XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Modelagem de caixa cinza em eficiência energética de edifícios: uma revisão de literatura

Modelado de caja gris en eficiencia energética de edificios: una revisión de literatura

Grey-box modeling in building energy efficiency: a literature review

Eficiência Energética / *Eficiencia energética / Energy efficiency*

Procheira, Lucas Adler R.
Mestre, UFSC, Florianópolis, Brasil, procheira.lucas@gmail.com

Westphal, Fernando S.
Doutor, UFSC, Florianópolis, Brasil, fernando.sw@ufsc.br`

Resumo

O artigo aborda a aplicação da modelagem de caixa cinza na simulação do desempenho energético de edifícios, destacando sua capacidade de equilibrar precisão e simplicidade ao integrar conhecimentos

físicos com dados empíricos. A revisão sistemática da literatura, seguindo a metodologia PRISMA 2020, identificou 40 estudos relevantes que demonstram a eficácia da abordagem em otimizar o consumo energético, especialmente em sistemas HVAC. A modelagem de caixa cinza permite a calibração de modelos com dados reais, oferecendo previsões mais precisas e reduzindo o tempo de processamento em comparação com modelos de caixa branca e preta.

Palavras-chave: Revisão. Simulação de desempenho energético. Caixa cinza.

Resumen

El artículo aborda la aplicación de la modelización de caja gris en la simulación del rendimiento energético de los edificios, destacando su capacidad para equilibrar precisión y simplicidad al integrar conocimientos físicos con datos empíricos. La revisión sistemática de la literatura, siguiendo la metodología PRISMA 2020, identificó 40 estudios relevantes que demuestran la eficacia de este enfoque en la optimización del consumo energético, especialmente en sistemas HVAC. La modelización de caja gris permite la calibración de modelos con datos reales, proporcionando predicciones más precisas y reduciendo el tiempo de procesamiento en comparación con los modelos de caja blanca y negra.

Palabras clave: Revisión. Simulación del rendimiento energético. Caja gris.

Abstract

The article discusses the application of gray-box modeling in building energy performance simulation, emphasizing its ability to balance accuracy and simplicity by integrating physical knowledge with empirical data. A systematic literature review following the PRISMA 2020 methodology identified 40 relevant studies demonstrating the effectiveness of this approach in optimizing energy consumption, particularly in HVAC systems. Gray-box modeling allows for the calibration of models with real data, providing more accurate predictions and reducing processing time compared to white-box and black-box models. However, challenges remain, including its application in early design stages and the need for simplified models.

Keywords: Review. Energy performance simulation. Gray box.

Introdução

A simulação do desempenho energético de edifícios tem um papel essencial na arquitetura, oferecendo uma ferramenta crucial para prever e analisar o comportamento energético das construções (STRUCK; HENSEN, 2007). Essa prática permite que arquitetos e engenheiros tomem decisões seguras, visando a otimização da eficiência energética e o conforto dos ocupantes (MAZZARELLA; PASINI, 2009). Dentre as diversas metodologias de modelagem, a simulação de caixa cinza se destaca por sua flexibilidade, conseguindo equilibrar precisão e simplicidade de maneira eficaz (K; M; H; C, 2018).

A abordagem de caixa cinza combina aspectos dos modelos de caixa branca e caixa preta, equilibrando complexidade e praticidade. Enquanto os modelos de caixa branca exigem um conhecimento detalhado dos processos físicos, como equações de transferência de calor, os modelos de caixa preta dependem de poucos dados de entrada, como medições de temperatura, sem considerar as interações internas do sistema. A caixa cinza integra o conhecimento físico com dados empíricos, oferecendo uma solução intermediária mais precisa e aplicável. (TOHIDI; CALI; TAMM; ORTIZ *et al.*, 2022). A simulação de caixa cinza integra o conhecimento físico dos sistemas, como as propriedades térmicas dos materiais, com dados empíricos, como medições de sensores em tempo real. Um exemplo prático é a modelagem térmica de um edifício que utiliza equações simplificadas de transferência de calor (conhecimento físico) ajustadas com dados reais de temperatura interna e externa (dados empíricos). Essa abordagem resulta em um modelo mais simplificado que o da caixa branca, mas ainda mais informativo e preciso do que o da caixa preta (GUIDOTTI; MONREALE; RUGGIERI; TURIN *et al.*, 2019).

