

Otimização Energética de Edifícios Inteligentes Usando Programação Linear

Energy Optimization of Smart Buildings Using Linear Programming

Yailyn N. Sanabria, Mestrando em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista.

nicoll.sanabria@unesp.br

Mario A. Mejía, Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista.

mario.andres@unesp.br

John F. Franco, Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista.

fredy.franco@unesp.br

Número da sessão temática da submissão – [04]

Resumo

Este artigo propõe um modelo de programação linear para a otimização energética de edifícios inteligentes, integrando geração fotovoltaica (FV), sistema de armazenamento de energia elétrica (SAEE), veículos elétricos (VEs) e a interação com a rede elétrica. O objetivo principal consiste em minimizar os custos operacionais de energia, em um horizonte de 24 horas, por meio da coordenação ótima dos recursos energéticos disponíveis. A abordagem emprega modelagem matemática determinística para definir estratégias ótimas de compra e venda de energia, carregamento e descarregamento de SAEE, utilização da geração FV e carregamento de VEs, considerando tarifas horárias e restrições técnicas operacionais. Dois estudos de caso são desenvolvidos para avaliar o desempenho do modelo proposto. Os resultados mostram redução dos custos operacionais, menor dependência da rede elétrica e diminuição das emissões de CO₂, evidenciando o potencial do método proposto como ferramenta de apoio à tomada de decisão na operação energética de edifícios inteligentes.

Palavras-chave: Eficiência Energética; Edifícios Inteligentes; Programação Linear

Abstract

This article proposes a linear programming model for the energy optimization of smart buildings, integrating photovoltaic (PV) generation, battery energy storage systems (BESS), electric vehicles (EVs), and grid interaction. The primary objective is to minimize operational energy costs over a 24-hour horizon through the optimal coordination of available energy resources. The proposed approach adopts a deterministic mathematical formulation to derive optimal strategies for energy purchasing and selling, BESS charging and discharging, PV generation utilization, and EV charging, while accounting for time-varying electricity tariffs and operational technical constraints. Two case studies are conducted to assess the performance of the proposed model. The results demonstrate significant reductions in operational costs, lower dependence on the utility grid, and decreased CO₂ emissions, highlighting the proposed method as an effective decision-support tool for smart building energy operation.

Keywords: Energy Efficiency; Smart Buildings; Linear Programming

1. Introdução

O elevado consumo de energia elétrica associado aos edifícios representa um dos principais desafios para a sustentabilidade global, sendo responsável por cerca de 30% a 40% do consumo final de energia e por aproximadamente 36% das emissões de gases de efeito estufa (EJDIKE; MEWOMO, 2023; PARVIN et al., 2021). Nesse contexto, os edifícios inteligentes surgem como uma alternativa promissora ao integrar sistemas de automação, controle avançado e gestão energética, permitindo coordenar cargas, geração distribuída e a rede elétrica com o objetivo de reduzir custos operacionais e impactos ambientais (EMAMI JAVANMARD; GHADERI; SANGARI, 2020).

A crescente integração de tecnologias como geração fotovoltaica (FV), sistema de armazenamento de energia elétrica (SAEE) e veículos elétricos (VEs) amplia o potencial de eficiência energética, mas também aumenta significativamente a complexidade operacional dos edifícios, exigindo estratégias sistemáticas de gestão capazes de lidar com múltiplos recursos, restrições técnicas e estruturas tarifárias (YI et al., 2023). Nesse cenário, a otimização energética consolida-se como uma ferramenta essencial para o planejamento e a operação eficiente de edifícios inteligentes, superando abordagens baseadas em regras fixas ou decisões isoladas (JING; ZHAO, 2024).

Diversos estudos têm empregado modelos de otimização matemática para a gestão energética de edifícios. Formulações baseadas em programação linear (PL) destacam-se pela simplicidade e eficiência computacional, enquanto a programação linear inteira mista (PLIM) tem sido amplamente utilizada para representar decisões operacionais discretas e a integração de múltiplos recursos energéticos (LEITAO et al., 2020). Modelos PLIM demonstram resultados expressivos na redução de custos, demanda de pico e dependência da rede elétrica (ELAZAB et al., 2022), porém frequentemente apresentam elevada complexidade computacional, dificuldades de escalabilidade e maior esforço de implementação, especialmente em aplicações com horizontes temporais mais longos ou alto nível de integração tecnológica (KHAN et al., 2024).

Outras abordagens, como programação não linear, programação estocástica, programação multiobjetivo e métodos metaheurísticos, ampliam o realismo da modelagem ao considerar incertezas, múltiplos objetivos e relações não lineares, mas tendem a demandar maior custo computacional ou não garantir a obtenção do ótimo global, o que pode limitar sua aplicação prática em sistemas de gestão energética (AKBARI-DIBAVAR et al., 2022; LEITAO et al., 2020; PILLAY; SAHA, 2024).

