XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8971

O dado já existe: *digital shadow* energético em campus universitário

The data already exists: an energy digital shadow in a public university campus

João Bosco Pinheiro Dantas Filho
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza| Brasil | arquibosco@alu.ufc.br
Artur de Almeida Evangelista
Instituto Federal do Ceará | Fortaleza| Brasil | arturevang@gmail.com
Luis Felipe Cândido
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza| Brasil | luisfcandido2015@gmail.com
José de Paula Barros Neto
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza| Brasil | barrosneto@gercon.ufc.br

Resumo

A gestão energética em instituições públicas de ensino superior frequentemente opera em regime reativo, com gestores tomando ciência de desperdícios e penalidades apenas no recebimento da fatura mensal. Embora a infraestrutura de telemedição das concessionárias já produza dados contínuos de consumo, carece-se de um método sistemático e de baixo custo para transformá-los em inteligência acionável. Este trabalho propõe e valida um modelo de *digital shadow* energético para edifícios públicos, baseado no cruzamento entre séries temporais de telemedição e faturas comerciais mensais, prescindindo de sensores adicionais, modelos BIM ou plataformas proprietárias. O modelo foi aplicado a um campus universitário público brasileiro, utilizando 13 meses de telemedição e 22 faturas. A abordagem quantificou uma carga basal persistente de 62 kW nas madrugadas sem correlação com atividades acadêmicas. O estudo demonstra que a infraestrutura de medição legada das distribuidoras é suficiente para gerar diagnósticos energéticos replicáveis na rede pública de ensino, transformando dados brutos já disponíveis em ferramenta de gestão imediata.

Palavras-chave: *digital shadow*. gestão energética. telemedição. séries temporais. edifícios públicos.

Abstract

Energy management in public higher education institutions often operates reactively, with managers becoming aware of waste and penalties only upon receiving monthly bills. Although utilities' telemetry infrastructure already produces continuous consumption data, there is a lack of a systematic, low-cost method to transform it into actionable intelligence. This paper proposes and validates a low-cost energy digital shadow model for public buildings, based on cross-referencing smart metering time series and monthly commercial utility bills, requiring no additional sensors, BIM models, or proprietary platforms. The model was applied to a Brazilian public university campus, using 13 months of telemetry data and 22 utility bills. The approach quantified a persistent baseload of 62 kW during overnight hours showing no correlation with academic activities. The study demonstrates that legacy metering infrastructure is sufficient to generate replicable energy diagnostics for the public education network, transforming raw available data into an immediate management tool.

Keywords: digital shadow. energy management. smart metering. time series. public buildings.

DANTAS FILHO, J. B. P.; EVANGELISTA, A. A.; CÂNDIDO, L. F.; BARROS NETO, J. P. O dado já existe: *digital shadow* energético em campus universitário. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

INTRODUÇÃO

A rede federal de educação brasileira opera mais de 600 unidades, todas sujeitas às mesmas obrigações tarifárias e com medição por telemedição das concessionárias. Contudo, a maioria das instituições de ensino superior ainda opera em modo reativo [1] : os gestores tomam conhecimento de penalizações apenas quando a fatura chega, e não quando o evento de desperdício ocorre. A medição contínua e a definição de uma linha de base são pré-requisitos para qualquer sistema de gestão energética funcional [2]. Estudos recentes de revisão sobre eficiência energética em edifícios públicos reforçam que a medição e o monitoramento contínuo são as ações iniciais indispensáveis para a identificação de padrões de consumo e a implementação de medidas corretivas [3]. No contexto das Instituições de Ensino Superior (IES), pesquisadores apontam que a digitalização via medidores inteligentes e a integração de dados são desafios críticos para a implementação de Sistemas de Gestão Energética (EnMS) eficazes [2]. Embora o portal de telemedição já forneça essa medição contínua, carece-se na prática de um método sistemático para transformá-la em diagnóstico operacional acionável.

Na literatura internacional, a pesquisa sobre gêmeos digitais energéticos concentra-se majoritariamente em sistemas dependentes de modelos BIM *(Building Information Modeling). Isso* gera um entrave prático, motivando o chamado explícito por abordagens que não dependam de BIM para o ambiente construído existente [4]. Embora pesquisadores reforcem que a qualidade e a interoperabilidade dos dados são os desafios centrais dessa transição [5], os casos publicados ainda não exploram o cruzamento sistemático entre a série técnica de telemedição da concessionária e os dados comerciais da fatura como um mecanismo conjunto de diagnóstico. O presente trabalho preenche essa lacuna ao operar exclusivamente com dados já produzidos pela infraestrutura instalada, sem custos adicionais de instrumentação.