Em se tratando de desempenho energético de edifícios, essa abordagem se mostra útil diante da complexidade dos sistemas de construção, que envolvem interações entre componentes arquitetônicos, sistemas mecânicos e condições ambientais. A simulação de caixa cinza permite uma modelagem prática, preservando a precisão necessária para fornecer uma compreensão mais clara sobre o desempenho do edifício, especialmente na previsão do consumo de energia para sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (LECOCQ; PASCUAL; SALOM, 2025). Além disso, a simulação de caixa cinza facilita a calibração do modelo por meio de dados reais de medição, ajustando-o iterativamente para alinhar-se ao desempenho observado. Essa capacidade de ajuste torna a abordagem uma ferramenta valiosa, oferecendo um equilíbrio eficiente entre precisão e aplicabilidade prática, auxiliando na otimização do desempenho energético dos edifícios (LI; O'NEILL; ZHANG; CHEN *et al.*, 2021).

Observa-se, contudo, que a literatura sobre o tema ainda é escassa, especialmente no contexto brasileiro. Desta forma, este trabalho tem por objetivo realizar uma revisão da literatura sobre a aplicação da modelagem de caixa cinza em estudos de eficiência energética de edifícios. Através

da análise de pesquisas recentes, será possível compreender o estado da arte neste tema e avançar na construção de conhecimento.

Método

A simulação térmica de caixa cinza é ampla e abrange diversas áreas tangentes à construção civil, podendo ser utilizada em edificações, sistemas de ar-condicionado, elementos eletrônicos e em qualquer área em que as trocas de calor possam interferir no desempenho do objeto de estudo. Esta revisão de literatura concentra-se na aplicação dessa técnica especificamente à eficiência energética de edifícios.

Para a realização desta revisão, foram utilizadas as etapas estabelecidas pela metodologia de revisão sistemática PRISMA 2020. A pesquisa bibliográfica foi conduzida nas bases de dados *ScienceDirect*, *Web of Science* e Google Acadêmico utilizando as seguintes *strings* de pesquisa em português: “caixa cinza” AND “modelagem” AND “simulação energética”. Para as bases em inglês foi utilizada a *string* “*Grey-box*” OR “*Greybox*” OR “Grey box” AND “*modelling*" AND “*simulation*”. Nas bases apresentadas foram utilizados filtros para que a pesquisa se restringisse a temas relevantes à construção civil. Pesquisas abrangendo áreas de saúde e ciências da computação foram eliminadas.

Foram identificados 42.760 artigos na *ScienceDirect*, 806 na *Web of Science* e 16.200 na base Google Acadêmico, sendo no total 44.016 artigos. Em uma primeira filtragem foram selecionados apenas os artigos pertinentes à construção civil. Na base *ScienceDirect* na filtragem por *Subject areas,* foram selecionados os filtros *Engineering, Environmental Science* e *Energy*; na base Web of Science foram refinados a partir do filtro *Research Areas* os itens *Engineering, Construction Building Tecnology* e *Architecture*; a base Google Acadêmico não permite filtragem; desta forma foram eliminados artigos de periódicos de outras áreas, resultando em 59.766 artigos. Foram selecionados, em ordem de aparição por relevância, os 1000 primeiros artigos de cada uma das bases de dados e conferindo as suas duplicatas, resultaram em 1496 artigos.

Dos 1496 artigos foi feita a seleção por títulos e resumos, resultando em 211 artigos de interesse à revisão. A partir destes foi feita a leitura dos seus resumos reduzindo ao final para a seleção de 64 artigos. Do restante, foi efetuada uma leitura do seu conteúdo para identificar quais eram relevantes para a pesquisa, 40 foram selecionados para análise após a leitura e exclusão dos trabalhos que não se enquadravam no escopo desta revisão.

Resultados

Observou-se que o modelo caixa cinza possui sua utilização de forma ampla na simulação de desempenho energético de edifícios, sendo empregado em diversas aplicações, como avaliação do desempenho energético do edifício, análise preditiva de consumo energético, simplificação de modelos de simulação ou controle de automação de aparelhos de climatização. Uma das principais vantagens da simulação de caixa cinza é a capacidade de calibrar os modelos através de dados reais de monitoramento, permitindo um ajuste fino das predições para que se alinhem melhor ao comportamento observado do edifício (GOURLIS; KOVACIC, 2016).