Diante desse panorama, observa-se uma lacuna na literatura quanto ao desenvolvimento de modelos de gestão energética que conciliem rigor matemático, baixo custo computacional e coordenação eficiente de múltiplos recursos, sem recorrer extensivamente a variáveis binárias. Nesse sentido, este artigo propõe um modelo de programação linear (PL) para otimizar a gestão energética de um edifício inteligente, com o objetivo de minimizar o custo operacional de energia em um horizonte de 24 horas. A formulação consiste em uma adaptação e aprimoramento do modelo de Foroozandeh et al. (2020), incorporando a exportação de energia à rede e mecanismos de penalização para evitar o descarregamento desnecessário dos veículos elétricos, além de

demonstrar que a não simultaneidade entre carga e descarga pode ser obtida de forma natural por meio dos fatores de eficiência dos sistemas de armazenamento. Essa abordagem reduz significativamente a complexidade computacional em relação a modelos PLIM tradicionais, mantendo a coerência física do sistema e contribuindo para a redução dos custos energéticos e das emissões indiretas de CO₂.

O artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a modelagem matemática do problema; a Seção 3 descreve o estudo de caso adotado e discute os resultados obtidos; e a Seção 4 apresenta as principais conclusões do trabalho.

2. Modelo matemático

O problema de gestão energética do edifício inteligente é formulado como um problema de PL, cujo objetivo é otimizar o despacho dos recursos energéticos disponíveis, minimizando os custos de operação. O modelo proposto constitui uma versão aprimorada da formulação apresentada por Foroozandeh et al. (2020), na qual as variáveis binárias são eliminadas, resultando em uma formulação estritamente linear e computacionalmente mais eficiente. Adicionalmente, o modelo contempla a exportação de excedentes de energia para a rede elétrica e incorpora um termo de penalização destinado a evitar o descarregamento desnecessário dos veículos elétricos.

A Figura 1 apresenta o balanço de potência ativa para um edifício inteligente, destacando as principais fontes de entrada e saída de energia. Conforme ilustrado, o edifício inteligente é alimentado por diversas fontes de energia, como o sistema FV, SAEE, VEs e a rede elétrica externa. É importante destacar, que no caso do SAEE e dos VEs, esses elementos podem operar tanto como fontes quanto como cargas, a depender da estratégia de gestão adotada e das condições operacionais do sistema. A demanda interna do edifício deve ser atendida em todos os períodos, sendo possível a exportação de energia à rede em situações de excedente.

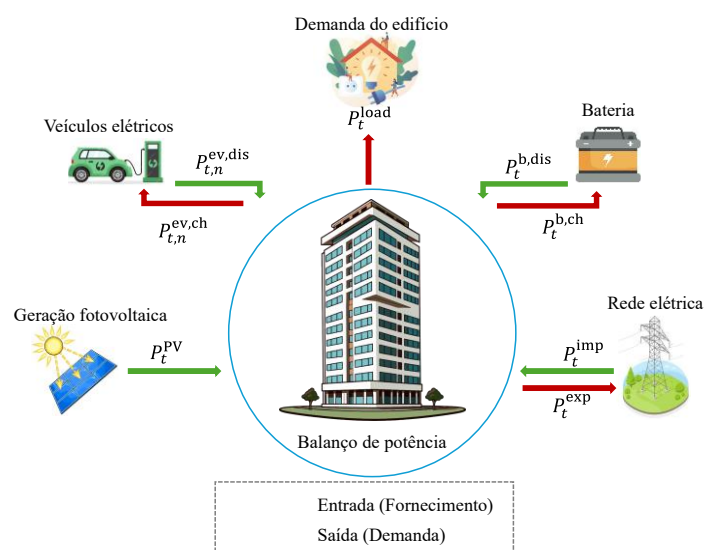


Figura 1: Balanço de potência. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A seguir, são apresentadas a função objetivo (FO) e as principais restrições do modelo.

2.1. Função objetivo

A função objetivo, apresentada na equação ((1)), visa minimizar os custos operacionais totais de energia do edifício. As variáveis P_t^{imp} e P_t^{exp} representam, respetivamente, as potências importada e exportada da rede no intervalo de tempo t , que são multiplicadas pelos preços C_t^{imp} e C_t^{exp} , respectivamente. Além disso, o termo $C^{\text{pen,dis}}$ representa a penalidade associada à descarga dos n VEs conectados ao edifício ($P_{t,n}^{\text{ev,dis}}$). Por último, Δt indica a duração de cada intervalo de tempo considerado no horizonte de análise.

$$\min \sum_t (C_t^{\text{imp}} \cdot P_t^{\text{imp}} - C_t^{\text{exp}} \cdot P_t^{\text{exp}}) \cdot \Delta t + C^{\text{pen,dis}} \sum_t \sum_n P_{t,n}^{\text{ev,dis}} \cdot \Delta t \quad (1)$$