Este artigo demonstra que o cruzamento entre a telemedição da distribuidora e o histórico de faturas comerciais constitui um *digital shadow* energético operacional para campi universitários — sem necessidade de modelo BIM, sensores adicionais ou plataformas proprietárias. Adota-se o conceito de *digital shadow* como sistema de representação digital alimentado por fluxo unidirecional de dados reais [6], aplicado ao diagnóstico e apoio à decisão. O estudo de caso utiliza 13 meses de telemedição (resolução de 15 minutos) e 22 faturas mensais de um campus público brasileiro (março/2025 a abril/2026), alinhando-se a estudos internacionais que demonstram a eficácia de dados históricos de faturas para identificação de padrões de consumo em edifícios institucionais [7,8]. A progressão de um *digital shadow* para um *digital twin* completo é incremental [9]; este trabalho estabelece a primeira etapa dessa progressão com dados legados, oferecendo uma contribuição metodológica replicável, sem investimentos iniciais em infraestrutura tecnológica.

DIGITAL *SHADOW* APLICADO À GESTÃO DE ENERGIA

A literatura de modelagem digital distingue três níveis de maturidade na representação virtual de sistemas físicos: o modelo digital (sem integração automatizada), o digital *shadow* (caracterizado por um fluxo unidirecional de dados,

sem atuação automatizada), *o digital twin* [10]. É fundamental entender que enquanto o modelo digital restringe-se à representação estática de um componente físico, e *o digital shadow* estabelece fluxo automático de dados do mundo físico para o virtual, o *digital twin* pressupõe comunicação bidirecional entre ambos os domínios [KRITZINGER et al., 2018; [10,11]. Vale ressaltar que um *digital twin* transcende o mero monitoramento energético em tempo real; ele incorpora fluxos bidirecionais que permitem simulações complexas, testes de cenários preditivos, otimização contínua de processos e o controle autônomo e dinâmico das instalações. A progressão entre esses níveis depende intrinsecamente da qualidade e da continuidade dos dados coletados [6]. No contexto da infraestrutura elétrica, o medidor da distribuidora registra o estado energético em intervalos de 15 minutos sem controle bidirecional de atuação — uma condição classificada como um digital *shadow* operacional, que se mostra conceitualmente suficiente para o diagnóstico e a detecção de anomalias.
No campo dos sistemas fotovoltaicos, a aplicação de gêmeos digitais tem sido amplamente documentada para a execução de diagnósticos dinâmicos de falhas e análise de desempenho dos módulos[12,13], ainda que esses estudos frequentemente exijam infraestrutura adicional de sensoriamento. O presente trabalho diferencia-se ao operar exclusivamente com a infraestrutura de medição legada da concessionária.
Contudo, a transição de edifícios existentes para essa realidade digital enfrenta barreiras práticas. A interoperabilidade entre sistemas constitui o principal entrave para a implementação de gêmeos digitais [5]. Diante disso, formulou-se um chamado explícito pelo desenvolvimento de métodos que não dependam exclusivamente do BIM como fonte primária de dados [4], especialmente para o patrimônio público em operação. No cenário nacional, estudos ratificam esse desafio ao demonstrarem que mesmo a modelagem geométrica básica — o escaneamento tridimensional de ativos públicos — exige alto esforço manual de modelagem, gerando dados estáticos sujeitos à obsolescência imediata por reformas de leiaute [14]. Além disso, a nuvem de pontos não captura infraestruturas embutidas ocultas, e a gestão pública frequentemente carece de equipes de TI para gerenciar fluxos dinâmicos.

Essa lacuna tecnológica reflete-se diretamente nos Sistemas de Gestão Energética (EnMS) de instituições de ensino. Pesquisadores identificam que a medição contínua, a definição de linha de base e a previsão de carga são funções centrais de um EnMS funcional [1,2]. Revisões recentes sobre gestão energética em IES apontam que a adoção de indicadores-chave de desempenho é essencial para o monitoramento e a melhoria contínua da eficiência energética, sendo o fator de carga e o consumo específico por área (kWh/m²) métricas amplamente consolidadas na literatura [2,15]. Essa postura reativa impede a identificação de disfunções operacionais severas, como a carga fantasma e os picos de demanda. Estudos classificam o consumo fora do horário de ocupação (carga fantasma) como uma anomalia frequente em edifícios institucionais [16], cuja identificação pode ser automatizada por meio de limiares estatísticos, como o uso em períodos de inatividade (domingos e feriados).