As pesquisas abrangem a utilização de caixa cinza no cálculo de desempenho de sistemas de condicionamento de ar em residências e na otimização do consumo de de energia de edificações comerciais, projetando-se um modelo de automação dos equipamentos (AFRAM; FUNG; JANABI-SHARIFI; RAAHEMIFAR, 2018; GUNAY; SHEN; YANG, 2017). Podem ser divididos entre modelos *data-driven* ou com previsões de larga escala (AHMAD; CHEN; GUO; WANG, 2018). Há casos de sua utilização ser feita para desenvolvimento de modelos substitutos, a fim de facilitar a realização de simulações de sistemas complexos e potencializar as suas automações (ALTIERI; PATEL; LAZARUS; BRANCA, 2023; BRASTEIN; LIE; SHARMA; SKEIE, 2019; ROMAN; BRE; FACHINOTTI; LAMBERTS, 2020). Análises de baixo custo são beneficiadas com a utilização de caixa cinza (ALTIERI; PATEL; LAZARUS; BRANCA, 2023). A modelagem de edifícios baixos também se beneficia, como demonstrado por (SHI; NEWSHAM; PARDASANI; GUNAY, 2020), onde foram investigados diversos modos de simulação e se observou que a função do custo afeta diretamente a acurácia dos modelos térmicos, especialmente quando há previsões com maior escala temporal. Foi demonstrado que um modelo bem desenvolvido de caixa cinza possui desempenho comparável ao de um modelo de caixa preta, com a vantagem adicional de fornecer parâmetros e controle estimados (Yu, Georges et al. 2020; Yu, Ren et al. 2024). Os modelos de caixa cinza podem ser utilizados para automatizar processos de simulação, principalmente se utilizados em conjuntos com projetos em BIM (ANDRIAMAMONJY; KLEIN; SAELENS, 2019), assim como modelos de controle preditivo, apresentando um grande potencial (ARROYO; SPIESSENS; HELSEN, 2020). Tais modelos apresentam um bom desempenho ao se fazer a utilização de simulações inversas (DE CONINCK; MAGNUSSON; ÅKESSON; HELSEN, 2016), quando se utilizam dados para estimar parâmetros e simular processos físicos (EZE; LEE; AN; JOO *et al.*, 2024). Outra aplicação das simulações inversas é a correção de erros de dimensionamento de sistemas de ar-condicionado. Na sua pesquisa (GUNAY; HOBSON; DARWAZEH; BURSILL, 2023) demonstraram que foi possível reduzir o consumo destes equipamentos em 43% na utilização para aquecimento ambiente e 22% no resfriamento.

Controle de automação dos processos de consumo energético foram um ponto em comum de algumas das pesquisas identificadas, com algumas utilizações em reformas, que obtiveram uma

redução de carga térmica de até 80%. Na pesquisa, os autores compararam três arquétipos de residências, tendo modelos de caixa cinza representando a edificação como construída (*as-built*), um *retrofit* padrão, um processo de modernização ou de requalificação de uma edificação existente, e outro avançado, quando a intervenção feita na edificação ocorre de forma mais profunda. Na figura 1 evidencia-se que as cargas foram reduzidas nos três arquétipos, sendo cada um destes, um modelo de residência típica irlandesa, TH03 sendo uma casa com 2 janelas, TH06 3 janelas e TH07 3 janelas e 1 porta-janela. No modelo TH03 a diferença entre o *as-built* e os retrofits chega a mais de 50 %. No modelo TH06 a porcentagem de redução é menos acentuada, mas chega a 1/3 do modelo *as-built*. No arquétipo TH07 a carga térmica não teve uma grande variação, apresentando um aumento em um *retrofit* padrão e uma leve diminuição no *retrofit* avançado (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) (BEAGON; BOLAND; SAFFARI, 2020).

Figura 1: Cargas de consumo e arquétipos das edificações



Fonte: (BEAGON; BOLAND; SAFFARI, 2020) traduzido pelos autores

Os modelos de caixa cinza podem ser utilizados em conjunto com caixas pretas ou algoritmos genéticos (ARUTA; ASCIONE; BIANCO; MAURO *et al.*, 2023; HOSSAIN; ZHANG; ARDAKANIAN, 2021) melhorando o desempenho destes. Embora tenham uma acurácia maior, o tempo de treinamento dos algoritmos genéticos, que pode chegar a 2 dias, acaba gerando uma quebra na fluidez dos processos de modelagem. Os modelos de caixa cinza apresentam resultados similares, mas com uma velocidade maior, sem a necessidade de dias de treinamento do modelo, demonstrando assim, que a utilização deste último para a simplificação dos processos de simulação apresenta melhoras nos processos de modelagem (TALIB; PARK; IM; JOE, 2023; VIVIAN; PRATAVIERA; GASTALDELLO; ZARRELLA, 2024; WANG; CHEN, 2019).

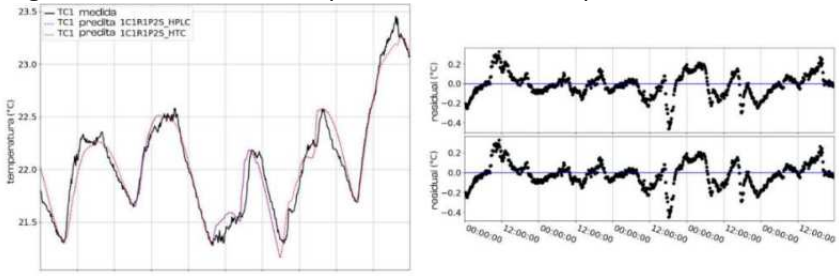
Estimativas do comportamento térmico de edificações com confiança entre 90% e 95% foram alcançadas em simulações em caixa cinza no estudo de blocos de apartamentos desenvolvido por (ATTOUE; SHAHROUR; MROUEH; YOUNES, 2019; BAGLE; MAREE; WALNUM; SARTORI, 2022).