2.2. Balanço de potência ativa

O balanço de potência ativa, mostrado na equação ((2)), assegura que, em cada instante de tempo, a soma das potências disponíveis provenientes da importação da rede (P_t^{imp}), da geração FV (P_t^{FV}), da descarga do SAE ($P_t^{\text{bat,dis}}$) e da descarga dos VEs ($P_{t,n}^{\text{ev,dis}}$); seja exatamente igual à soma das potências demandadas pelo edifício (P_t^{load}), pela potência exportada à rede (P_t^{exp}), pelo carregamento do SAE ($P_t^{\text{bat,ch}}$) e pelo carregamento dos VEs ($P_{t,n}^{\text{ev,ch}}$). Além disso, o parâmetro binário $\sigma_{t,n}$ indica a disponibilidade dos VEs.

$$P_t^{\text{imp}} + P_t^{\text{FV}} + P_t^{\text{bat,dis}} + \sum_n P_{t,n}^{\text{ev,dis}} \cdot \sigma_{t,n} = P_t^{\text{load}} + P_t^{\text{exp}} + P_t^{\text{bat,ch}} + \sum_n P_{t,n}^{\text{ev,ch}} \cdot \sigma_{t,n} \quad \forall t \in T \quad (2)$$

2.3. Restrições de carregamento e descarregamento das baterias

A equação ((3)) estabelece que o estado de carga da bateria (SOC) no instante de tempo $t + 1$ (SOC_{t+1}^{bat}) depende do SOC no instante t (SOC_t^{bat}), e do balanço de energia associado aos processos de carga e descarga no intervalo considerado. As eficiências de carga e descarga do SAE são representadas pelos parâmetros $\eta^{\text{bat,ch}}$ e $\eta^{\text{bat,dis}}$.

$$SOC_{t+1}^{\text{bat}} = SOC_t^{\text{bat}} + (P_t^{\text{bat,ch}} \cdot \eta^{\text{bat,ch}} - P_t^{\text{bat,dis}} / \eta^{\text{bat,dis}}) \cdot \Delta t \quad \forall t, t < T \quad (3)$$

As restrições ((4) e ((5)), definem os limites operacionais do SOC da bateria. $\underline{SOC}^{\text{bat}}$ e $\overline{SOC}^{\text{bat}}$ indicam, respectivamente, a energia mínima e máxima permitida.

$$SOC_t^{\text{bat}} \geq \underline{SOC}^{\text{bat}} \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$SOC_t^{\text{bat}} \leq \overline{SOC}^{\text{bat}} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

As restrições ((6) e ((7)) garantem que as potências de carga e descarga das baterias não excedam seus limites ($\bar{P}^{\text{bat,ch}}$ e $\bar{P}^{\text{bat,dis}}$).

$$P_t^{\text{bat,ch}} \leq \bar{P}^{\text{bat,ch}} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$P_t^{\text{bat,dis}} \leq \bar{P}^{\text{bat,dis}} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

2.4. Restrições de carregamento e descarregamento dos veículos elétricos

8)

A equação ((8)) aplica-se a cada VE identificado pelo índice n . A atualização do SOC é determinada pelas potências de carregamento e descarregamento, incorporando explicitamente as eficiências associadas a cada processo ($\eta^{\text{ev, ch}}$ e $\eta^{\text{ev, dis}}$). O termo $P_{t,n}^{\text{ev, drive}}$, indica o consumo de potência por deslocamento, quando o VE vai embora e volta ao edifício.

$$SOC_{t+1,n}^{\text{ev}} = SOC_{t,n}^{\text{ev}} + [(P_{t,n}^{\text{ev, ch}} \cdot \eta^{\text{ev, ch}} - P_{t,n}^{\text{ev, dis}} / \eta^{\text{ev, dis}}) \cdot \sigma_{t,n} - P_{t,n}^{\text{ev, drive}} \cdot (1 - \sigma_{t,n})] \cdot \Delta t \quad (8)$$

$\forall n \in N, \forall t, t < T$

A restrição ((9)) estabelece o limite mínimo do SOC do VE ($\underline{SOC}_n^{\text{ev}}$). O parâmetro $\sigma_{t,n}$ é essencial, pois a restrição só se aplica quando o VE está fisicamente no local; caso o VE esteja de viagem, é possível que o SOC fique por baixo do valor mínimo $\underline{SOC}_n^{\text{ev}}$.

$$SOC_{t,n}^{\text{ev}} \geq \underline{SOC}_n^{\text{ev}} \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (9)$$

Por sua vez, a restrição ((10)) define o limite máximo do SOC ($\overline{SOC}_n^{\text{ev}}$). Essa é uma limitação física do VE que não depende de sua localização. Por essa razão, não é necessário incluir o parâmetro de disponibilidade.

$$SOC_{t,n}^{\text{ev}} \leq \overline{SOC}_n^{\text{ev}} \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (10)$$

