MATERIAIS COM MAIOR PEGADA DE CARBONO PODEM REDUZIR EMISSÕES DE CO_2: UM PARADOXO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM HABITAÇÕES POPULARES NO BRASIL

Materials with a higher carbon footprint can reduce CO_2 emissions: a paradox of energy efficiency in low-income housing in Brazil

Vítor Freitas Mendes
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, MG | vitor.mendes@aluno.ufop.edu.br

Carolina de Melo Nunes Lopes
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, MG | carolina.nunes@aluno.ufop.edu.br

Eduardo Fonseca Ribeiro
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora, MG | eduardo.fonseca@estudante.ufjf.br

Anna Vinciguerra
Politecnico di Milano | Milão, Província de Milão | anna.vinciguerra@polimi.it

Lorenzo Rinaldi
Politecnico di Milano | Milão, Província de Milão | lorenzo.rinaldi@polimi.it

Júlia Castro Mendes
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora, MG | juliacastro.mendes@ufjf.br

RESUMO

Habitações populares com baixo desempenho térmico aumentam o consumo de eletricidade para climatização, agravando a vulnerabilidade financeira e social das famílias. Este estudo avalia o impacto da melhoria da eficiência energética em habitações de interesse social no Brasil, reduzindo os valores U das envoltórias (fechamentos externos). Utilizando tabelas de recursos e usos (TRUs), foram analisadas as emissões de CO_2 a nível nacional associadas à substituição de paredes de alvenaria por steel frame, que oferece isolamento térmico quase seis vezes superior. O consumo de energia foi simulado no EnergyPlus para uma residência isolada de 42 m². Os resultados indicam que, embora o sistema de steel frame aumente as emissões de CO_2 em 1,33%, essa elevação é compensada pela redução das emissões de CO_2 do setor elétrico em até 5 anos. Em 30 anos, a economia acumulada pode ultrapassar 3,5 milhões de toneladas de CO_2.

Palavras-chave: Eficiência energética; Pobreza energética; Construção sustentável; Emissões de CO_2; Análise de insumo-produto.

ABSTRACT

Low thermal performance in affordable housing increases electricity consumption for indoor climate control, exacerbating the financial and social vulnerability of families. This study assesses the impact of improving energy efficiency in social housing in Brazil by reducing the U-values of building envelopes (external enclosures). Using Supply and Use Tables (SUTs), national-level CO_2 emissions associated with replacing masonry walls with a steel frame system - offering nearly six times better thermal insulation - were analyzed. Energy consumption was simulated in EnergyPlus for a single-family 42 m² residence. The results indicate that although the steel frame system increases CO_2 emissions by 1.33%, this rise is offset by reductions in emissions from the electricity sector within five years. Over 30 years, the cumulative reduction could exceed 3.5 million tons of CO_2.

Keywords: Energy efficiency; Energy poverty; Sustainable construction; CO_2 emissions; Input-output analysis.

1 INTRODUÇÃO

Pessoas que vivem em casas termicamente desconfortáveis enfrentam prejuízos de saúde e produtividade. Famílias de baixa renda são mais profundamente afetadas pelas mudanças climáticas e destinam uma parcela maior de sua renda às contas de energia para aquecimento e resfriamento (Zhao, Dong e Dong, 2024). Esse problema evidencia a necessidade de construções mais eficientes e resilientes, capazes de manter o conforto térmico dos(as) usuários(as) com menor consumo energético.

A eficiência energética de um edifício está diretamente ligada à sua envoltória — a barreira física formada por paredes, coberturas, janelas e portas, que separa os ambientes interno e externo (Sadineni, Madala e Boehm, 2011; Ferrara *et al.*, 2017). As propriedades térmicas da envoltória, como a transmitância térmica e a capacidade térmica, afetam a troca de calor com o meio externo (ABNT, 2024). Uma envoltória bem projetada minimiza perdas de calor no inverno e ganhos no verão, reduzindo a necessidade de climatização artificial e, consequentemente, o consumo energético. A melhoria da eficiência energética também reduz as emissões de CO_2 associadas ao uso de energia em edifícios. No entanto, há um paradoxo: a produção de materiais de construção mais isolantes, em muitos, casos pode gerar maiores emissões de CO_2 na fase de fabricação (Lin *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2013). Assim, torna-se essencial avaliar o impacto ambiental desses materiais ao longo de seu ciclo de vida.

