ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Plataforma iterativa para predição do desempenho energético de habitações em sistemas construtivos leves

Iterative platform for predicting housing energy performance in lightweight systems

Guilherme Natal Moro
Universidade Estadual de Londrina | Londrina | Brasil | guilherme.natal@live.com
Rafaela Benan Zara
Universidade Estadual de Londrina | Londrina | Brasil | rafaela.benan.zara@uel.br
Rodrigo dos Santos Veloso Martins
Universidade Tecnológica Federal do Paraná | Apucarana | Brasil | rodrigomartins@utfpr.edu.br
Thalita Gorban Ferreira Giglio
Universidade Estadual de Londrina | Londrina | Brasil | thalita@uel.br

Resumo

O objetivo do estudo foi desenvolver uma ferramenta de decisões projetuais que visa dar suporte ao projetista quanto ao desempenho energético da envoltória de habitações de interesse social em sistema leve. Para isso, foi aplicado um método de árvore de decisão em um treinamento de um conjunto de dados que contempla 2048 simulações de uma habitação em sistema construtivo leve, para o clima de São Paulo, Brasil. Com base no treinamento dos dados por meio de um algoritmo fornecido pela biblioteca *Scikit-Learn* e usando a linguagem de programação *Python*, pode-se realizar a predição do consumo de energia para diferentes combinações de envoltória de habitações em sistema construtivo leve. Posteriormente, por meio da técnica de *benchmarking* foi definida uma escala de consumo que visa classificar a habitação em três níveis de desempenho sendo: eficiente; típica; ou ineficiente. Por fim, foi desenvolvida uma interface iterativa para análise de desempenho energético de habitações em sistemas leves permitindo ao projetista identificar quais as combinações de parâmetros construtivos resultam em menores valores de consumo de energia e maiores níveis de eficiência energética.

Palavras-chave: Aprendizagem de máquina. Árvore de decisões. Simulações computacionais. Eficiência energética. Habitação de interesse social.

Como citar:
MORO, G. N. et. al. Plataforma iterativa para predição do desempenho energético de habitações em sistemas construtivos leves. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

Abstract

This study aimed to develop a design decision tool to assist designers in optimizing the energy performance of lightweight social housing envelopes. To achieve this objective, a decision tree method was employed to train a dataset consisting of 2048 simulations of a social housing utilizing a lightweight construction system for the climate of São Paulo, Brasil. By training the dataset using an algorithm provided by the Scikit-Learn library and implmented in the Python programming language, energy consumption could be predicted for various combinations of lightweight building system housing envelope. Subsequently,utilizing the benchmarking techiniques, a consumption scale was established to classify the dwelling into three performance levels: efficient; typical; or inefficient. Finally, an iterative interface was developed for analysing the energy performance of lightweight systems houses, enabling designers to identify combinations of construction parameters associated with lower energy consumption and higher levels of energy efficiency.

Keywords: Machine learning. Decision tree. Computer simulations. Energy efficiency. Social housing.

INTRODUÇÃO

Sistemas construtivos leves em wood frame e steel frame vêm se destacando por apresentarem um potencial significativo em atingir melhores níveis de sustentabilidade e eficiência energética [1][2]. Considerando os aspectos sociais e ambientais, os benefícios estão associados à rapidez na execução, podendo suprir o setor habitacional em situações emergenciais; redução no consumo de recursos naturais; redução de desperdício e menor geração de gases responsáveis pelo efeito estufa [3][4][5].

No entanto, o baixo peso desses sistemas construtivos geralmente conduz a baixa inércia térmica, uma importante propriedade que atrasa os picos de temperatura em climas quentes e com alta amplitude térmica, como na cidade de São Paulo. Dessa forma, as edificações podem apresentar problemas relacionados ao baixo desempenho térmico, como o superaquecimento dos ambientes, grandes variações da temperatura do ar interno e maior demanda de energia para climatização [6][7][8].