Deve-se garantir que ao final do horizonte de otimização a carga de cada VE ($SOC_{T,n}^{\text{ev}}$) esteja com um nível mínimo de carga final ($SOC_n^{\text{ev, final}}$); essa condição é representada pela restrição ((11)).

$$SOC_{T,n}^{\text{ev}} \geq SOC_n^{\text{ev, final}} \quad \forall n \in N \quad (11)$$

As restrições ((12)) e ((13)) operam de forma condicional, garantindo que as potências de carga ou descarga de cada VE não excedam as correspondentes capacidades máximas ($\bar{P}^{\text{ev, ch}}$ e $\bar{P}^{\text{ev, dis}}$). Além disso, a carga e descarga são permitidas somente se o VE estiver disponível ($\sigma_{t,n} = 1$).

$$P_{t,n}^{\text{ev, ch}} \leq \bar{P}^{\text{ev, ch}} \cdot \sigma_{t,n} \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (12)$$

$$P_{t,n}^{\text{ev, dis}} \leq \bar{P}^{\text{ev, dis}} \cdot \sigma_{t,n} \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (13)$$

14

A restrição ((14)) representa que a soma das potências de carga de cada VE ($P_{t,n}^{\text{ev, ch}}$), em um dado instante t , não exceda a capacidade máxima da infraestrutura de carregamento do edifício ($\bar{P}^{\text{charger}}$).

$$\sum_n P_{t,n}^{\text{ev, ch}} \leq \bar{P}^{\text{charger}} \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (14)$$

2.5. Restrições de importação e exportação de energia com a rede elétrica

As restrições (15) e (16) limitam a potência importada da rede (P_t^{imp}) e a potência exportada à rede (P_t^{exp}) segundo as capacidades respectivas ($\bar{P}^{\text{imp}}$ e $\bar{P}^{\text{exp}}$).

$$P_t^{\text{imp}} \leq \bar{P}^{\text{imp}} \quad \forall t \in T \quad (15)$$

$$P_t^{\text{exp}} \leq \bar{P}^{\text{exp}} \quad \forall t \in T \quad (16)$$

3. Simulações e resultados

A abordagem proposta neste artigo visa avaliar o impacto da coordenação integrada de múltiplos recursos na redução dos custos energéticos de um edifício inteligente. O modelo foi implementado em AMPL (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003) e resolvido usando o solver CPLEX (IBM, 2009), sendo executado em um computador equipado com processador Intel Core i7-4790 @ 3,60 GHz e 8 GB de memória RAM.

Os dados utilizados no estudo de caso foram disponibilizados por Almeida et al. (2020) na plataforma Zenodo. Embora a base de dados não especifique explicitamente a localização do edifício, assume-se, para fins de análise, que a referência geográfica é Portugal, país de origem dos autores do estudo.

A Figura 2 apresenta os perfis de demanda elétrica do edifício, de geração FV e das tarifas de energia elétrica, considerando um horizonte temporal de 24 horas. A tarifa de compra de energia da rede corresponde exatamente àquela definida na base de dados de referência. A tarifa de venda de energia foi fixada em 70% da tarifa de compra, adotando-se uma hipótese conservadora.

A capacidade da geração FV foi aumentada em relação aos dados originais de Almeida et al. (2020), de forma que a geração atinge um pico de 1,8 MW; essa capacidade elevada oferece a possibilidade de analisar a gestão do excesso de energia entre as 13h e 17h, permitindo avaliar adequadamente o potencial de otimização energética do modelo proposto. Ressalta-se que o foco do estudo não é o dimensionamento físico da usina FV, mas sim a análise do comportamento do modelo de gestão energética frente à integração de recursos distribuídos.

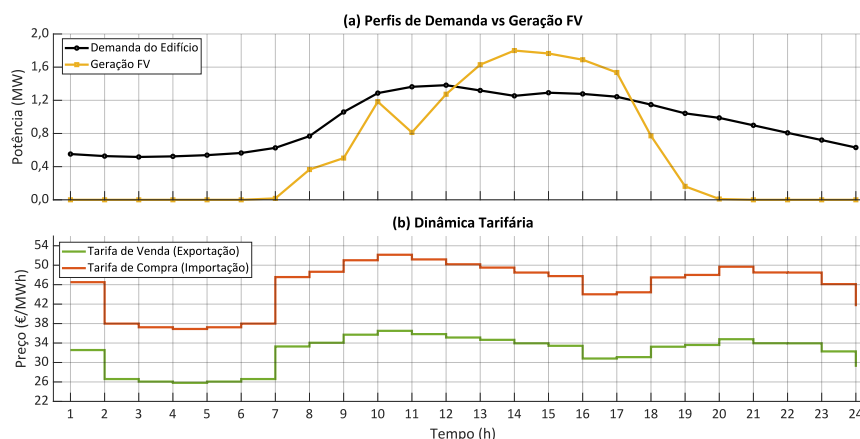


Figura 2: Dados de entrada. Fonte: Os autores (2026), com base em Almeida et al. (2020).