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é amplamente utilizada para quantificar os impactos ambientais dos materiais de construção, considerando desde sua produção até o descarte final (Science Direct Topics, 2024). Entretanto, a ACV geralmente se restringe a processos individuais e não avalia os impactos sistêmicos de políticas e inovações na construção civil. Para ampliar essa abordagem, as tabelas de recursos e usos (TRUs) oferecem um modelo econômico capaz de mapear como mudanças no setor da construção afetam a economia e as emissões de CO_2 de um país (OECD, 2022). As TRUs são da Contabilidade Nacional e mostram a origem (produção, importações e impostos) e o destino (consumo, investimento e exportação) dos bens e serviços em uma economia. Elas ajudam a analisar cadeias produtivas, calcular o PIB e avaliar impactos ambientais e socioeconômicos de políticas públicas. Padronizadas por organismos internacionais, no Brasil são elaboradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) dentro do Sistema de Contas Nacionais (IBGE, 2022).

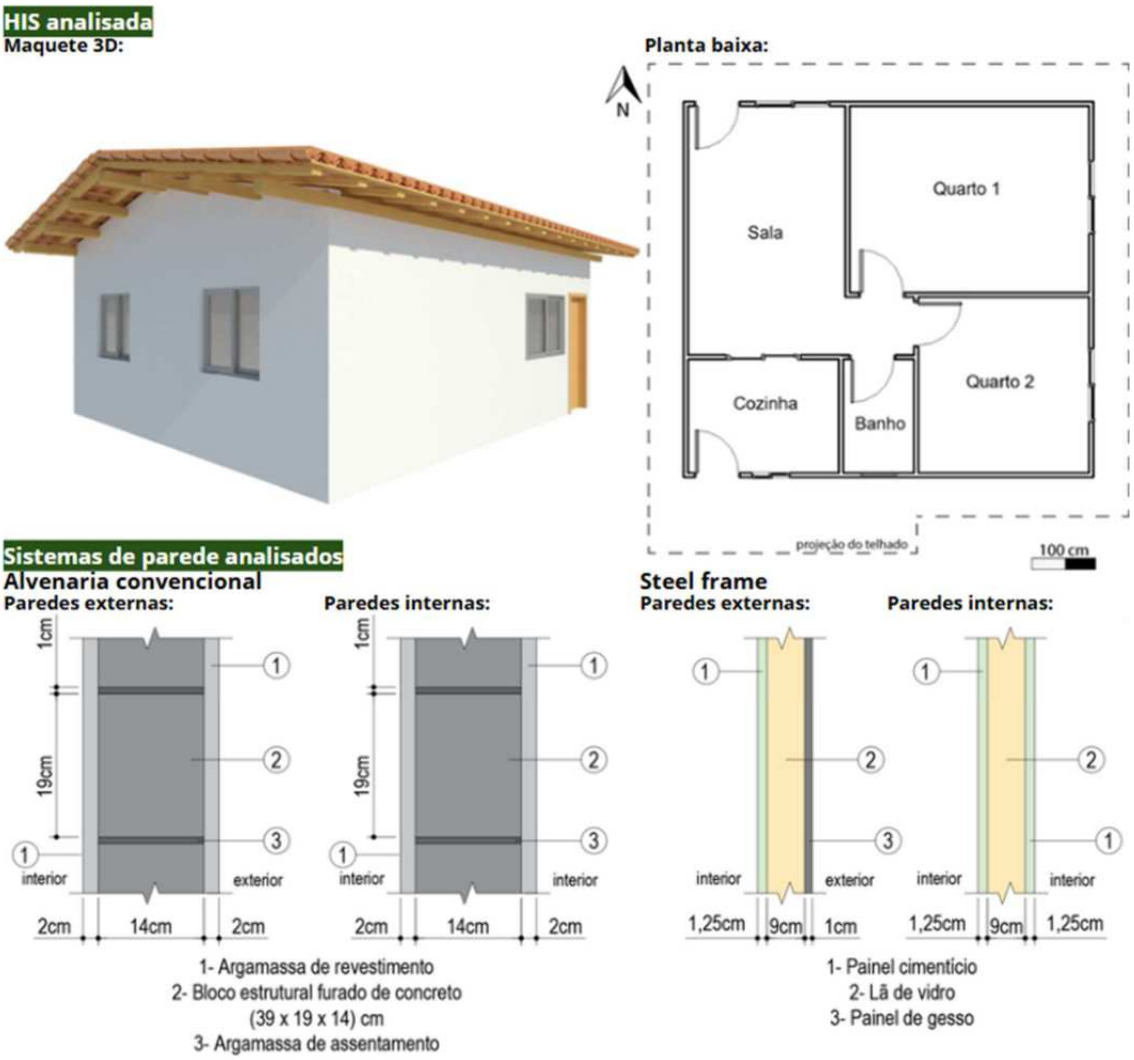
Nesse contexto, o presente estudo investiga os impactos ambientais e energéticos da substituição de paredes de alvenaria por sistemas de *steel frame* em habitações de interesse social (HIS) no Brasil. O estudo se baseia em três pilares principais: simulação energética, análise de impacto econômico e ambiental por meio das TRUs e avaliação quantitativa da redução do consumo de energia. Cada etapa foi estruturada para responder à questão central: "A construção de casas mais energeticamente eficientes no Brasil implica em um aumento nas emissões de CO_2?".

