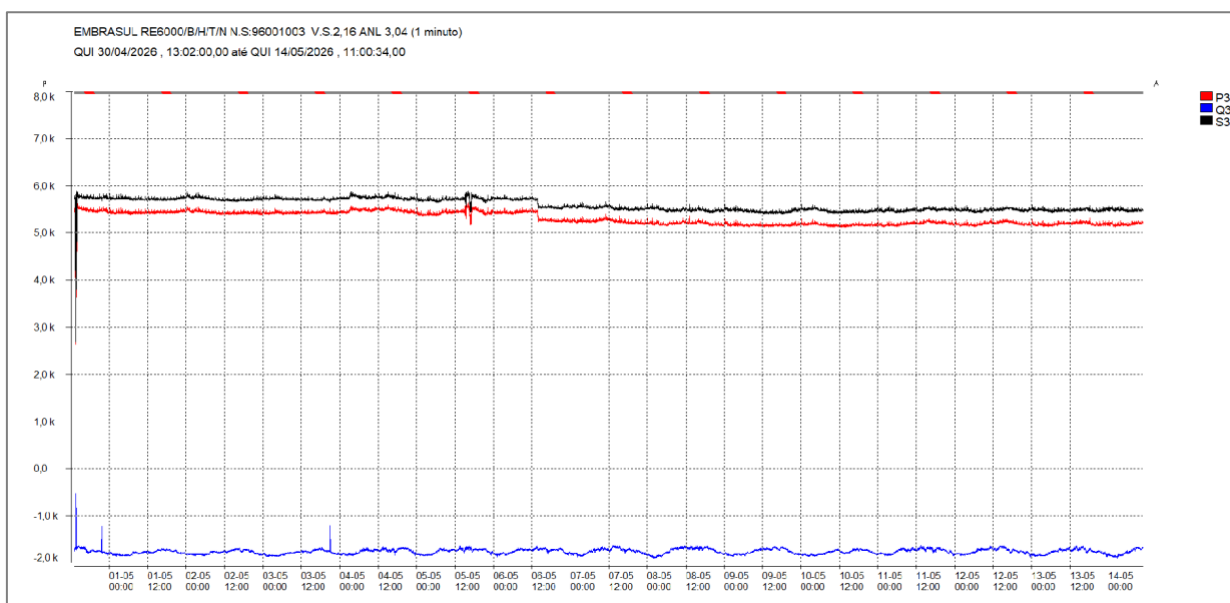
Fonte: Medições realizadas pelos autores com o analisador Embrasul RE6000.

Os registros da Figura 5, quando comparados aos da Figura 2, mostram que a carga está dividida igualmente entre as PDU1 e PDU2, sendo que a potência ativa registrada ficou em torno de 5,5kW. Exceto pelos eventos registrados nos dias 07,

08/04 e 10/04, quando foram realizados desligamentos dos equipamentos, não houve qualquer interrupção no fornecimento de energia ao QDC1.

Uma terceira aquisição de dados foi realizada no QDC1, das 13h02 do dia 30/04 às 11h do dia 14/05/2026, conforme apresentado na Figura 5, confirmando os dados obtidos anteriormente e a continuidade no fornecimento de energia.

Figura 5 - Registros de potências trifásicas no QDC1 do data center do CEFET-MG



Fonte: Medições realizadas pelos autores com o analisador Embrasul RE6000.

Nessa medição, foi configurada a função de registro de afundamentos (*sags*) e elevações (*swells*) transitórias de tensão. Os únicos registros corresponderam àqueles relacionados a desligamentos do BESS (inversores e baterias) para ajustes, realizados no dia 30/04/2026, por volta das 13h30. No restante do período de medição, com o BESS em seu estado normal de funcionamento, ficou demonstrado que não há qualquer variação de tensão que possa interferir no funcionamento do data center, o que demonstra a operação segura desse sistema de armazenamento de energia como fonte de alimentação ininterrupta (UPS).