Foi incorporado um SAAE do modelo JMHPower, cujas especificações principais estão reunidas na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações do SAE.

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
$\overline{SOC}^{bat}$	Capacidade de armazenamento máximo da bateria.	1000	kWh
SOC^{bat}	Estado de carga mínimo da bateria (20% do $SOC^{b,max}$).	200	kWh
SOC_0^{bat}	Estado inicial de carga da bateria (80% do $SOC^{b,max}$).	800	kWh
$\bar{p}^{bat,ch}$	Potência máxima de carga da bateria.	500	kW
$\bar{p}^{bat,dis}$	Potência máxima de descarga da bateria.	500	kW
$\eta^{bat,ch}$	Perda de energia durante o carregamento.	95%	–
$\eta^{bat,dis}$	Perda de energia durante o descarregamento.	95%	–

Fonte: Os autores (2026), com dados de JMHPOWER ([s.d.]).

Foram considerados 10 VEs do modelo *Tesla Model 3 Long Range*, com características apresentadas na Tabela 2. Além disso, O SOC inicial de cada VE foi distribuído aleatoriamente entre 20% e 40% do $\overline{SOC}_n^{ev}$.

Tabela 2: Especificações dos VEs.

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
$\overline{SOC}_n^{ev}$	Capacidade de armazenamento máximo de cada VE.	75	kWh
$\bar{p}^{ev,ch}$	Potência de carga máxima dos VEs	100	kW
$\bar{p}^{ev,dis}$	Potência de descarga máxima dos VEs.	7	kW
$\bar{p}^{charger}$	Potência de carga total dos carregadores do edifício para os VEs.	500	kW
$C^{pen,dis}$	Penalização de descarga dos VEs	45	€/MWh
$\eta^{ev,ch}$	Perda de energia durante o carregamento.	95%	–
$\eta^{ev,dis}$	Perda de energia durante o descarregamento.	95%	–

Fonte: Os autores (2026), com dados de Tesla ([s.d.]).

A disponibilidade dos VEs ao longo do dia é representada na Figura 3. Foi considerado um horário de trabalho típico, onde o valor 1 indica que o veículo está disponível e 0 que está ausente.

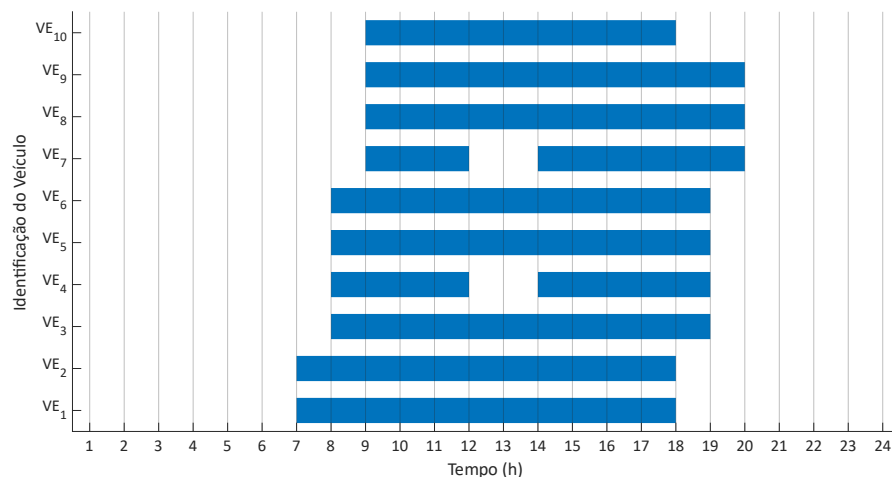


Figura 3: Disponibilidade dos VEs no edifício. Fonte: Os autores (2026).

Para avaliar o desempenho do modelo proposto foram considerados dois casos de estudo:

- Caso base: edifício conectado exclusivamente à rede elétrica e VE, sem geração FV, armazenamento, operando sem qualquer estratégia de gestão;

- Caso otimizado: integra geração FV, SAEE e VEs, com operação coordenada pelo modelo proposto.

O caso base é adotado como referência, permitindo quantificar os benefícios da gestão energética inteligente e da integração de múltiplas tecnologias energéticas.

3.1. Resultados

A Figura 4 apresenta os resultados do comportamento do caso base, no qual o edifício opera conectado exclusivamente à rede elétrica, sem FV, SAEE ou estratégia de gestão energética. Neste caso, os VEs são considerados apenas como carga adicional, de modo a garantir uma comparação equivalente com o caso otimizado em termos de demanda total.