A aplicação de modelos de caixa cinza e preta permitiram a redução do consumo energético de uma residência em até 39,8%, simulando a otimização de processos (GREEN; GARIMELLA, 2021).

Outros modelos foram desenvolvidos para estimativas de transferências e perdas de calor dos edifícios para que se pudesse preencher uma lacuna de simulações, e os resultados se mostraram

muito próximos das medições, atestando o bom funcionamento do modelo (HOLLICK; GORI; ELWELL, 2020). Na figura 2 é possível identificar os resultados. As 3 linhas apresentadas do modelo base e duas simulações se apresentam equiparadas com pequenos desvios, demonstrando bom o desempenho dos modelos.

Figura 2: Medidas de temperaturas medida e previsões simuladas

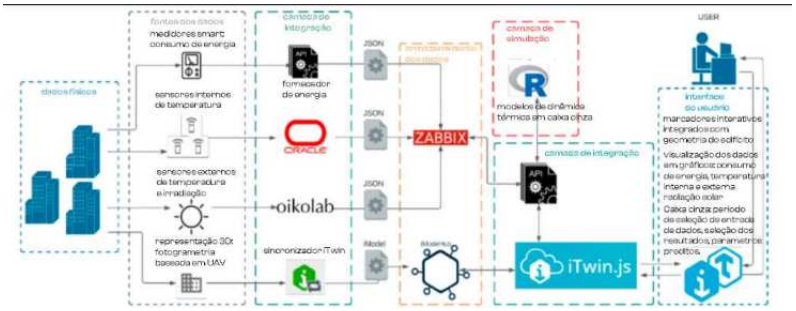


Fonte: Hollick, Gori et al. (2020) traduzido pelos autores

A mineração de dados em larga escala representa uma das potenciais aplicações das simulações de caixa cinza em edificações. Esse processo envolve uma sequência de etapas metodológicas, iniciando-se com a coleta de dados, seguida pelo pré-processamento, que visa preparar e organizar as informações coletadas. Em seguida, realiza-se uma análise exploratória, cujo objetivo é identificar padrões, tendências e anomalias nos dados. Após essa fase, procede-se à mineração propriamente dita, na qual são aplicados algoritmos específicos para extrair os dados relevantes. Posteriormente, os dados passam por um estágio de pós-mineração, onde são validados, refinados e interpretados criticamente. Por fim, os resultados obtidos são aplicados nos modelos. Contudo, além das dificuldades em obtenção das informações, tal utilização esbarra em questões legais e éticas na obtenção dos dados detalhados dos edifícios, que ainda precisam de maior aprofundamento para sua utilização de forma mais ampla e segura (FAN; XIAO; LI; WANG, 2018) Além da mineração de dados, a utilização conjunta da caixa cinza com *Machine-Learning* no processo de estimular dinâmicas térmicas também se apresenta como uma das formas de se utilizar a ferramenta na simulação de desempenho térmico das edificações (CIBIN; TIBO; GOLMOHAMADI; SKOU *et al.*, 2023). As simulações destas dinâmicas térmicas podem auxiliar no desenvolvimento de gêmeos digitais, que são modelos virtuais que replicam um edifício ou sistema físico, permitindo a análise e otimização do seu desempenho energético. O processo de desenvolvimento de um gêmeo digital envolve uma série de etapas interconectadas. Inicialmente, ocorre a obtenção dos dados, fase em que são coletadas informações relevantes do edifício, como características construtivas, dados climáticos, medições de temperatura, umidade e consumo energético, por meio de sensores, sistemas de monitoramento ou fontes históricas.
Os dados são integrados em uma plataforma única, passando por processos de limpeza, normalização e combinação para garantir sua qualidade. Em seguida, são armazenados em

bancos de dados, assegurando sua disponibilidade e integridade. Com os dados preparados, realizam-se simulações em caixa cinza, que combinam modelos físicos e dados empíricos para prever o comportamento energético do edifício, equilibrando precisão e complexidade computacional. Os resultados dessas simulações alimentam o gêmeo digital, que é constantemente atualizado para refletir o estado atual do edifício, permitindo análises em tempo real e projeções futuras. Esse modelo virtual é então disponibilizado ao usuário por meio de interfaces intuitivas, facilitando a interação e otimização do desempenho energético. A Figura 4 ilustra o processo completo, destacando suas iterações e ramificações. Essa abordagem estruturada não apenas identifica dinâmicas térmicas, mas também cria um gêmeo digital funcional e adaptável para aprimorar a eficiência energética e a sustentabilidade das edificações. (MORKUNAITE; KARDOKA; PUPEIKIS; FOKAIDES *et al.*, 2023).