Durante o período de operação, foram feitos ajustes ao ciclo de carga e descarga diário. Considerando a demanda da PDU1 no horário de ponta e a capacidade do banco de baterias, o melhor ajuste para o patamar de carga mínimo das baterias foi de 66%. Para evitar descarga profunda das baterias, os inversores

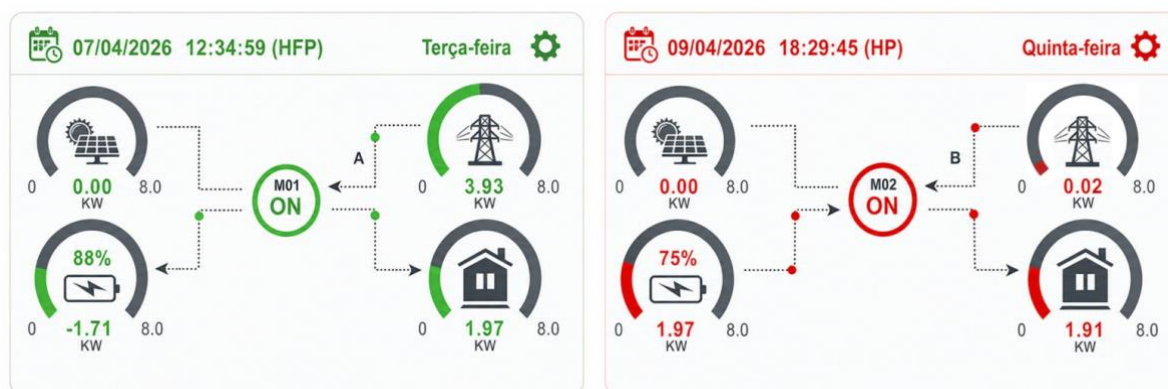
foram programados para desligar em 15%, o que deixa cerca de 50% da capacidade do banco de baterias para operar como UPS. Se a eficiência no processo de descarga for de 90%, há uma reserva de cerca de 20kWh, o que garante a operação do *data center* por quase duas horas no caso de interrupção no fornecimento de energia pela CEMIG e falha na partida do gerador.

4.3.2 Ciclo de carga e descarga diários (Arbitragem Tarifária)

Os inversores foram programados para aproveitar o diferencial econômico entre os postos tarifários horários praticados pela CEMIG.

A tela de cada inversor mostra, de forma intuitiva, os valores e sentidos do fluxo de potência instantâneos. Na Figura 6, à esquerda, há o registro da tela em um instante em que ocorre o carregamento das baterias e o fornecimento de energia ao QDC1, pela rede elétrica. Na Figura 6, à direita, o registro de um instante em que as baterias fornecem energia ao QDC1, sendo a demanda da rede reduzida praticamente a zero.

Figura 6 - Fluxo de energia em um dos inversores do data center do CEFET-MG no horário fora de ponta (HFP) e no horário de ponta (HP)



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em termos da utilização de energia elétrica, o data center opera em dois ciclos:

- Ciclo de Carga: durante o horário fora de ponta (HFP), o data center opera importando a potência necessária diretamente da rede elétrica da concessionária. Simultaneamente, os inversores gerenciam o carregamento controlado das baterias de lítio-íon até que o banco atinja 100% de seu Estado

de Carga (SoC). Esse processo é executado no período diurno, quando o custo da energia é de R\$ 0,54086058/kWh e a usina fotovoltaica instalada no campus onde se encontra o *data center* está em funcionamento.

- Ciclo de descarga / arbitragem: ao iniciar o horário de ponta (HP), compreendido entre 17h e 20h, quando o custo da energia é de R\$2,65042288/kWh, os inversores ativam o modo de despacho e o banco de baterias passa a suprir a PDU1 do *data center*. A conexão à rede elétrica permanece com uma demanda muito baixa, permitindo a transição rápida em caso de falha nas baterias. Nessa operação diária, o banco descarrega de 100% até 66% de SoC, resultando em uma profundidade de descarga (DoD) controlada de apenas 34%, com a ressalva de que uma descarga maior (atingindo o limite de 15% de SoC) ocorrerá apenas em situações de interrupção prolongada no fornecimento da concessionária.