Paralelamente, na gestão da demanda máxima, a identificação dos picos de consumo é realizada mapeando-se a curva de carga diária através dos dados de telemedição a

cada 15 minutos, o que permite isolar e monitorar as faixas horárias de maior solicitação [17]. Uma vez diagnosticados, a resolução ou mitigação prática desses picos requer o deslocamento de cargas controláveis (*load shifting*) — como o remanejamento do acionamento de sistemas de climatização para horários fora de ponta — ou a adoção de sistemas de armazenamento [18]. A análise do fator de carga, que expressa a relação entre a demanda média e a demanda máxima de uma instalação, é uma ferramenta fundamental para avaliar a eficiência do perfil de consumo e identificar oportunidades de otimização contratual [19].

Para solucionar esse emaranhado de desafios sem incorrer em custos com plataformas proprietárias, surge a oportunidade de explorar dados subutilizados. Enquanto a literatura tradicional frequentemente trata a fatura mensal como um dado comercial agregado que obscurece a dinâmica real do consumo, negligencia-se o fato de que ela retém informações contratuais indispensáveis (tarifas aplicadas, limites acordados e penalizações) que não constam na série temporal da telemedição. O cruzamento analítico proposto neste trabalho transforma a fatura em um instrumento de validação e a telemedição em um vetor de explicação causal. Essa abordagem responde diretamente ao desafio de interoperabilidade e aproveitamento de infraestrutura legado apontado na literatura [5], estabelecendo um *digital shadow* de baixo custo e alta aplicabilidade prática.

MÉTODO

A estratégia metodológica adotada foi o estudo de caso, escolhido por sua adequação à investigação de fenômenos contemporâneos em contextos reais, nos quais o pesquisador não possui controle sobre as variáveis envolvidas [20]. Esta abordagem não visa generalização estatística, mas sim generalização analítica, permitindo que o processo metodológico seja replicado em outros campi ou instituições federais com infraestrutura de medição similar [21].

FONTES E NATUREZA DOS DADOS

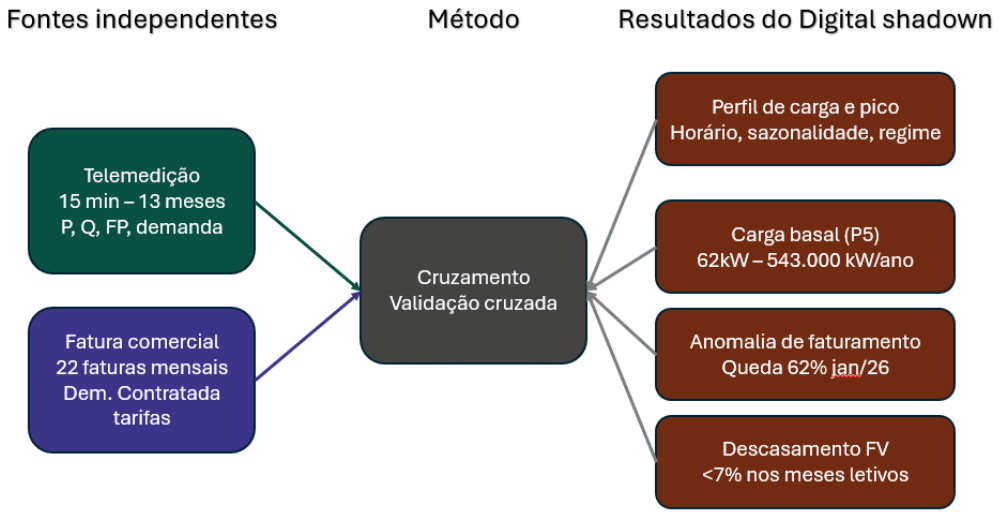
Este trabalho utilizou duas fontes independentes de dados de um campus universitário público brasileiro. A primeira é a série de telemedição da distribuidora local, registrada em intervalos de 15 minutos, contendo energia ativa e reativa, demanda de ponta e fora de ponta, geração fotovoltaica excedente e fator de potência por fase. A segunda é o histórico de 22 faturas comerciais do mesmo campus, que registram energia ativa, energia reativa excedente, demanda contratada, demanda ultrapassada e o custo total mensal. O uso de dados históricos de faturas como fonte primária de informação está alinhado com estudos anteriores que demonstraram a eficácia dessa abordagem para a identificação de padrões de consumo em edifícios institucionais ao longo de múltiplos anos [8]. As duas séries cobrem o período de março de 2025 a abril de 2026; os dados de abril de 2026 são parciais (apenas 5 dias) e foram excluídos das comparações sazonais.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8971