Nesse sentido, diversas pesquisas têm sido realizadas no sentido de avaliar e melhorar o desempenho térmico e energético de sistemas construtivos leves quando esses são aplicados em climas quentes e em edificações naturalmente ventiladas. Tais estudos apontam como medidas para redução da carga térmica interna o uso de materiais isolantes [9][10], a utilização de uma camada interna com massa térmica [7][11][12], o aumento da capacidade de armazenamento térmico da envoltória obtidos pelo uso dos materiais de mudança de fase [8][13][14][15], aproveitamento da capacidade térmica do solo [16][17], redução das pontes térmicas [18][19], e a incorporação de estratégias para dissipação das cargas internas [20].

No entanto, em locais com temperaturas muito quentes, mesmo sistemas leves aprimorados, não são suficientes para o conforto térmico interno, indicando a necessidade de refrigeração mecânica [18]. De fato, Zara [21] observou que, em alguns casos, a redução da transmitância térmica e as condições de contato com o solo podem ser capazes de suprir a baixa inércia térmica do sistema construtivo. Todavia, a análise de sensibilidade dos sistemas leves mostrou que utilização de estratégias isoladas não

é suficiente para garantir bons níveis de desempenho termoenergético, sendo mais importante uma combinação adequada das características que compõem a edificação e que trabalham em conjunto para promover o melhor desempenho.

Nesse sentido, é de extrema importância um maior estudo dessa tipologia, possibilitando maior aprimoramento e difusão da tecnologia, principalmente porque os sistemas leves têm sua execução dificultada no Brasil, dentre outros aspectos, pela baixa capacidade térmica da envoltória em comparação com o limite definido na norma brasileira de desempenho ABNT NBR 15575 [22].

Visando o aprimoramento do desempenho energético de edificações residenciais executadas em sistemas construtivos leves, esta pesquisa tem como objetivo desenvolver uma ferramenta de decisões projetuais que visa dar suporte ao projetista quanto ao desempenho energético da envoltória de habitações de interesse social em sistema leve.

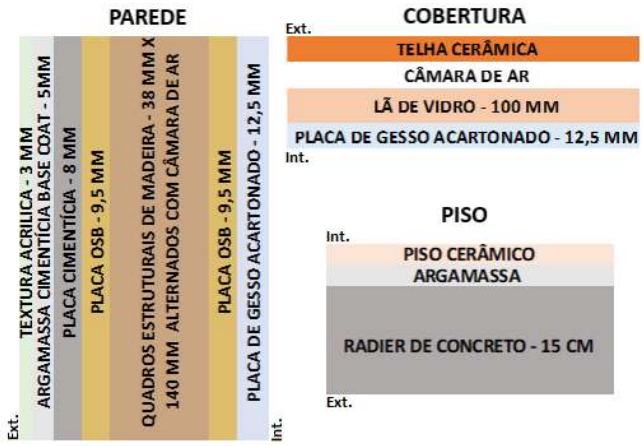
MÉTODO

Para atender o objetivo, este estudo contempla um conjunto de procedimentos, incluindo a composição de uma base de dados de consumo de energia (kWh/ano) gerada por simulação computacional em Zara [21], o treinamento dos dados pelo método de árvore de classificação e regressão (CART) desenvolvida em Moro, Martins e Giglio [23]; o desenvolvimento de um modelo de *benchmarking* para classificar a eficiência energética de habitações de interesse social em sistema leve; e, por fim, a criação da plataforma iterativa. O detalhamento das etapas do método é exposto a seguir.

CARACTERIZAÇÃO DO ARQUÉTIPO DE HABITAÇÃO EM SISTEMA LEVE

O conjunto de dados foi desenvolvido por Zara [21] com base em simulações computacionais de habitações de interesse social em sistema construtivo leve, para o clima da cidade de São Paulo (23° 37’ S, 46° 39’ O, 802 m). O modelo de habitação escolhido como arquétipo deste estudo segue os padrões do Programa Habitacional Minha Casa Minha Vida, e possui área útil total de 41,3 m², dividida em dois dormitórios, sala e cozinha conjugadas e banheiro. Possui sistema construtivo em wood frame composto por sistema de vedação vertical estruturado por montantes de pinus e constituído (de fora para dentro) por: placa cimentícia, placa de OSB (oriented strand board), câmara de ar entre montantes, placa de OSB e placa de gesso acartonado. O sistema de cobertura é composto por telhas, câmara de ar, isolamento térmico e forro; e o piso, por fundação do tipo radier e piso cerâmico. As composições típicas do sistema podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1: Composição do sistema construtivo