Os inversores permitem a programação de valores-alvo de carga das baterias em até seis períodos diários. A Figura 7 mostra, à esquerda, a programação atual e, à direita, os dados do sistema de gerenciamento das baterias (BMS) em um momento de repouso (SoC programado para 66%). Os patamares de carga foram escolhidos de modo que o tempo de permanência das baterias em valores de tensão mais elevados (próximos ao SoC de 100%) fosse minimizado, o que garante maior vida útil.

Figura 7 – Programação diária e estado de carga das baterias do data center do CEFET-MG



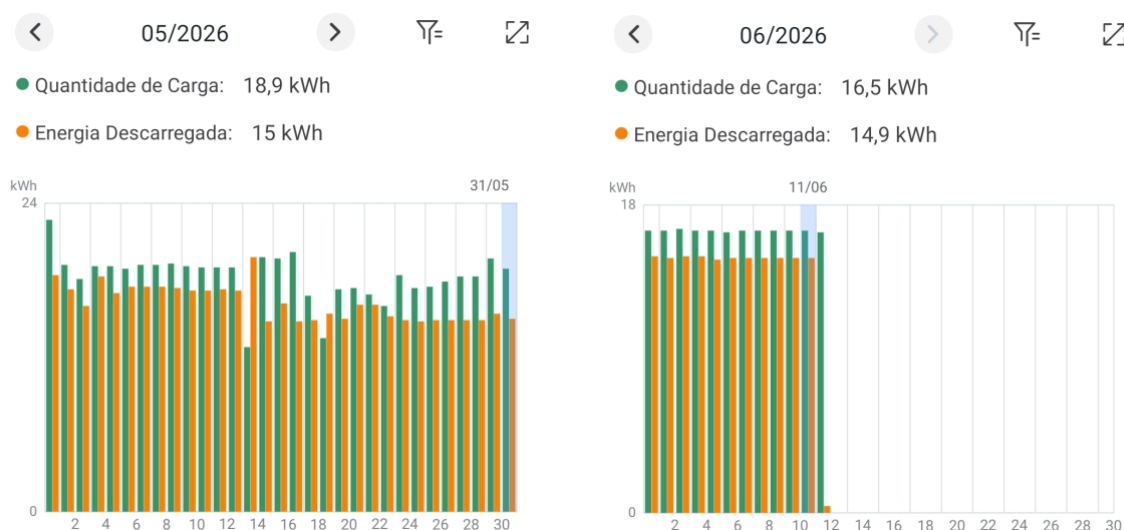
Fonte: Registros fotográficos dos autores (2026).

4.4 Monitoramento de carga e descarga das baterias e análise de perdas

Ao final de abril de 2026, foi colocada em operação a plataforma de monitoramento em tempo real dos inversores Deye, o que possibilitou a realização de ajustes na programação de carga e descarga à demanda da PDU1. Os dados coletados do mês de maio de 2026 até 12/06/2026 permitiram mapear as trocas de energia realizadas e quantificar as perdas associadas aos processos de conversão do BESS.

A Figura 8 apresenta os valores de energia de carga e descarga nos dias do mês de maio até 12/06/2026. Em maio, há certa variação nos valores em razão do processo de busca do melhor ajuste da descarga à demanda do data center no horário de ponta. Também há influência da atualização do firmware das baterias, realizada em 14/05/2026, que afetou as leituras do estado de carga (SoC) até o efetivo balanceamento das células. Nos registros de junho, observa-se maior estabilidade dos valores de carga e descarga.

Figura 8 – Energia de carga e descarga das baterias do data center do CEFET-MG no período do dia 01/05/2026 a 12/06/2026.