ESTRUTURA DO CRUZAMENTO DE DADOS

O cruzamento entre as duas fontes é bidirecional e complementar. Pela via técnica, a telemedição fornece resolução de 15 minutos, permitindo identificar o horário exato dos picos de demanda, a dinâmica intradiária do consumo e os episódios de fator de potência abaixo do limite regulatório de 0,92. Pela via comercial, as faturas fornecem o valor contratado da demanda e as tarifas aplicadas. Nenhuma fonte isolada permite essa integração: a telemedição não acessa o contrato vigente, e a fatura não registra o horário nem a dinâmica do evento que a gerou.

Figura 1 – Metodologia de análise dos dados



Fonte: os autores.

TRATAMENTO DA SÉRIE DE TELEMEDIÇÃO

A série bruta de 15 minutos passou por três etapas de preparação. Inicialmente, os registros de abril de 2026 foram separados do conjunto principal por estarem incompletos. Em seguida, os meses foram classificados em dois regimes operacionais – letivo pleno (consumo acima de 100 MWh) e recesso (consumo abaixo desse limiar). Adicionalmente, realizou-se a inspeção visual direta da curva de carga no portal de telemedição durante o período entre 0h e 5h de domingos e feriados, identificando-se o patamar mínimo constante de consumo. Esse limite gráfico foi adotado como a referência para a carga de base – o consumo mínimo estrutural do campus, independente da ocupação.

ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE FOTOVOLTAICA

A participação da geração fotovoltaica no balanço energético mensal foi calculada pela razão entre a geração excedente (registrada pelo medidor bidirecional) e o consumo total de energia ativa do mesmo mês. Esse indicador foi calculado para todos os meses com dados completos e comparado entre os dois regimes operacionais (letivo e recesso), para verificar se o descasamento temporal entre geração e demanda era estrutural ou ocasional.

MONITORAMENTO PARA ENTENDER PICOS DE ENERGIA

A identificação dos picos de demanda foi realizada a partir da análise da curva de carga gerada pelos registros de telemedição a cada 15 minutos. O procedimento consistiu em: (i) extrair os máximos diários da demanda ativa em cada posto tarifário (ponta e fora de ponta); (ii) ordenar os valores diários por ordem decrescente, identificando os dias de maior solicitação; e (iii) correlacionar os dias críticos com o calendário acadêmico, distinguindo picos estruturais (recorrentes e previsíveis) de picos ocasionais (decorrentes de eventos atípicos). As visualizações utilizadas foram o perfil horário diário e o gráfico de barras da demanda máxima diária, ambas disponíveis no portal de telemedição.

VALIDAÇÃO CRUZADA DAS FONTES

A confiabilidade da série de telemedição como base analítica foi verificada pelo desvio entre a energia integrada mensalmente a partir dos registros de 15 minutos e a energia ativa faturada no mesmo período. O critério adotado foi: desvios acima de 5% implicariam revisão dos dados.

RESULTADOS

PADRÃO DE CONSUMO E SAZONALIDADE

O consumo do campus apresenta dois regimes bem distintos (Figura 2). Nos meses letivos, o consumo ultrapassa 140 MWh (ex.: maio/2025 = 156.983 kWh; outubro/2025 = 146.115 kWh). Nos recessos, cai para 60.758 kWh (agosto/2025) e 42.181 kWh (março/2025). A amplitude entre pico e vale atinge 114.802 kWh – variação de 73% no mesmo ano.

Figura 2 - Padrão de consumo e sazonalidade



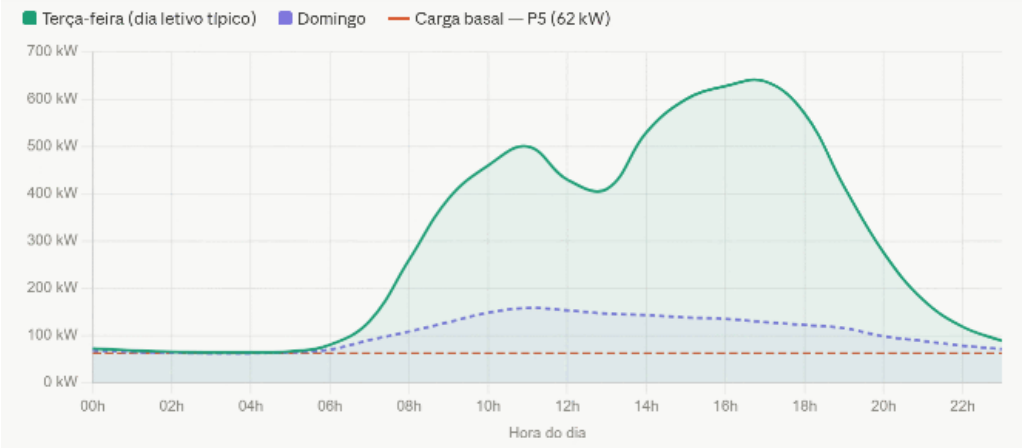
Fonte: Portal de telemedição.