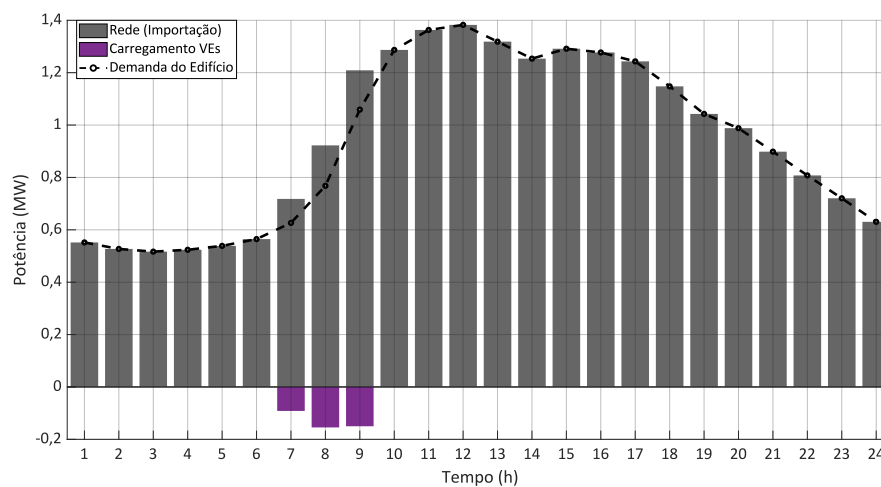


Figura 4: Dados de caso base. Fonte: Os autores (2026).

Observa-se que toda a demanda do edifício, incluindo a carga associada aos VEs nos períodos de conexão, é suprida pela importação de energia da rede elétrica. Não há geração local nem exportação de energia ao longo do horizonte analisado.

A Figura 5 mostra o caso otimizado, ilustra os perfis horários de demanda do edifício, geração FV, importação e exportação de energia com a rede elétrica, bem como as potências de carga e descarga da bateria. Observa-se a exportação de energia excedente em determinados períodos e o uso do armazenamento para apoiar o atendimento da demanda, evidenciando a operação coordenada dos recursos energéticos.

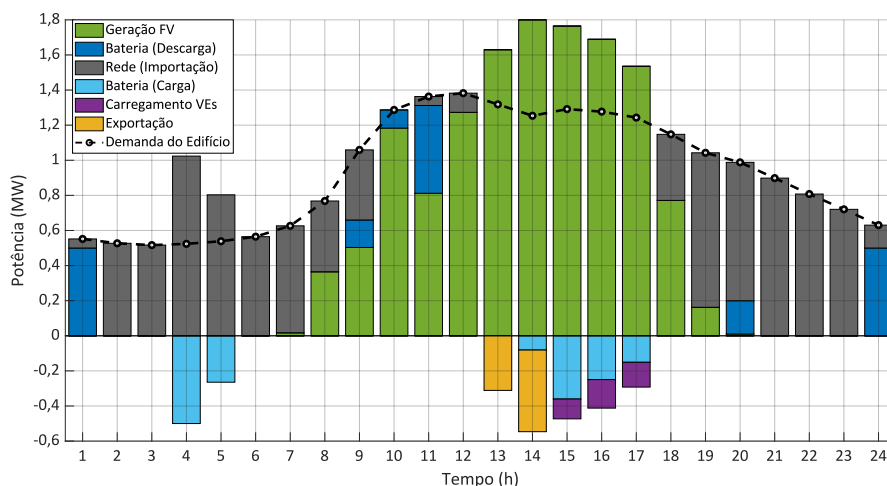


Figura 5: Dados de caso otimizado. Fonte: Os autores (2026).

Os valores horários do SOC são apresentados na Figura 6, considerando a faixa operacional definida entre 20% e 100% da capacidade. O SOC permanece dentro dos limites operacionais ao longo de todo o horizonte de análise.

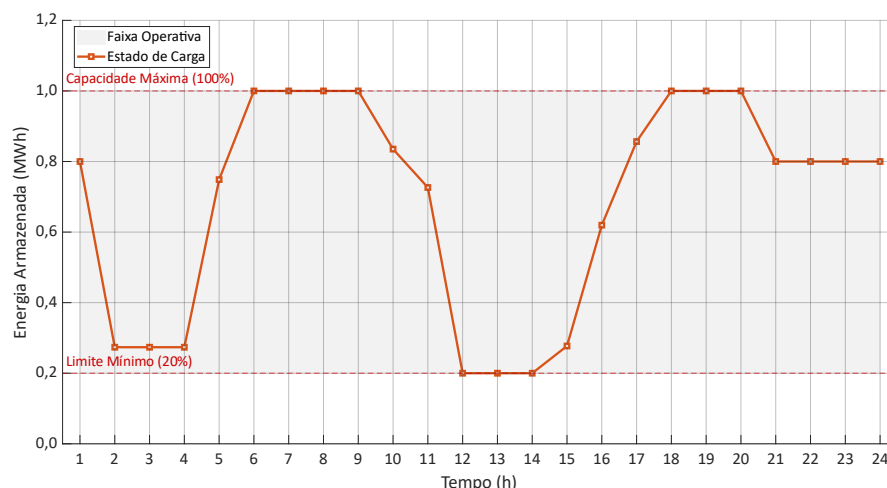


Figura 6: Perfil de Estado de Carga da Bateria. Fonte: Os autores (2026).