Figura 3: Processo de desenvolvimento de um gêmeo digital



Fonte: (MORKUNAITE; KARDOKA; PUPEIKIS; FOKAIDES et al., 2023). Traduzido pelos autores

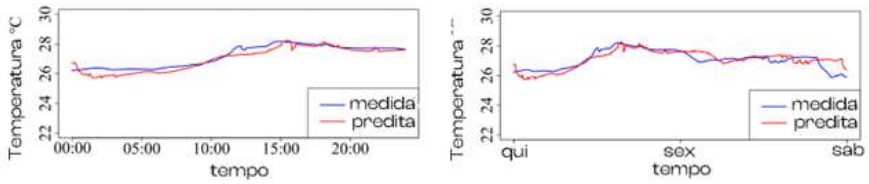
A redução no tempo de processamento tem sido uma das motivações mais relevantes na busca por soluções com modelagem em caixa cinza., permitindo que os profissionais possam conseguir soluções em processos cinco vezes mais rápidos em comparação à modelagem de caixa branca ou preta, que exigem um poder computacional muito grande (BERGER; ALLERY; MACHARD, 2022).

Uma das formas de se produzir um modelo de caixa cinza é a partir da redução de parâmetros encontrados em um modelo de caixa branca, algo próximo da metodologia de gêmeos digitais. Com esta redução da caixa cinza pode-se obter um bom resultado nos resultados preditos em relação aos dados medidos. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os gráficos das temperaturas medidas *in-loco* e a predição do modelo em caixa cinza, demonstra, por sua vez, que os resultados obtidos são muito próximos e caracterizam um bom desempenho do modelo (TOHIDI; CALI; TAMM; ORTIZ *et al.*, 2022). Nas reduções dos parâmetros da caixa branca para a caixa cinza é possível identificar que as variáveis de ventilação e ganho de calor interno podem ser consideradas irrelevantes no resultado final, podendo ser simplificados (WALNUM;

LINDBERG; SARTORI, 2020). Da mesma forma, o pré-processamento dos dados antes de se alimentar o modelo de caixa cinza não apresenta uma melhora significativa no resultado da simulação (YU; GEORGES; IMSLAND, 2021; YU; SKEIE; KNUDSEN; REN *et al.*, 2022), além de poder gerar um maior número de incertezas e lacunas no modelo.

Para quantificar e corrigir tais incertezas e lacunas nas simulações é possivel se utilizar de modelos estatísticos, como métodos Monte Carlo e semi-analíticos (CHALABI; DAS; MILNER; DAVIES *et al.*, 2015). Esse passo se torna imprescindível para um modelo com resultados acurados (SHAMSI; ALI; ALSHEHRI; O'DONNELL, 2020). Modelos que se utilizam de funções estocásticas também estão presentes nas metodologias para redução de erros das simulações. Neste caso, aconselha-se a utilização de modelos com parâmetros identificáveis para que se possa determinar a eficácia (LEPRINCE; MADSEN; MILLER; REAL *et al.*, 2022).

Figura 4: Diferença das temperaturas medidas *in-loco* e preditas utilizando simulação em caixa cinza



Fonte: Tohidi, Cali et al. (2022). Traduzido e adaptado pelos autores

Sistemas Gaussianos se apresentaram como uma alternativa para a correção dos erros encontrados, principalmente em projetos com uma menor generalização e uma maior capacidade de previsão dos dados (GRAY; SCHMIDT, 2018). O uso dos modelos de caixa cinza é um desafio, pois necessitam de uma calibração de parâmetros, mas deve-se tomar o cuidado com a "sobre-parametrização", que pode ocasionar uma perda de acurácia e uma maior necessidade computacional no processo. É importante notar que mesmo com boa acurácia, os modelos de caixa cinza ainda podem perder desempenho em atingir os melhores resultados possíveis, pois apresentam limitações que devem sempre ser avaliadas junto da sua interpretação física (BRASTEIN; GHADERI; PFEIFFER; SKEIE, 2020; BRASTEIN; PERERA; PFEIFER; SKEIE, 2018).