CARGA DE BASE PERSISTENTE

O perfil horário (Figura 3) mostra que a curva de carga nunca atinge zero. Entre 0h e 5h, o consumo é contínuo mesmo em domingos e feriados. A inspeção visual direta

dessas medições noturnas aponta carga de base de 62 kW – equivalente a aproximadamente 543.000 kWh/ano, dissociado de qualquer atividade acadêmica.

Figura 3: Curva de carga típica com a linha de carga basal de referência

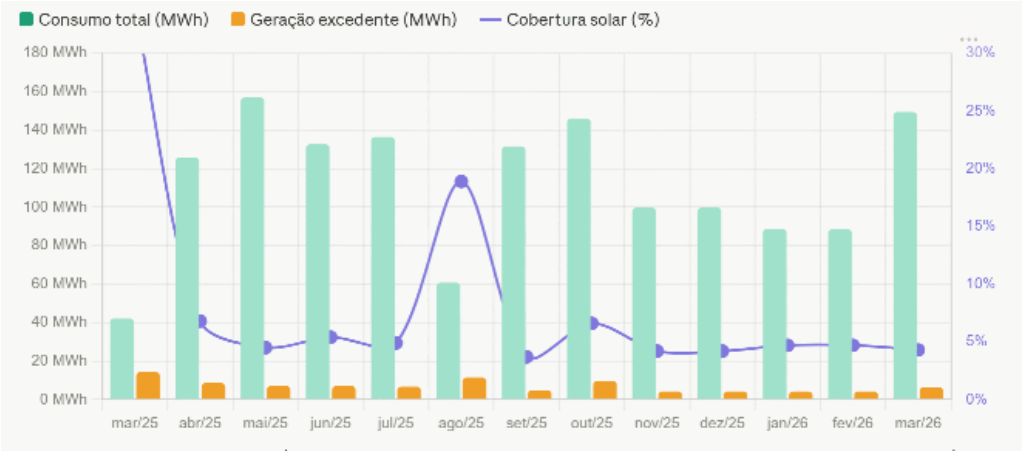


Fonte: Portal de telemedição.

GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E DESCASAMENTO COM A DEMANDA

A geração excedente — diferença entre a energia gerada pelo sistema fotovoltaico e o consumo instantâneo do campus — foi máxima em agosto/2025 (11.474 kWh), mês de recesso com consumo de 60.758 kWh, resultando em cobertura solar de 19% do consumo total. Nos meses letivos de maior demanda, a cobertura caiu para 4,5% (maio/2025, com geração excedente de 7.108 kWh) e 6,6% (outubro/2025, com geração excedente de 9.712 kWh) — Figura 4. Esse comportamento não decorre de uma variação significativa na geração bruta do sistema fotovoltaico ao longo do ano — que é relativamente estável por se tratar de uma região de alta insolação —, mas sim da redução drástica do consumo do campus nos períodos de recesso, que amplia o excedente exportado à rede. O sistema gera montantes semelhantes, mas o excedente é maior quando o campus consome menos.