A Figura 7 apresenta os impactos econômico e ambiental associados aos dois casos analisados. No que se refere ao custo energético total diário, o caso otimizado apresentou um valor de 401,97 €, enquanto o caso base resultou em 1067,75 €.

Em relação ao impacto ambiental, as emissões de dióxido de carbono (CO_2) associadas ao consumo de energia elétrica da rede foram calculadas a partir da energia importada e de um fator de emissão de $0,072 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$, correspondente à intensidade média de emissões da geração de eletricidade em Portugal, conforme dados da *European Environment Agency* (2025) 1636 kg CO_2 para o caso base e 696 kg CO_2 para o caso otimizado.

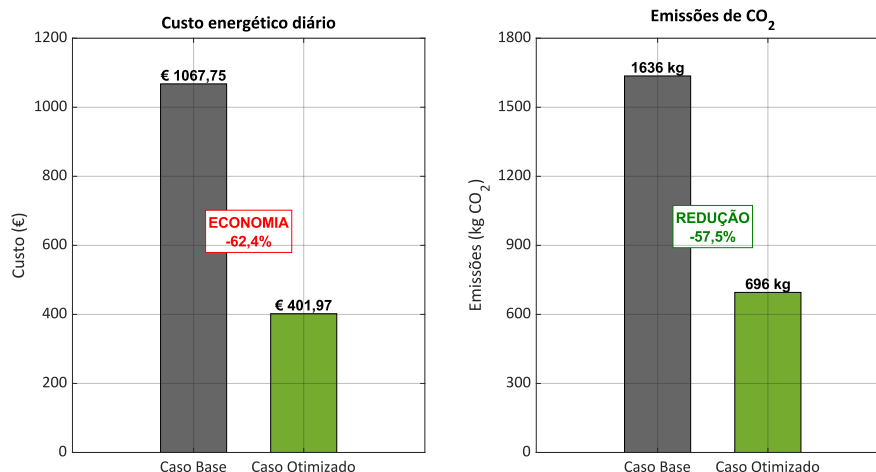


Figura 7: Impacto econômico e ambiental. Fonte: Os autores (2026).

O tempo médio de solução foi de 0,06 s, confirmando a eficiência computacional da formulação linear.

3.2. Discussões

A comparação entre o caso base e o caso otimizado demonstra claramente a capacidade do modelo de PL em realizar uma gestão energética inteligente e coordenada dos recursos do edifício. Enquanto no caso base a demanda é atendida majoritariamente pela rede elétrica, sem qualquer estratégia de otimização, no caso otimizado o modelo decide de forma ótima quando utilizar a geração FV, quando armazenar energia na bateria e quando recorrer à rede, considerando simultaneamente as restrições operacionais e os sinais tarifários.

Observa-se que a geração FV é priorizada para o atendimento da carga, sendo o excedente direcionado ao armazenamento ou à exportação para a rede. A bateria atua como elemento de flexibilidade, sendo carregada em períodos favoráveis e descarregada nos instantes de maior demanda ou maior custo de importação. De forma complementar, o carregamento dos VEs é gerenciado de maneira integrada ao sistema, evitando impactos negativos sobre o custo total, enquanto a descarga é desencorajada por meio de penalização econômica.

Como consequência dessa gestão integrada, o caso otimizado apresenta reduções significativas nos custos energéticos e nas emissões de CO₂ em relação ao caso base, conforme apresentado na seção anterior. Esses resultados evidenciam que a formulação proposta, mesmo sem o uso de variáveis binárias, é capaz de representar adequadamente a operação de um edifício inteligente, promovendo ganhos econômicos e ambientais com baixa complexidade computacional.

4. Conclusões

Este trabalho apresentou uma adaptação aprimorada de um modelo de programação linear para a otimização energética de um edifício de escritórios, integrando geração fotovoltaica (FV), sistema de armazenamento de energia elétrica (SAEE), veículos elétricos (VEs) e interação com a rede elétrica. Os resultados demonstraram que o modelo é capaz

de realizar uma gestão energética inteligente e coordenada, reduzindo significativamente os custos operacionais e as emissões de CO₂, mesmo sem o uso de variáveis binárias, o que contribui para menor complexidade computacional.

A formulação proposta mostrou-se eficaz na priorização do uso de fontes renováveis, no aproveitamento estratégico do SAEE e no gerenciamento adequado do carregamento dos VEs, considerando restrições técnicas e sinais tarifários. Essa gestão integrada resultou em redução de aproximadamente 67% nos custos energéticos e 57,5% nas emissões de CO₂. Dessa forma, o modelo se apresenta como uma ferramenta promissora para o apoio à tomada de decisão em edifícios inteligentes com múltiplos recursos energéticos.