Fonte: Adaptado de [21]

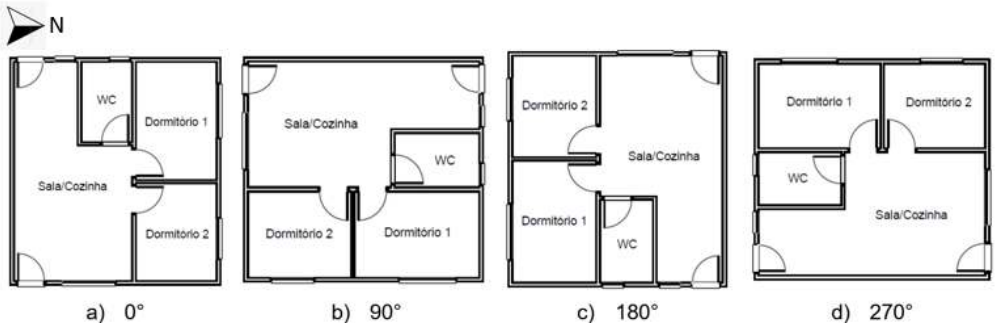
Com base na definição do arquétipo, as simulações realizadas por meio do software EnergyPlus consideraram 2048 diferentes combinações resultantes da variação de 10 parâmetros termofísicos e projetuais. Conforme a Tabela 1, tem-se os parâmetros variados no modelo, e conforme a Figura 2, pode-se observar a planta baixa da habitação escolhida para este estudo em diferentes orientações simuladas.

Tabela 1: Parâmetros variáveis, respectivos identificadores (ID) e níveis de variação

Parâmetros Variáveis	ID	Níveis	Valores
Transmitância térmica da parede	Upar	2	1,88/0,63
Absortância térmica da parede	αpar	2	0,2/0,8
Capacidade térmica da cobertura	Ctcob	2	45/17
Transmitância térmica da cobertura	Ucob	2	0,37/0,63
Absortância térmica da cobertura	αcob	2	0,2/0,8
Emissividade térmica da cobertura	εcob	2	0,1/0,9
Contato da cobertura com o exterior	cob	2	0/1
Contato do piso	piso	2	0/1
Existência de veneziana	venez.	2	0/1
Orientação solar	orient.	4	0/90/180/270

Fonte: [21]

Figura 2: Orientação solar da habitação



Fonte: [21]

A transmitância térmica da parede (Upar) com valor de 0,63 W/m².K representa uma composição de parede em sistema leve com a inclusão de isolante térmico (lã de vidro), enquanto o valor de 1,88 W/m².K representa uma composição sem a inclusão de lã de vidro, mantendo-se apenas com câmara de ar entre placas de vedação em OSB (oriented strand board). Os valores de absortância solar de paredes (αpar) e coberturas (αcob) variam em dois níveis extremos, representando uma cor clara (0,2) e uma cor escura (0,8). No caso da cobertura, a capacidade térmica (Ctcob) variou conforme o tipo de telha utilizado, sendo o valor de 45 kJ/m².K referente à composição com telhas cerâmicas e 17 kJ/m².K referente à composição com telhas de fibrocimento. A transmitância térmica da cobertura (Ucob) por sua vez, considera duas espessuras de lã de vidro, onde o valor de 0,37 W/m².K corresponde à composição com inserção de lã na espessura de 100 mm enquanto o valor de 0,63 W/m².K representa uma composição com lã de vidro de 50 mm. Ainda para a cobertura, foi considerada a emissividade das superfícies em dois níveis de variação, sendo eles 0,10 representando a inserção de uma barreira radiante (manta aluminizada) e 0,90 para os demais tipos de superfície. Quanto ao contato das superfícies com o exterior, o contato da cobertura variou em 0, quando não há contato com o exterior e 1, quando há contato direto com exterior. Para o contato do piso, considerou-se 0, quando sem contato com o solo e 1, quando há contato direto com o solo. Além disso, variou-se o sombreamento das janelas em dois níveis, considerando o uso de venezianas, sendo 0 caso não haja e 1 caso haja veneziana. Por fim, o único parâmetro variado em mais de dois níveis foi a orientação solar com relação aos dormitórios da habitação, avaliando a edificação a cada 90° no total de 4 casos: (0º) dormitórios voltados para o norte, (90º) dormitórios voltados para o leste, (180º) dormitórios voltados para o sul e (270º) dormitórios voltados para o oeste.