Fonte: Dados da plataforma de monitoramento do inversor Deye obtidos em 12/06/2026.

Em maio, a energia descarregada foi de 503,8kWh, enquanto a energia obtida da rede elétrica para o processo de carga foi de 567,7kWh. Em junho, até o dia

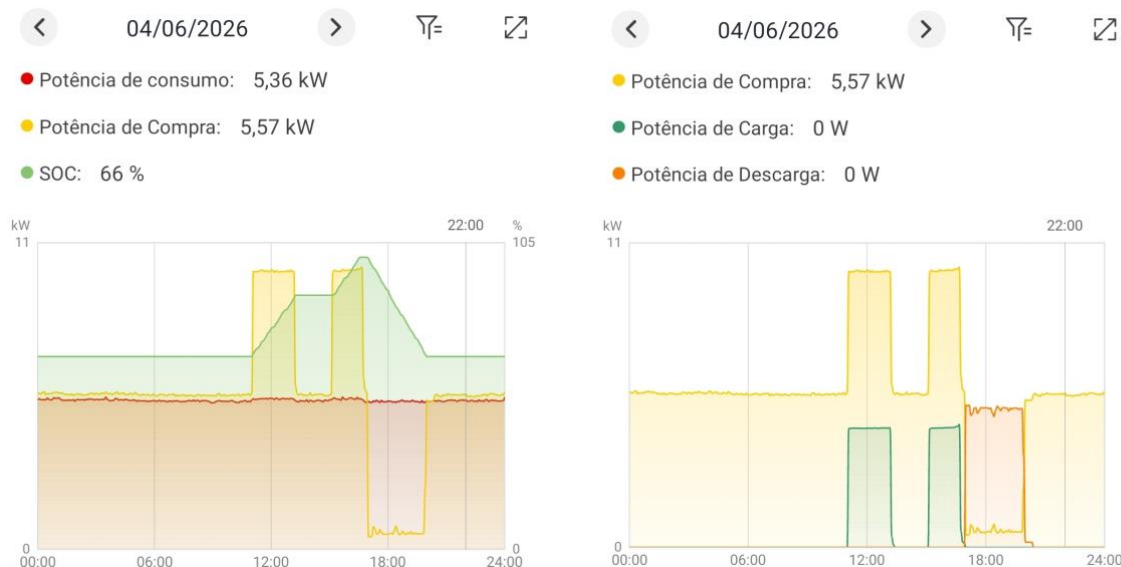
11/06/2026, os valores foram de 163,7kWh e 179,6kWh, respectivamente. A relação entre a energia de descarga e a energia de carga expressa a eficiência do processo, tendo sido, no mês de maio, de 88,74% e, nos 11 primeiros dias de junho, de 91,15%.

As diferenças entre os valores de energia na carga e descarga decorrem de três fenômenos físicos principais:

- a) Efeito Joule nos condutores: a circulação das correntes elétricas necessárias para suprir a demanda encontra resistência ôhmica natural nos cabos de interligação de cobre, barramentos, disjuntores e conexões elétricas do painel, dissipando uma fração da potência sob a forma de calor (D'AVILA; BURANI; GRIMONI, 2007).
- b) Chaveamento dos semicondutores do inversor: o processo de conversão bidirecional (retificação CA/CC durante a carga e inversão CC/CA durante a descarga) é realizado por transistores de potência (ou IGBT, de *Insulated Gate Bipolar Transistors*) operando em alta frequência. O chaveamento rápido desses componentes eletrônicos e a atuação dos filtros magnéticos internos geram perdas térmicas inevitáveis no circuito de potência dos inversores Deye (GAZZONI, 2011).
- c) Resistência interna eletroquímica do banco: durante os ciclos de movimentação de carga, os íons de lítio enfrentam uma resistência física ao se deslocarem através do eletrólito e da barreira separadora entre o ânodo e o cátodo das células. Esse fenômeno gera um leve aquecimento interno nas baterias, convertendo energia elétrica em perdas térmicas (SILVA, 2023).