Figura 4: Geração e consumo



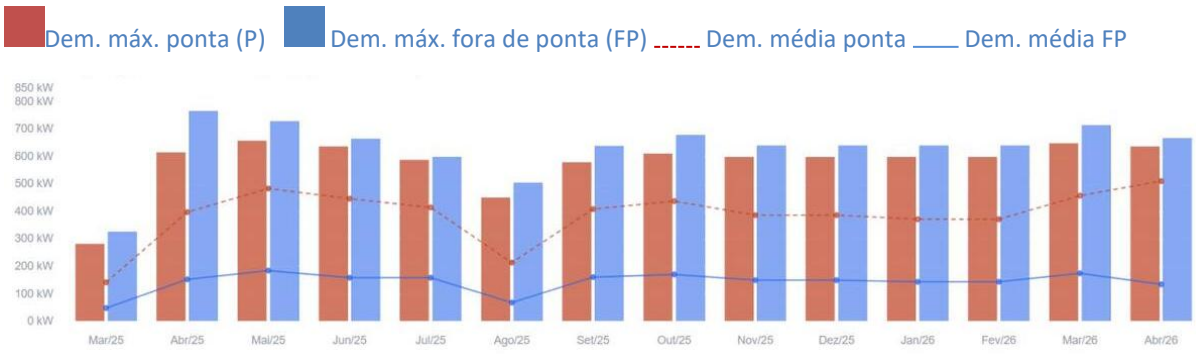
Fonte: Cobertura solar = geração excedente / consumo total.
Nota: O descasamento é estrutural: a geração é máxima quando a demanda é mínima [10].

Os valores de consumo específico por área construída (kWh/m²) identificados no campus analisado situam-se majoritariamente entre 11 e 80 kWh/m². Para efeitos de benchmarking, estudos anteriores ao analisarem edifícios universitários em clima quente e úmido (Guayaquil, Equador), identificaram uma faixa de consumo típica entre 47 e 628 kWh/m², com média de 83 kWh/m² para os campi avaliados [22]. A posição do campus na faixa inferior desse espectro sugere características construtivas e operacionais distintas, bem como perfis de uso diferenciados em termos de climatização, iluminação e equipamentos laboratoriais. Este achado reforça a importância da normalização do consumo pela área construída como métrica comparativa, conforme recomendado na literatura [15] na definição de indicadores-chave de desempenho para sistemas de energia em universidades sustentáveis.

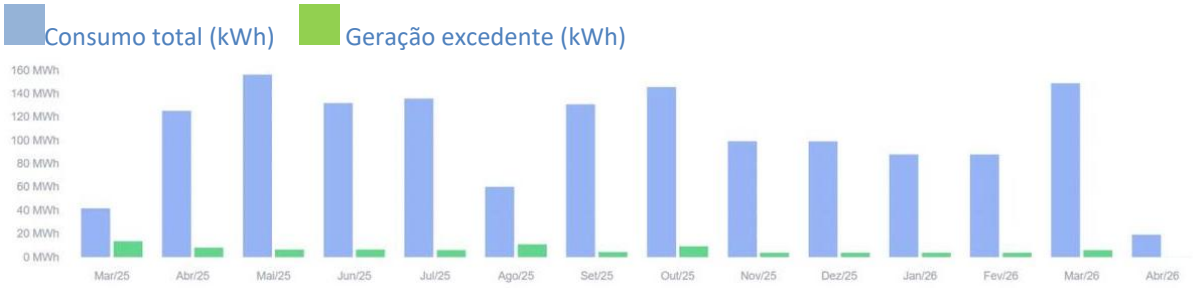
IDENTIFICAÇÃO DOS PICOS DE DEMANDA

A Figura 5 consolida a análise dos picos de demanda do campus. O painel (a) mostra que a demanda máxima fora de ponta (FP) supera a demanda de ponta (P) na maioria dos meses, com pico de 680 kW em outubro/2025, contra 613 kW no mesmo período. Esse padrão indica que o principal vetor de pico não é o horário tarifário mais oneroso, mas sim a climatização no período da tarde (14h-17h). O painel (b) evidencia o descasamento estrutural entre geração fotovoltaica e demanda: a geração excedente atinge seu máximo (11.474 kWh em agosto/2025) justamente quando o consumo cai nos recessos. No período letivo, a cobertura solar cai para menos de 7%. O painel (c) localiza os picos no perfil horário: nos dias úteis, a demanda eleva-se a partir das 14h, atingindo valores entre 500-600 kW, com um segundo pico no horário de ponta (18h-20h). Aos fins de semana, a carga é significativamente menor, confirmando a correlação com atividades acadêmicas. Essa análise permite recomendar estratégias de mitigação: (i) deslocamento de cargas térmicas (*load shifting*) para o período noturno; (ii) ajuste da demanda contratada com base na média observada nos recessos; e (iii) estudo de viabilidade para sistemas de armazenamento que permitam reduzir os picos de FP.