Nos estudos de Zara [21] para cada combinação dos parâmetros analisados, foi gerado um conjunto de dados baseado em dois indicadores de desempenho energético: o consumo anual de aquecimento (kWh/m².ano) e o consumo anual de refrigeração (kWh/m².ano).

TREINAMENTO DO CONJUNTO DE DADOS

O conjunto de dados foi submetido a um treinamento por meio de um algoritmo fornecido pela biblioteca Scikit-Learn [24] versão 0.23.1, na linguagem de programação Python 3.8.3. O algoritmo fundamenta-se em uma árvore de decisão resultante de uma otimização do modelo CART.

O algoritmo foi preparado para dividir o conjunto de dados aleatoriamente em duas partes: 70% para a realização do treinamento, e 30% para o teste do modelo. Assim, em um ciclo de repetição desse processo, foram geradas 100 iterações de treinamento e teste, técnica observada em Tsanas e Xifara [25]. Para evitar possíveis problemas de sobreajuste aos dados, que ocorre quando o modelo se adapta demais ao conjunto de dados de treinamento, e melhorar a capacidade de generalização do modelo quando submetido a um novo conjunto de dados, foi implementado o teste de hiperparâmetros. O hiperparâmetro aplica uma poda no que se considera estar em excesso na árvore por meio de um termo punitivo com valores efetivos de uma variável

α ao número de nós terminais da árvore, obtendo um equilíbrio entre o erro de treinamento e o tamanho da árvore. Para isso, foram considerados diferentes valores de hiperparâmetro α e, para cada valor, realizou-se a técnica de validação cruzada k-fold para garantir a precisão do modelo.

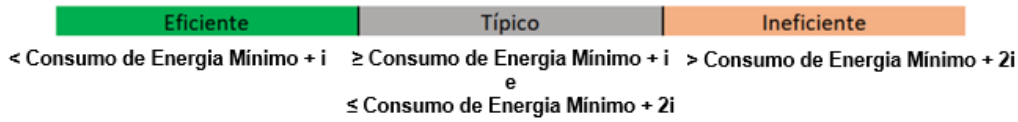
Na validação cruzada k-fold, o conjunto de dados de treinamento é fracionado em uma determinada quantidade k de subconjuntos de tamanhos aproximadamente iguais. O modelo é treinado em k-1 conjuntos e o conjunto restante é utilizado para validação. Esse processo é repetido, alternando os conjuntos de testes e treinamentos, até que todas as possibilidades tenham sido testadas. Para este trabalho foi utilizado k=10. Esses 10 folds resultaram no registro de 10 vetores com o desempenho de cada hiperparâmetro de poda considerado, um para cada fold. O valor ótimo do hiperparâmetro α é a média dos resultados obtidos para cada valor de α sobre os dez treinamentos da Validação Cruzada.

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE BENCHMARKING PARA CLASSIFICAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para a implementação do método de benchmarking, foram utilizados os critérios expostos em Silva [26], em que se calcula um valor "i" (Equação 1) para a definição de três faixas de consumo de energia elétrica para climatização, sendo elas ineficiente, típico e eficiente. Assim, um consumo energético eficiente apresenta um valor menor do que o consumo de energia mínimo + i; o consumo energético ineficiente apresenta um valor maior do que o consumo de energia mínimo + 2i; e um consumo energético típico apresenta um valor entre as duas faixas anteriores, conforme a Figura 3.

$$\boldsymbol{i} = \frac{consumo\ máximo\ da\ edificação - consumo\ mínimo\ da\ edificação}{3} \qquad (1)$$

Figura 3: Escala de consumo energético



Fonte: Os autores.