A Figura 9 apresenta os dados de monitoramento para o dia 04/06/2026. À esquerda, a potência de consumo, a potência de compra e o estado de carga (SoC) e, à direita, a potência de compra e as potências de carga e descarga.

Figura 9 – Energia de carga e descarga das baterias do data center do CEFET-MG em 04/06/2026



Fonte: Dados da plataforma de monitoramento do inversor Deye obtidos 12/06/2026.

Os valores aproximados de potência de consumo, de fornecimento da rede (compra), de carga e de descarga ao longo de um dia podem ser sintetizados na Tabela 1, na qual é feita uma estimativa da eficiência em cada período.

Tabela 1 – Valores aproximados de potência e eficiência ao longo de um dia

Período	Potência de consumo	Potência de carga	Potência de descarga	Potência de compra	Eficiência estimada
0 às 11h	5,4kW	-	-	5,6kW	96,4%
11 às 13h15	5,4kW	4,3kW	-	10kW	97%
13h15 às 15h10	5,4kW	-	-	5,6kW	96,4%
15h10 às 16h45	5,4kW	4,3kW	-	10kW	97%
16h45 às 17h	5,4kW	-	-	5,6kW	96,4%
17 às 20h	5,4kW	-	5kW	0,7kW	94,7%
20 às 24h	5,4kW	-	-	5,6kW	96,4%

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

A Tabela 1, em consonância com as curvas da Figura 9, evidencia a eficácia operacional da estratégia de gerenciamento energético parametrizada nos inversores. O algoritmo de despacho atua de forma rigorosa nos períodos programados: o banco de baterias absorve potência da rede fora do horário de ponta (11h às 13h15 e 15h10 às 16h45) e descarrega durante o horário de ponta (17h às 20h), reduzindo a demanda da concessionária de 5,6kW para apenas 0,7kW. Adicionalmente, os índices de

eficiência estimada mantiveram-se em patamares elevados (entre 94,7% e 97%), o que atesta o alto rendimento e valida a viabilidade técnica do BESS em reduzir os custos elétricos sob condições reais de operação.

4.5 Análise de Viabilidade Econômica

A última etapa deste trabalho consiste na avaliação da viabilidade econômica do BESS implementado no data center do CEFET-MG, quantificando o retorno financeiro sob a ótica da estrutura tarifária horária do Grupo A (Subgrupo A4) da concessionária local (CEMIG).

As informações para os dias do mês de junho apresentadas na Figura 8 destacam os valores de energia de carga e descarga para o dia 11/06/2026, em 16,5kWh e 14,9kWh, respectivamente. A energia de descarga pode ser considerada como o valor de compra evitado pela presença do BESS no horário de ponta e representa cerca de R\$39,49 (tarifa de R\$2,65042288/kWh). Essa energia, mais as perdas, é a energia de carga, adquirida no horário fora de ponta (tarifa de R\$0,54086058/kWh), ao custo total de aproximadamente R\$8,92.

A receita do sistema provém do diferencial de custos obtido por meio da arbitragem energética diária nos dias úteis, que é de cerca de R\$30,57 (R\$39,49 - R\$8,92). Essa dinâmica se restringe a esse período operacional, dado que em fins de semana e feriados nacionais a diferenciação tarifária horária deixa de existir, aplicando-se a tarifa fora de ponta de maneira contínua. Em um ano (cerca de 250 dias úteis), o retorno esperado é de aproximadamente R\$7.600.