Outro desafio na utilização de modelos em caixa cinza são a compreensão do perfil de ocupação das edificações, uma vez que esta variável pode apresentar uma grande interferência no resultado final, principalmente quando se utiliza de simulações com maior uso de modelos algorítmicos (FRAHM; MEISENBACHER; KLUMPP; MIKUT *et al.*, 2022). É importante notar que um aumento na complexidade para tentar corrigir erros do modelo não acarreta necessariamente em uma melhora no desempenho final do processo (YU; YOU; JIANG; ZONG *et al.*, 2017).

Discussão

A modelagem em caixa cinza possui um escopo amplo e multidisciplinar, conectando diversas áreas do conhecimento. Quando aplicada à simulação da eficiência térmica de edificações, mostra resultados coerentes. Essa abordagem equilibra a precisão dos modelos de caixa branca, que exigem alto detalhamento físico, e a simplicidade dos modelos de caixa preta, que carecem de informações internas. Combinando dados empíricos e modelos físicos, a modelagem em caixa cinza oferece uma solução eficiente entre precisão e praticidade.
Apesar dos avanços, a modelagem em caixa cinza ainda enfrenta desafios, sendo mais aplicada a edifícios construídos ou em estágios avançados de projeto, onde há dados para calibração. Isso limita seu uso em momentos em que se possui poucos dados. Há, portanto, a necessidade de desenvolver modelos simplificados e robustos para essas etapas, ampliando sua aplicabilidade e impacto na eficiência energética das edificações.

Conclusões

A modelagem em caixa cinza apresenta-se como uma ferramenta promissora para a simulação da eficiência térmica em edificações, superando muitas das limitações dos modelos de caixa branca e caixa preta. No entanto, sua aplicação em estágios com uma limitação de acesso aos dados ainda é um campo pouco explorado, demandando pesquisas que explorem modelos simplificados e robustos para essa fase. O avanço nessa direção não apenas ampliaria a utilidade da abordagem de caixa cinza, mas também contribuiria para alimentar com mais informações os métodos de tomada de decisões nas fases iniciais do projeto, promovendo a eficiência energética e a sustentabilidade no setor da construção civil.

Referências

AFRAM, A.; FUNG, A. S.; JANABI-SHARIFI, F.; RAAHEMIFAR, K. Development and performance comparison of low-order black-box models for a residential HVAC system. **JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING**, 15, p. 137-155, JAN 2018.

AHMAD, T.; CHEN, H. X.; GUO, Y. B.; WANG, J. Y. A comprehensive overview on the data driven and large scale based approaches for forecasting of building energy demand: A review. **ENERGY AND BUILDINGS**, 165, p. 301-320, APR 15 2018.

ALTIERI, D.; PATEL, M. K.; LAZARUS, J.; BRANCA, G. Numerical analysis of low-cost optimization measures for improving energy efficiency in residential buildings. **Energy**, 273, p. 127257, 2023/06/15/ 2023.

ANDRIAMAMONJY, A.; KLEIN, R.; SAELENS, D. Automated grey box model implementation using BIM and Modelica. **ENERGY AND BUILDINGS**, 188, p. 209-225, APR 1 2019.

ARROYO, J.; SPIESSENS, F.; HELSEN, L. Identification of multi-zone grey-box building models for use in model predictive control. **JOURNAL OF BUILDING PERFORMANCE SIMULATION**, 13, n. 4, p. 472-486, JUL 3 2020.

ARUTA, G.; ASCIONE, F.; BIANCO, N.; MAURO, G. M. *et al.* Optimizing heating operation via GA- and ANN-based model predictive control: Concept for a real nearly-zero energy building. **Energy and Buildings**, 292, p. 113139, 2023/08/01/ 2023.

ATTOUE, N.; SHAHROUR, I.; MROUEH, H.; YOUNES, R. Determination of the Optimal Order of Grey-Box Models for Short-Time Prediction of Buildings' Thermal Behavior. **BUILDINGS**, 9, n. 9, SEP 2019.

BAGLE, M.; MAREE, P.; WALNUM, H. T.; SARTORI, I. Identifying grey-box models from archetypes of apartment block buildings. *In*: PROCEEDINGS OF BUILDING SIMULATION 2021: 17TH CONFERENCE OF IBPSA, 2022, **17**. p. 1091-1098. DOI: 10.26868/25222708.2021.30162.

BEAGON, P.; BOLAND, F.; SAFFARI, M. Closing the gap between simulation and measured energy use in home archetypes. **ENERGY AND BUILDINGS**, 224, OCT 1 2020.

BERGER, J.; ALLERY, C.; MACHARD, A. Assessing the wall energy efficiency design under climate change using POD reduced order model. **Energy and Buildings**, 268, p. 112187, 2022/08/01/ 2022.