Com isso, tem-se que o valor máximo para a classificação do desempenho energético como eficiente é de 32,3 kWh/m².ano e que o valor mínimo para a classificação do desempenho energético como ineficiente é de 40,7 kWh/m².ano, fazendo com que a habitação seja classificada como típica quando sua carga térmica necessária para climatização se apresentar entre esses dois valores.

MÉTRICAS DE ERRO

Para analisar a qualidade dos dados treinados, adotou-se o Erro Percentual Médio Absoluto (MAPE), o Erro Quadrático Médio (MSE) e o Erro Absoluto Médio (MAE), descrito nas Equações 2 a 4, respectivamente.

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i}\right| * 100, \quad (2)$$

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i)^2, \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\hat{y}_i - y_i|, \quad (4)$$

em que, n é o número de amostras, y_i é o valor real do parâmetro em questão e $\hat{y}_i$ é o valor previsto para o mesmo parâmetro.

DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE ITERATIVA

A interface foi desenvolvida utilizando o software *QtDesigner* a qual permite registrar os valores de entrada inseridos pelo usuário e transforma esses valores em um vetor que passa pelo modelo de árvore de decisão treinado, gerando uma predição de consumo energético anual total para esse novo vetor, bem como sua classificação com relação a escala de consumo energético definida.

Visando uma aplicação prática da ferramenta de predição de consumo de energia e classificação de desempenho, o protótipo em wood frame (Figura 4), adotado como caso base em Zara [21], e localizado no campus da Universidade Estadual de Londrina, foi usado como objeto de análise seguindo a composição do sistema construtivo leve em wood frame, ilustrado na Figura 1, assim como o layout, ilustrado na Figura 2.

Figura 4: Habitação de estudo: (A) fachada principal; (B) fachada dos dormitórios



Fonte: [21].

RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados para predição do consumo anual de uma habitação de interesse social em sistema construtivo leve e exposta ao clima da cidade de São Paulo.

PREDIÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO

Analisando os dados das 100 iterações realizadas, nota-se que o número médio de folhas das árvores geradas para o consumo de energia para aquecimento foi de

1116,70 ± 26,727, com os valores de 0,25 ± 0,015 kWh/m².ano para MAE, 0,17 ± 0,025 (kWh/m².ano)² para MSE e 1,11 ± 0,063 % para MAPE. Da mesma forma, para o consumo de energia para refrigeração, o número médio de folhas foi de 1085,52 ± 38,567, com os valores de 0,16 ± 0,017 kWh/m².ano para MAE, 0,09 ± 0,040 (kWh/m².ano)² para MSE e 1,52 ± 0,145 % para MAPE. Tais resultados são considerados satisfatórios ao se comparar com estudos como em Tsanas e Xifara [25] em que os valores de MAE obtidos através do treinamento com um modelo de *random forest* para esse tipo de predição foi de 0,51 ± 0,11 kWh/m² e 1,42 ± 0,25 kWh/m², respectivamente.

PLATAFORMA LIGHT SYSTEMS

A Figura 5 ilustra a plataforma da interface gráfica de predição do desempenho termoenergético de habitações de interesse social em sistemas leves para o clima de São Paulo, contendo apresentação inicial, registro das informações de entrada, e a classificação de desempenho obtida com base na escala de benchmarking.

Figura 5: Interface gráfica



Fonte: Os autores.

Para a aplicação prática da interface gráfica criada, com o intuito de se classificar o desempenho energético da habitação, foram selecionados os parâmetros referentes ao protótipo em wood frame localizado na Universidade Estadual de Londrina, sede do Laboratório de Eficiência Energética e Sustentabilidade em Edificações. Sendo assim, o protótipo apresenta-se por uma habitação térrea com vedação vertical em

cores claras e ausência de lã de vidro; cobertura com telhas cerâmicas, lã de vidro de 100 mm, cor escura e ausência de manta aluminizada; ausência de venezianas e orientação dos dormitórios de 0º, ou seja, voltados para o norte. Com isso, por meio da interface, os parâmetros estabelecidos foram submetidos ao método de benchmarking, obtendo assim, uma classificação “ineficiente” segundo os critérios da escala de consumo para o resultado da predição de consumo de 44,3 kWh/m².ano (sendo 39,7 kWh/m².ano para aquecimento e 4,6 kWh/m².ano para refrigeração, conforme Figura 6).