O custo total para a aquisição e instalação física dos três inversores híbridos e das nove baterias de lítio-íon totalizou R\$96.000. Para determinar o tempo de recuperação do capital investido, considerando que as tarifas de energia são corrigidas por índices inflacionários oficiais, aplicou-se o método do *payback* simples, expresso pela Equação (1):

$$Payback = \frac{Investimento\ Inicial}{Economia\ Anual} = \frac{96.000}{7.600} = 12,7\ anos\ (1)$$

No cenário de operação, o banco de baterias realiza uma descarga diária de cerca de 34% de sua capacidade. Isso equivale a um ciclo de carga e descarga

completo a cada 3 dias. De acordo com as especificações do fabricante (Unicoba S/A, 2024), o banco de baterias de lítio possui uma durabilidade projetada superior a 3.000 ciclos operacionais, o que equivale, nas condições de operação no *data center* do CEFET-MG, a uma vida útil estimada de mais de 24 anos.

O tempo de retorno do investimento, estimado em menos de 13 anos, mostra-se viável e atrativo quando confrontado com a expectativa de vida útil do BESS em análise.

A Tabela 2 consolida os indicadores técnicos e financeiros reais obtidos nesta fase do projeto elétrico do data center do CEFET-MG.

Tabela 2 – Parâmetros econômico-financeiros do BESS implementado

Parâmetro Avaliado	Valor Real Obtido
Investimento inicial total	R\$ 96.000
Energia diária arbitrada (média)	~14,9kWh/dia
Economia financeira diária	~R\$ 30,57/dia útil
Economia financeira anual projetada	~R\$ 7.600/ano
Tempo de Retorno (<i>Payback</i> Simples)	> 13 anos (12,7 anos)
Vida Útil Estimada do Banco	> 3.000 ciclos (~24 anos)

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Além desses aspectos, os *no-breaks* tradicionais com baterias de chumbo-ácido demandariam várias substituições de seus bancos de baterias ao longo do horizonte de retorno do investimento do BESS devido à sua baixa resistência à ciclagem profunda. Essa necessidade geraria custos recorrentes de manutenção. Assim, a implantação do BESS no data center do CEFET-MG valida-se tanto pelo ganho de segurança energética (autonomia estendida) quanto pela sustentabilidade econômica da gestão do consumo de energia.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou, de forma prática e aplicada, a viabilidade técnica e econômica da implantação de um Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS), baseado em baterias de lítio-íon, para a modernização da infraestrutura do *data center* institucional do CEFET-MG. A substituição da antiga topologia de *no-breaks* com baterias de chumbo-ácido por um arranjo composto por inversores híbridos e baterias de lítio-íon mostrou-se adequada aos requisitos de segurança operacional e eficiência energética exigidos por infraestruturas críticas de tecnologia da informação.

Durante o comissionamento, os inversores híbridos demonstraram compatibilidade com a rede da concessionária e com a comutação automática para o grupo gerador a diesel, por meio do Quadro de Transferência Automática (QTA), com substituição adequada dos *no-breaks* responsáveis pela alimentação da PDU1 do *data center*.

Os dados obtidos com o analisador de energia indicaram um perfil de carga de 5,5kW para cada PDU, totalizando 11kW. A calibração dos parâmetros operacionais permitiu que a janela diária de descarga para arbitragem atuasse entre 100% e 66% de SoC, com redução do consumo de energia da rede em cerca de 14,9kWh por dia no horário de ponta e aquisição de 16,5kWh no horário fora de ponta.

Adicionalmente, validou-se uma reserva operacional de 51% de SoC, correspondente à faixa entre 66% e 15%, destinada à função de UPS. Essa reserva garante autonomia emergencial de quase duas horas em caso de interrupção no fornecimento da rede elétrica, associada à eventual falha na partida do gerador a diesel.

A comparação entre os cenários evidencia a relevância da modernização realizada. O arranjo anterior, baseado em *no-breaks* com baterias de chumbo-ácido, apresentava capacidade cíclica limitada, menor eficiência e autonomia crítica de apenas 10 minutos. Em contrapartida, a nova infraestrutura, com baterias de lítio-íon, ampliou a capacidade disponível e elevou a autonomia emergencial para quase duas horas de suporte contínuo à carga de 11kW. Além dos ganhos em confiabilidade e gestão de custos, o sistema implantado constitui um laboratório de pesquisa aplicada

no CEFET-MG, ao permitir a coleta contínua de dados em tempo real. Essa estrutura pode subsidiar novos estudos sobre qualidade da energia, degradação de células de lítio e estratégias avançadas de gestão energética.