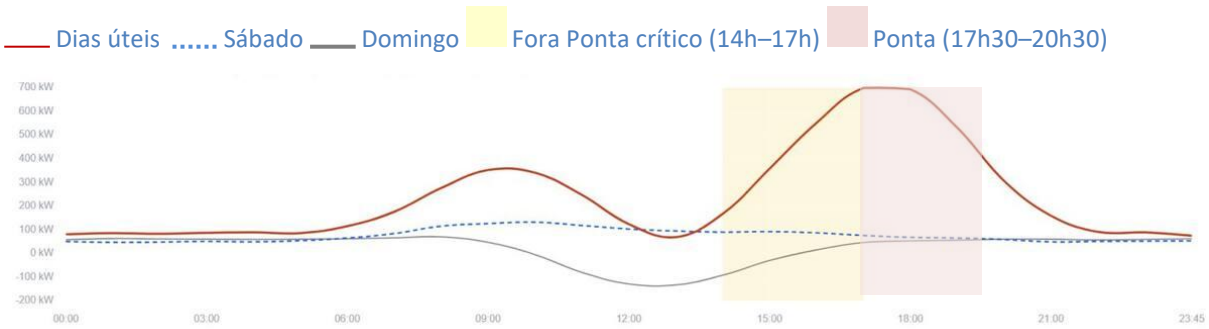
Figura 5: Perfil de demanda do campus no período março/2025-abril/2026: (a) demanda máxima mensal nos postos tarifários de ponta (P) e fora de ponta (FP); (b) consumo mensal total e geração excedente fotovoltaica; (c) perfil horário médio da demanda por tipo de dia (outubro/2025), com destaque para os intervalos críticos de pico: FP (14h–17h) e P (17h30–20h30).



(b) Consumo mensal total (kWh) e geração excedente



(c) Perfil horário médio típico — dias úteis vs. fim de semana



Nota: Perfil de demanda do campus no período março/2025–abril/2026: (a) demanda máxima mensal nos postos tarifários de ponta (P) e fora de ponta (FP); (b) consumo mensal total e geração excedente fotovoltaica; (c) perfil horário médio da demanda por tipo de dia (outubro/2025), com destaque para os intervalos críticos de pico: FP (14h–17h, em amarelo) e P (17h30–20h30, em vermelho). Fonte: Sistema de Telemedição, 2025–2026.

VALIDAÇÃO CRUZADA DAS FONTES

O desvio entre a energia integrada da telemedição (15 min) e a energia faturada foi inferior a 2% em todos os meses completos.

CONCLUSÃO

O cruzamento sistemático entre a série de telemedição e o histórico de faturas comerciais constitui um *digital shadow* energético operacional para campi universitários, sem dependência de modelo BIM, sensores adicionais ou plataforma proprietária. A infraestrutura de medição já instalada pela distribuidora mostrou-se suficiente para o diagnóstico e a detecção de anomalias.

A abordagem quantificou uma carga de base persistente de 62 kW no período entre 0h e 5h de domingos e feriados, equivalente a 543.000 kWh/ano sem correlação com atividades acadêmicas. Constatou-se ainda que a geração fotovoltaica existente cobre 19% do consumo em meses de recesso (agosto) e menos de 7% nos meses letivos de maior demanda, evidenciando um descasamento estrutural que indica que a ampliação da capacidade fotovoltaica sem sistemas de armazenamento não reduzirá os picos de demanda.

Como limitação, o estudo não avaliou a causa física exata da carga de base persistente – se decorrente de equipamentos em *standby*, falhas de desligamento ou infraestrutura obsoleta. A validação cruzada entre as fontes mostrou um desvio

inferior a 2% entre a energia integrada da telemedição e a energia faturada, confirmando a alta confiabilidade da base analítica.

O método demonstra-se integralmente pronto para ser replicado em qualquer unidade da rede federal de ensino que possua um medidor bidirecional da distribuidora, transformando dados brutos e gratuitos em ferramenta de gestão imediata.

Declaração

Durante a preparação deste artigo, o autor Joao Bosco Pinheiro Dantas Filho utilizou o *DeepSeek* (modelo de linguagem de grande escala) para revisão gramatical, aprimoramento de coesão e estruturação de tópicos. A ferramenta foi utilizada como apoio à redação, sem substituir a autoria ou a responsabilidade intelectual do pesquisador. Após o uso da ferramenta, o autor revisou e editou o conteúdo conforme necessário, verificando a precisão das informações, a adequação das citações e a consistência dos argumentos apresentados. O autor assume total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado, incluindo a originalidade do texto e a correta atribuição das fontes citadas, em conformidade com o disposto no art. 9º, inciso I, alíneas "c" e "f", da Portaria CNPq nº 2.664/2026.