Buscando melhorar a eficiência energética da edificação foram simulados na interface a implementação das seguintes estratégias: 1. Inserção de lã de vidro nas paredes; 2. Uso de cores claras na cobertura; 3. Uso de veneziana nos dormitórios; e 4. Todas as estratégias em conjunto. Os resultados são apresentados na Tabela 2, e comparados com os resultados da simulação computacional realizada em [21].

Figura 6: Aplicação da interface gráfica



Fonte: Os autores.

Tabela 2: Consumo de energia anual para aquecimento e refrigeração obtido na interface gráfica e simulação computacional

Caso de análise	Interface (kWh/m².ano)			Simulação Computacional (kWh/m².ano)		
	Aquecimento	Refrigeração	Total	Aquecimento	Refrigeração	Total
Caso Base	39,7	4,6	44,3 (Ineficiente)	39,4	4,6	44,0 (Ineficiente)
Com lã de vidro	21,8	8,4	30,2 (Eficiente)	21,8	8,4	30,2 (Eficiente)
Cobertura clara	41,4	3,7	45,1 (Ineficiente)	41,4	3,8	45,2 (Ineficiente)
Venezianas	39,7	4,1	43,8 (Ineficiente)	39,7	4,1	43,8 (Ineficiente)

Todas as estratégias	24,0	6,0	30,0 (Eficiente)	24,0	6,0	30,0 (Eficiente)

Fonte: Os autores.

Conforme os resultados expostos, observa-se que o fator primordial para uma predição de menor consumo energético total em uma edificação leve é a baixa transmitância térmica das paredes, alterando a classificação de desempenho da edificação de “ineficiente” para “eficiente”. Outras estratégias podem ser utilizadas com menor influência no consumo de energia, conforme já apontado em [21].

Por fim, ressalta-se que a interface não busca o resultado desejado no banco de dados, mas faz uma previsão utilizando o treinamento do algoritmo. Com isso, percebe-se um pequeno erro em alguns resultados quando comparados com a simulação computacional. No entanto, esse erro não é suficiente para alterar a classificação da edificação, mostrando a confiabilidade da interface.

CONCLUSÕES

Neste estudo foi desenvolvida uma plataforma de predição de consumo de energia e de desempenho de habitações de interesse social em sistemas leves, para o clima da cidade de São Paulo. Para tanto, fez-se o treinamento de 2048 dados de consumo de energia gerados por simulação computacional utilizando o método da árvore de decisão (CART). Definiu-se uma metodologia de aplicação de um hiperparâmetro de poda à implementação, bem como a aplicação da técnica de Validação Cruzada k-fold. Por fim, na interface iterativa desenvolvida, pode-se predizer o consumo de energia e classificar o desempenho termoenergético de habitações em sistemas leves, sendo este, eficiente, típico ou ineficiente, com base na técnica de benchmarking.

A maior contribuição deste estudo está na disponibilização da interface iterativa para um usuário universal, possibilitando que este identifique quais as combinações de medidas de eficiência energética que resultam em menores valores de consumo para habitações de interesse social em sistemas construtivos leves. Salienta-se que os resultados se limitam ao arquétipo analisado, ao clima de São Paulo, e às variações projetuais e de propriedades termofísicas pré-definidas, tendo como proposta para futuros estudos, a expansão das variações de projetos e de composições de materiais construtivos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

[1] NUNES, G. H. et al. Thermo-energetic performance of wooden dwellings: Benefits of cross-laminated timber in Brazilian climates. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101468, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101468

[2] RUKAVINA, J. M. et al. Development of lightweight steel framed construction systems for nearly-zero energy buildings. **Buildings**, v.12, n.7, p.929, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings12070929

[3] MIRANDA, F. M.; SANTOS, M. S. The building material selection importance at the building design process for its sustenability. In**: CIB World Building Congress 2007**. 2007. Disponível em: http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB4909.pdf. Acesso em: 31 outubro 2019.