Sob a perspectiva econômica, os indicadores financeiros demonstraram a atratividade do investimento inicial de R\$96.000. A estratégia de arbitragem propiciou economia anual da ordem de R\$7.600, com retorno esperado em menos de 13 anos, prazo inferior à vida útil prevista para os módulos de baterias.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar a conexão de módulos fotovoltaicos aos inversores híbridos, o que permitiria utilizar energia solar no carregamento do banco de baterias e reduzir a dependência da rede da concessionária. Recomenda-se, ainda, analisar a aplicação dessa tecnologia à UPS2, em substituição aos *no-breaks* remanescentes.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Bibliografia temática:** armazenamento de energia: usinas híbridas e usinas reversíveis e aplicação em sistemas de potência. Brasília: ANEEL; CEDOC, 2023. Disponível em: <https://biblioteca.aneel.gov.br/>. Acesso em: 10 jun. 2026.

AGHMADI, A.; MOHAMMED, O. A. Energy Storage Systems: Technologies and High-Power Applications. **Batteries**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 141, 2024. DOI: 10.3390/batteries10040141.

BRAGA, G.; MONTIEL, P.; TREMURA, R. F. **Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS):** Implementação em Pequenas e Grandes Gerações. [S. l.]: Ânima Educação, 2025. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/>. Acesso em: 10 jun. 2026.

CHALISE, S. et al. **Data center energy systems:** current technology and future direction. In: IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2015, Denver. Proceedings [...]. Piscataway: IEEE, 2015. p. 1-5.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). **Tarifas e Valores de fornecimento:** Grupo A (Alta Tensão) – Modalidade Tarifária Horária Azul e Verde. Belo Horizonte: CEMIG, 2026. Disponível em: <https://www.cemig.com.br>. Acesso em: 10 jun. 2026.

D'AVILA, R.S.; BURANI, G. F.; GRIMONI, J.A. B. Análise de perdas em instalações elétricas residenciais. In: **Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica** (SNPTEE), 2007, Rio de Janeiro. Anais [...] Rio de Janeiro: SNPTEE, 2007. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/ANÁLISE-DE-PERDAS-EM-INSTALAÇÕES-ELÉTRICAS-RESIDENCIAIS.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Sistemas de armazenamento em baterias:** aplicações e questões relevantes para o planejamento. Rio de Janeiro: EPE; MME, 29 nov. 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3syTbss>. Acesso em: 4 jul. 2025.

ENGETRON ENGENHARIA ELETRÔNICA. **Manual Técnico:** Sistema de Energia Ininterrupta (UPS) DWTT-10-Plus-PR. Contagem: Engetron, 2009.

GAZZONI, J. C. **Comparação de perdas em semicondutores em inversores com comutação suave.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/227/1/PB_PPGEE_M_Gazzoni,%20Jean%20Carlos_2011.pdf. Acesso em: 14 jun. 2026.

GOVINDAN, S. Benefits and Limitations of Tapping into Stored Energy for Datacenters. In: **ISCA**, 11., 4-8 jun. 2011, San Jose, California, USA. Proceedings [...]. San Jose: [s. n.], 2011. p. 341-351.

HITACHI ENERGY. **Battery Power Conversion System (PCS)**. [S. l.], [2026]. Disponível em: <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/power-conversion/battery-power-conversion-system-pcs>. Acesso em: 10 jun. 2026.

INSTITUTO METRÓPOLE DIGITAL (IMD). **Disponibilidade, Confiabilidade e Redundância**: Normas e Classificações de Data Center. Metrôpole Digital, Natal, [2026]. Disponível em: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/4/67/2/8>. Acesso em: 10 jun. 2026.