Como limitações do estudo, destacam-se a consideração de fornecimento contínuo da rede elétrica, o horizonte temporal restrito a 24 horas e a ausência de incertezas na demanda e na geração FV. Trabalhos futuros podem explorar cenários de falha da rede, horizontes de planejamento ampliados e abordagens estocásticas, ampliando a aplicabilidade do modelo em contextos mais complexos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo nº 2022/03161-4.

Referências

- AKBARI-DIBAVAR, A.; MOHAMMADI-IVATLOO, B.; ZARE, K.; ANVARI-MOGHADDAM, A. Optimal scheduling of a self-healing building using hybrid stochastic-robust optimization Approach. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. 58, n. 3, p. 3217–3226, 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9723520>>. Acesso em: 14 maio. 2025.
- ALMEIDA, J.; CANIZES, B.; SOARES, J.; VALE, Z. **Energy consumption and renewable generation data of 5 aggregators - 15-minute resolution (13 bus grid)**. 2020. Disponível em: <<https://zenodo.org/records/4399670>>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- EJIDIKE, C. C.; MEWOMO, M. C. Benefits of adopting smart building technologies in building construction of developing countries: Review of literature. **Springer Nature**, [s. l.], 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-022-05262-y>>. Acesso em: 13 ago. 2025.
- ELAZAB, R.; SAIF, O.; AMIN METWALLY, A. M. A.; DAOUD, M. New smart home energy management systems based on inclining block-rate pricing scheme. **Clean Energy**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 503–511, 2022. Disponível em: <<https://academic.oup.com/ce/article/6/3/503/6608898>>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- EMAMI JAVANMARD, M.; GHADERI, S. F.; SANGARI, M. S. Integrating energy and water

optimization in buildings using multi-objective mixed-integer linear programming. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 62, p. 102409, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720306302>>. Acesso em: 31 maio. 2025.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe**. 2025. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>>. Acesso em: 4 jan. 2026.

FOROOZANDEH, Z.; RAMOS, S.; SOARES, J.; LEZAMA, F.; VALE, Z.; GOMES, A.; JOENCH, R. L. A mixed binary linear programming model for optimal energy management of smart buildings. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 7, p. 1719, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/7/1719>>. Acesso em: 16 dez. 2024.

FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. **AMPL: a Modeling Language for Mathematical Programming**. 2da. ed. [s.l.] : Thomson, 2003.

IBM. **IBM ILOG CPLEX Users' Manual for CPLEX**, 2009. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/products/ilog-cplex-optimization-studio>>. Acesso em: 12 jan. 2026.

JING, T.; ZHAO, Y. Optimizing energy consumption in smart buildings: a model for efficient energy management and renewable integration. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 323, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778824008703>>. Acesso em: 29 jun. 2025.

JMHPower. **Battery Energy Storage System – 1000 kWh**. [s.d.]. Disponível em: <<https://jmhpower.com/pt/product/1-mwh-battery-storage-power-plant/>>. Acesso em: 11 jul. 2025.

KHAN, I.; MAHMOOD, A.; JAVAID, N.; RAZZAQ, S.; KHAN, R. D.; ILAHI, M. Smart home energy management systems: research challenges and survey. **Alexandria Engineering Journal**, [s. l.], v. 92, p. 117–170, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016824001728#keys0005>>. Acesso em: 24 jun. 2025.

LEITAO, J.; GIL, P.; RIBEIRO, B.; CARDOSO, A. A survey on home energy management. **IEEE Access**, [s. l.], v. 8, p. 5699–5722, 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8948036>>. Acesso em: 24 jun. 2025.

PARVIN, K.; LIPU, M. S. H.; HANNAN, M. A.; ABDULLAH, M. A.; JERN, K. P.; BEGUM, R. A.; MANSUR, M.; MUTTAQI, K. M.; MAHLIA, T. M. I.; DONG, Z. Y. Intelligent controllers and optimization algorithms for building energy management towards achieving sustainable development: challenges and prospects. **IEEE Access**, [s. l.], v. 9, p. 41577–41602, 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9374412>>. Acesso em: 2 jun. 2025.

PILLAY, T. L.; SAHA, A. K. A review of metaheuristic optimization techniques for effective energy conservation in buildings. **Energies**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 1547, 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/17/7/1547>>. Acesso em: 27 jun.

2025.

TESLA. **Model 3 Performance Electric AWD Sedan Tesla**. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.tesla.com/model3-performance>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

YI, L.; ZHANG, H.; WANG, Y.; LUO, B.; FAN, L.; LIU, J.; HUA LI, G. Multi-objective global dynamic optimal scheduling of smart building loads considering carbon emissions. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 301, p. 113740, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823009702>>. Acesso em: 3 maio. 2025.