[4] SONG, Y.; ZHANG, H. Research on sustainability of building materials. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. **IOP Publishing**. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/452/2/022169/pdf

[5] CEI-Bois, European Confederation of Woodworking Industries. Disponível em: https://www.cei-bois.org/cop26. Acesso em: 31 março 2022.

[6] SOARES, N. et al. Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel framed (LSF) construction: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 194-209, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066

[7] PAJEK, L. et al. Improving thermal response of lightweigth timber building envelopes during cooling season in three European locations. **Journal of Cleaner Production,** v. 156, p. 939-952, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.098

[8] ARKAR, C.; DOMJAN, S.; MEDVED, S. Lightweight composite timber façade wall with improved thermal response. **Sustainable Cities and Society**, v. 38, p. 325 332, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.011

[9] LAROCA, C.; KRUGER, E. L.; MATOS, J. M. Avaliação de desempenho térmico de protótipo de habitação social desenvolvido para o estado de Santa Catarina. In: XII Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 2008, Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza, 2008.

[10] CALDAS, L. R. et al. Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e do Desempenho Térmico de Uma Habitação de Light Steel Framing com o Uso de Diferentes Tipos de Isolantes Térmicos. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n.2, p. 1-14, 2016. DOI: https://doi.org/10.5216/reec.V11i2.37863

[11] TONELLI, C.; GRIMAUDO, M. Timber buildings and thermal inertia: Open scientific problems for summer behavior in Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 83, p. 89-95, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.063

[12] ROSSI, M.; ROCCO, V. M. External walls design: the role of periodic thermal transmittance and internal areal heat capacity. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 732-740, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.049

[13] YANG, L. et al. A kind of PCMs-based lightweight wallboards: Artificial controlled condition experiments and thermal design method investigation. **Building and Environment**, v. 144, p. 194-207, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.020

[14] SOLGI, E. et al. A parametric study of phase change material characteristics when coupled with thermal insulation for different Australian climatic zones. **Building and Environment**, v. 163, p. 106317, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106317

[15] LEITZKE, R. et al. The use of multi-objetive evolutionary algorithms to assess phase change materials in a residence with light framings in bioclimatic zones 1, 2 and 3. **Energy and Building**, v. 284, p. 112847, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112847

[16] SOUZA, H. A.; AMPARO, L. R.; GOMES, A. P. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em light steel Framing. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 113-128, 2011. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212011000400009

[17] ROCHA, A. C. et al. Avaliação do desempenho térmico de fachada com painéis leves em edificações de múltiplos pavimentos. In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2016, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo, 2016.

[18] PELAZ, B. et al. Analysis of the influence of wood cladding on the thermal behavior of building façades; characterization through simulation by using different tools and comparative testing validation. **Energy and Building**, v. 141, p. 349-360, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.054

[19] AWAD, H. et al. Evaluation of the thermal and structural performance of potential energy efficient wall systems for mid-rise wood-frame buildings. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 416-427, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.032

[20] ADEKUNLE, T. O.; NIKOLOPOULOU, M. Thermal comfort, summertime temperatures and overheating in prefabricated timber housing. **Building and Environment**, v. 103, p. 21-35, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.001

[21] ZARA, R. B. **Influência dos parâmetros termofísicos no desempenho térmico de edificações residenciais em sistemas construtivos leves**. 2019. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

[23] MORO, G. N.; MARTINS, R. S. V.; GIGLIO, T. G. F. Aplicação de um modelo de aprendizado de máquina em estudo de eficiência energética de edificações: foco para sistemas construtivos leves. **Semina**: Ciências Exatas e Tecnológicas, v.13, n.3, p. 75-84, 2022. DOI: https://doi.org/10.5433/1679-0375.2022v43n1p75

[24] PEDREGOSA, F. et al. Scikit-learn: Machine learning in Python. **The Journal of machine Learning research**, v. 12, p. 2825-2830, 2011.

[25] TSANAS, A.; XIFARA, A. Accurate quantitative estimation of energy performance of residential buildings using statistical machine learning tools. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 560-567, 2012.

[26] SILVA, M. K. P. D. et al. Desenvolvimento de benchmark energético em centros de saúde. 2022.