LITHIUM BATTERY TECH. **Pros and Cons of Lithium-ion Batteries**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.lithiumbatterytech.com/pt/pros-and-cons-of-lithium-ion-batteries/>. Acesso em: 8 mar. 2026.

MARTINS, P. R.; ARAÚJO, S. G. de. **BESS: Tecnologias, Aplicações e Tendências**. Goiânia: Centro de Excelência em Hidrogênio e Tecnologias Energéticas Sustentáveis (CEHTES); UFG, ago. 2025. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2025/09/Artigo-CEHTES-BESS-Tecnologias-Aplicacoes-e-Tendencias.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2026.

SANTOS, M. F.; SILVA, S. R. **Sensibilidade de microcomputadores a variações de tensão de curta duração**. Belo Horizonte: CEFET-MG/UFG, 2010. Trabalho técnico.

SILVA, C. T. **Sistema de gerenciamento de baterias de lítio com estimação de estado de carga e estado de saúde**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-04042023-080719/publico/CynthiaThamiresdaSilvaCorr22.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026.

TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY ASSOCIATION. **ANSI/TIA-942-A**: Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers. Arlington: TIA, 2012.

UNIPOWER BATERIAS. **Especificação Técnico-Comercial**: Módulo de Bateria de Íons de Lítio (LiFePO₄) UPFLP48100 (48V / 100Ah 48V/100Ah). São Paulo: Unicoba S/A, 2024.

UPTIME. Certificação Tier. **Uptime Institute**, New York, 2026. Disponível em: <https://pt.uptimeinstitute.com/tiers>. Acesso em: 10 jun. 2026.



ATA N° 22/2026 - DEE (11.56.08)

N° do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Belo Horizonte-MG, 22 de junho de 2026.

ATA DE DEFESA DO PROJETO FINAL DE CURSO

Aos 19 dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e seis, realizou-se a sessão pública de defesa do projeto final de curso intitulado “**Armazenamento de Energia em Data Center Institucional: Segurança Energética, Substituição de No-Breaks e Análise Econômica**”, apresentado por **Arthur Vieira Santos**, matrícula 201722060271 do **Curso de Engenharia Elétrica – CNG**. Os trabalhos foram iniciados às 11h pelo Professor (Orientador) Marcos Fernando dos Santos, do Departamento de Engenharia Elétrica, presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros: Engenheiro Vagner Alves de Almeida, da Prefeitura do CEFET-MG, Professor Sandro Renato Dias, do Departamento de Computação e Professora Úrsula do Carmo Resende, do Departamento de Engenharia Elétrica. Após a exposição oral, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que decidiram por **aprovar** o trabalho. Para constar, redigiu-se a presente ata que, após aprovada por todos os presentes, será assinada pelos membros da banca e pelo Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica.

Belo Horizonte, 19 de junho de 2026

(Assinado digitalmente em 23/06/2026 14:58)

MARCOS FERNANDO DOS SANTOS
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEE (11.56.08)
Matrícula: ###730#7

(Assinado digitalmente em 23/06/2026 16:46)

SANDRO RENATO DIAS
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DECOM (11.56.03)
Matrícula: ###444#8

(Assinado digitalmente em 23/06/2026 13:16)

URSULA DO CARMO RESENDE
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CDIP (11.52.11)
Matrícula: ###434#7

(Assinado digitalmente em 23/06/2026 11:40)

VAGNER ALVES DE ALMEIDA
CHEFE - TITULAR
DIMAN (11.54.02.02)
Matrícula: ###527#3

(Assinado digitalmente em 23/06/2026 12:08)

ARTHUR VIEIRA SANTOS
DISCENTE
Matrícula: 2025#####9

Processo Associado: 23062.027369/2026-88

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: 22, ano: 2026, tipo: **ATA**, data de emissão: **22/06/2026** e o código de verificação: **39feecb01**