REFERÊNCIAS

[1] JASIM, N. I. et al. Toward Sustainable Campus Energy Management: A Comprehensive Review of Energy Management, Predictive Algorithms, and Recommendations. **Energy Nexus**, v. 18, n. 100435, p. 1–24, jun. 2025.

[2] QUISPE, E. C. et al. Energy Management Systems in Higher Education Institutions' Buildings. **Energies**, v. 18, n. 7, p. 1–35, 3 abr. 2025.

[3] ORTIZ-PEÑA, A.; HONRUBIA-ESCRIBANO, A.; GÓMEZ-LÁZARO, E. Electricity Consumption and Efficiency Measures in Public Buildings: A Comprehensive Review. **Energies**, v. 18, n. 3, p. 1–25, 28 jan. 2025.

[4] CESPEDES-CUBIDES, A. S.; JRADI, M. A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. **Energy Informatics**, v. 7, n. 1, p. 1–31, 26 fev. 2024.

[5] ARSECULARATNE, B.; RODRIGO, N.; CHANG, R. Digital Twins for Reducing Energy Consumption in Buildings: A Review. **Sustainability**, v. 16, n. 21, p. 1–16, 25 out. 2024.

[6] SEPASGOZAR, S. M. E. Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment. **Buildings**, v. 11, n. 4, p. 1–16, 2 abr. 2021.

[7] NORANAI, Z.; AZMAN, A. Potential reduction of energy consumption in public university library. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 243, n. 1, p. 012023, set. 2017.

[8] SPYROPOULOS, G. N.; BALARAS, C. A. Energy consumption and the potential of energy savings in Hellenic office buildings used as bank branches—A case study. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 770–778, 2011.

[9] TAHMASEBINIA, F. et al. Exploring the Benefits and Limitations of Digital Twin Technology in Building Energy. **Applied Sciences**, v. 13, n. 15, p. 1–38, 30 jul. 2023.

[10] KRITZINGER, W. et al. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018.

[11] GRIEVES, M. **Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replicationWhite paper**. [s.l: s.n.].

[12] MARTINELLI, T. F.; ANDREÃO, R. V.; MUNIZ, P. R. **Sistema de Aprendizado Dinâmico de Módulos Fotovoltaicos Baseado em um Modelo Digital**. Anais Estendidos do XXIV Simpósio de Realidade Virtual e Aumentada (SVR Estendido 2022). **Anais**...Vitória: Sociedade Brasileira de Computação, 24 out. 2022. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/svr_estendido/article/view/23624>

[13] JAIN, P. et al. A Digital Twin Approach for Fault Diagnosis in Distributed Photovoltaic Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 35, n. 1, p. 940–956, jan. 2020.

[14] DIEHL, N. C.; BRUSCATO, L. M. **Fase inicial para transformação de ativos públicos em gêmeos digitais**. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais**...UFAL, 7 out. 2024. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/6069>. Acesso em: 24 maio. 2026

[15] KIFOR, C. V.; OLTEANU, A.; ZERBES, M. Key Performance Indicators for Smart Energy Systems in Sustainable Universities. **Energies**, v. 16, n. 3, p. 1246, 23 jan. 2023.

[16] HIMEUR, Y. et al. Artificial intelligence based anomaly detection of energy consumption in buildings: A review, current trends and new perspectives. **Applied Energy**, n. 287, p. 116601, 1 abr. 2021.

[17] DARWAZEH, D. et al. Review of peak load management strategies in commercial buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 77, p. 103493, 1 fev. 2022.

[18] LUO, X. J. et al. Comparative study of machine learning-based multi-objective prediction framework for multiple building energy loads. **Sustainable Cities and Society**, v. 61, p. 1–23, 1 out. 2020.

[19] CERNA, F. V. et al. Load Factor Improvement of the Electricity Grid Considering Distributed Resources Operation and Regulation of Peak Load. **SSRN Electronic Journal**, p. 1–18, 4 dez. 2022.

[20] YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. Em: **Climate Change 2013 – The Physical Science Basis**. 2. ed. Porto Alegre: Cambridge University Press, 2014. p. 1–30.

[21] NOOR, K. B. M. Case Study: A Strategic Research Methodology. **American Journal of Applied Sciences**, v. 5, n. 11, p. 1602–1604, 1 nov. 2008.

[22] LITARDO, J.; HIDALGO-LEON, R.; SORIANO, G. Energy Performance and Benchmarking for University Classrooms in Hot and Humid Climates. **Energies**, v. 14, n. 21, p. 1–17, 26 out. 2021.