BRASTEIN, O. M.; GHADERI, A.; PFEIFFER, C. F.; SKEIE, N. O. Analysing uncertainty in parameter estimation and prediction for grey-box building thermal behaviour models. **ENERGY AND BUILDINGS**, 224, OCT 1 2020.

BRASTEIN, O. M.; LIE, B.; SHARMA, R.; SKEIE, N. O. Parameter estimation for externally simulated thermal network models. **ENERGY AND BUILDINGS**, 191, p. 200-210, MAY 15 2019.

BRASTEIN, O. M.; PERERA, D. W. U.; PFEIFER, C.; SKEIE, N. O. Parameter estimation for grey-box models of building thermal behaviour. **ENERGY AND BUILDINGS**, 169, p. 58-68, JUN 15 2018.

CHALABI, Z.; DAS, P.; MILNER, J.; DAVIES, M. *et al.* Risk analysis of housing energy efficiency interventions under model uncertainty. **Energy and Buildings**, 109, p. 174-182, 2015/12/15/ 2015.

CIBIN, N.; TIBO, A.; GOLMOHAMADI, H.; SKOU, A. *et al.* Machine learning-based algorithms to estimate thermal dynamics of residential buildings with energy flexibility. **JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING**, 65, APR 15 2023.

DE CONINCK, R.; MAGNUSSON, F.; ÅKESSON, J.; HELSEN, L. Toolbox for development and validation of grey-box building models for forecasting and control. **JOURNAL OF BUILDING PERFORMANCE SIMULATION**, 9, n. 3, p. 288-303, 2016.

EZE, F.; LEE, W.-J.; AN, Y. S.; JOO, H. *et al.* Experimental and simulated evaluation of inverse model for shallow underground thermal storage. **Case Studies in Thermal Engineering**, 59, p. 104535, 2024/07/01/ 2024.

FAN, C.; XIAO, F.; LI, Z.; WANG, J. Unsupervised data analytics in mining big building operational data for energy efficiency enhancement: A review. **Energy and Buildings**, 159, p. 296-308, 2018/01/15/ 2018.

FRAHM, M.; MEISENBACHER, S.; KLUMPP, E.; MIKUT, R. *et al.* Multi-Zone Grey-Box Thermal Building Identification with Real Occupants. *In*: PROCEEDINGS OF THE 2022 THE 9TH ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS FOR ENERGY-EFFICIENT BUILDINGS, CITIES, AND TRANSPORTATION, BUILDSYS 2022, 2022, p. 484-487. DOI: 10.1145/3563357.3567403.

GOURLIS, G.; KOVACIC, I. A study on building performance analysis for energy retrofit of existing industrial facilities. **APPLIED ENERGY**, 184, p. 1389-1399, 2016-12-15 2016.

GRAY, F. M.; SCHMIDT, M. A hybrid approach to thermal building modelling using a combination of Gaussian processes and grey-box models. **ENERGY AND BUILDINGS**, 165, p. 56-63, APR 15 2018.

GREEN, C.; GARIMELLA, S. Residential microgrid optimization using grey-box and black-box modeling methods. **ENERGY AND BUILDINGS**, 235, MAR 15 2021.

GUIDOTTI, R.; MONREALE, A.; RUGGIERI, S.; TURIN, F. *et al.* A Survey of Methods for Explaining Black Box Models. **ACM COMPUTING SURVEYS**, 51, n. 5, 2019-01-01 2019.

GUNAY, B.; HOBSON, B. W.; DARWAZEH, D.; BURSILL, J. Estimating energy savings from HVAC controls fault correction through inverse greybox model-based virtual metering. **ENERGY AND BUILDINGS**, 282, MAR 1 2023.

GUNAY, B.; SHEN, W. M.; YANG, C. S. Characterization of a building's operation using automation data: A review and case study. **BUILDING AND ENVIRONMENT**, 118, p. 196-210, JUN 2017.

HOLLICK, F. P.; GORI, V.; ELWELL, C. A. Thermal performance of occupied homes: A dynamic grey-box method accounting for solar gains. **ENERGY AND BUILDINGS**, 208, FEB 1 2020.

HOSSAIN, M. M.; ZHANG, T. Y.; ARDAKANIAN, O. Identifying grey-box thermal models with Bayesian neural networks. **ENERGY AND BUILDINGS**, 238, MAY 1 2021.

K, A.; M, J.; H, S.; C, V. Comparative Analysis of White-, Gray- and Black-Box Models for Thermal Simulation of Indoor Environment: Teaching Building Case Study. *In*: 2018 Building Performance Analysis Conference and SimBuild co-organized by ASHRAE and IBPSA-USA, 2018, **8**. Chicago, USA: ASHRAE/IBPSA-USA, 2018/September. p. 173-180. Disponível em: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=simbuild2018_C025.

LECOCQ, E.; PASCUAL, J.; SALOM, J. Development of physically coherent grey-box models for residential buildings using a simplified adjustment method. **ENERGY AND BUILDINGS**, 328, 2025-02-01 2025.

LEPRINCE, J.; MADSEN, H.; MILLER, C.; REAL, J. P. *et al.* Fifty shades of grey: Automated stochastic model identification of building heat dynamics. **ENERGY AND BUILDINGS**, 266, JUL 1 2022.

LI, Y.; O'NEILL, Z.; ZHANG, L.; CHEN, J. *et al.* Grey-box modeling and application for building energy simulations-A critical review. **RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS**, 146, 2021-05-06 2021.

MAZZARELLA, L.; PASINI, M. Building energy simulation and object-oriented modelling: Review and reflections upon achieved results and further developments. **IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009**, 01/01 2009.

MORKUNAITE, L.; KARDOKA, J.; PUPEIKIS, D.; FOKAIDES, P. *et al.* Digital Twin for Grey Box modeling of Multistory residential building thermal dynamics. *In*: 2023 IEEE 9TH WORLD FORUM ON INTERNET OF THINGS, WF-IOT, 2023, DOI: 10.1109/WF-IOT58464.2023.10539560.

ROMAN, N. D.; BRE, F.; FACHINOTTI, V. D.; LAMBERTS, R. Application and characterization of metamodels based on artificial neural networks for building performance simulation: A systematic review. **ENERGY AND BUILDINGS**, 217, JUN 15 2020.

SHAMSI, M. H.; ALI, U.; ALSHEHRI, F.; O'DONNELL, J. Uncertainty Quantification In Predictive Modelling Of Heat Demand Using Reduced-order Grey Box Models. *In*: PROCEEDINGS OF BUILDING SIMULATION 2019: 16TH CONFERENCE OF IBPSA, 2020, p. 4507-4514. DOI: 10.26868/25222708.2019.210246.

SHI, Z. X.; NEWSHAM, G.; PARDASANI, A.; GUNAY, H. B. On Formulation and Training of Grey-box Thermal Model for Low-rise Residential Buildings. *In*: PROCEEDINGS OF BUILDING SIMULATION 2019: 16TH CONFERENCE OF IBPSA, 2020, p. 838-844. DOI: 10.26868/25222708.2019.210251.

STRUCK, C.; HENSEN, J., 2007, **On supporting design decisions in conceptual design addressing specification uncertainties using performance simulation**. 1434-1439.

TALIB, A.; PARK, S.; IM, P.; JOE, J. Grey-box and ANN-based building models for multistep-ahead prediction of indoor temperature to implement model predictive control. **ENGINEERING APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE**, 126, NOV 2023.

TOHIDI, S. S.; CALI, D.; TAMM, M.; ORTIZ, J. *et al.* From white-box to grey-box modelling of the heat dynamics of buildings. *In*: BUILDSIM NORDIC 2022, 2022, **362**. DOI: 10.1051/e3sconf/202236212002.

VIVIAN, J.; PRATAVIERA, E.; GASTALDELLO, N.; ZARRELLA, A. A comparison between grey-box models and neural networks for indoor air temperature prediction in buildings. **JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING**, 84, MAY 1 2024.

WALNUM, H. T.; LINDBERG, K. B.; SARTORI, I. Influence of inputs knowledge on Grey-box models for Demand Response in Buildings. *In*: PROCEEDINGS OF BUILDING SIMULATION 2019: 16TH CONFERENCE OF IBPSA, 2020, p. 4729-4736. DOI: 10.26868/25222708.2019.211410.

WANG, Z. Q.; CHEN, Y. X. Data-driven modeling of building thermal dynamics: Methodology and state of the art. **ENERGY AND BUILDINGS**, 203, NOV 15 2019.

YU, X. J.; GEORGES, L.; IMSLAND, L. Data pre-processing and optimization techniques for stochastic and deterministic low-order grey-box models of residential buildings. **ENERGY AND BUILDINGS**, 236, APR 1 2021.

YU, X. J.; SKEIE, K. S.; KNUDSEN, M. D.; REN, Z. R. *et al.* Influence of data pre-processing and sensor dynamics on grey-box models for space-heating: Analysis using field measurements. **BUILDING AND ENVIRONMENT**, 212, MAR 15 2022.

YU, X. J.; YOU, S.; JIANG, Y. W.; ZONG, Y. *et al.* An evolving experience learned for modelling thermal dynamics of buildings from live experiments: the Flexhouse story. *In*: POWER AND ENERGY SYSTEMS ENGINEERING, (CPESE 2017), 2017, **141**. p. 233-239. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.098.