2 METODOLOGIA

Previamente, foram feitas simulações energéticas de uma HIS típica do programa Minha Casa Minha Vida (MCMV) com 40m² (Figura 1). O objetivo foi quantificar a economia de energia gerada pela substituição das paredes de alvenaria convencional (transmitância térmica de 5,2 W/m²·K) por um sistema de *steel frame* com isolamento térmico (transmitância térmica de 0,8 W/m²·K). As simulações foram feitas no EnergyPlus v22.1, conforme as diretrizes da NBR 15575 (ABNT, 2024) e os valores das propriedades térmicas dos demais materiais adotados da NBR 15220 (ABNT, 2005). O modelo considerou o acionamento do ar-condicionado sempre a que a temperatura interna ultrapassasse 25ºC, refletindo um cenário realista de comportamento dos(as) usuários(as) no Brasil. Assumiu-se que todas as HIS possuíam um ar-condicionado instalado, e não foi considerado o uso de aquecedor.

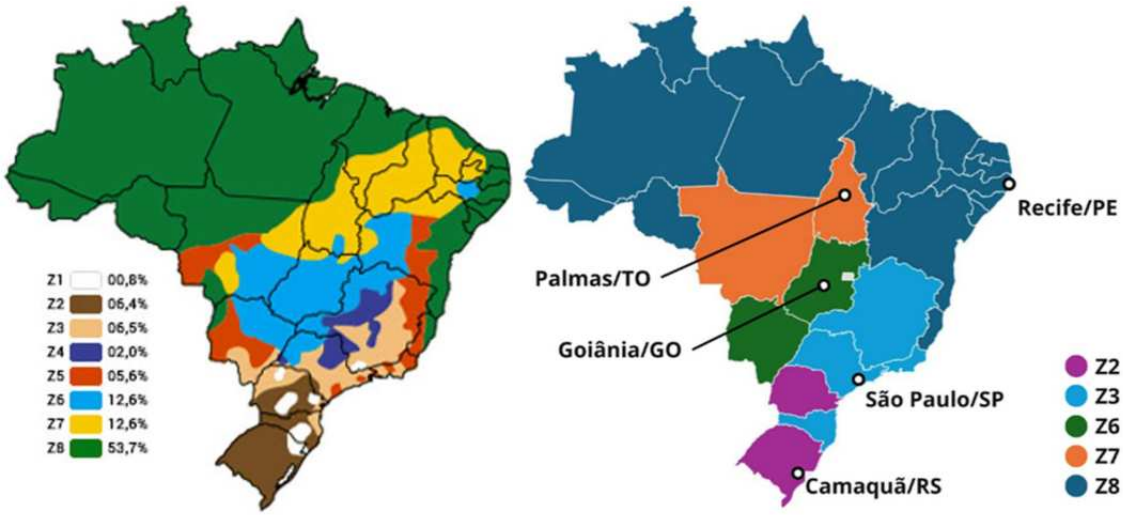
Devido à disponibilidade de dados consolidados das TRUs no momento do estudo, foi adotado neste estudo o ano de referência de 2011, quando se construiu 289,6 mil HIS (dados da Caixa Econômica Federal). A Caixa Econômica Federal não disponibilizou dados oficiais sobre a distribuição geográfica das HIS construídas por estado ou região. Assim, adotou-se a premissa de que o número de HIS em cada estado é proporcional à sua população. Além disso, devido à diversidade climática do Brasil, as simulações energéticas foram realizadas em cinco das oito Zonas bioclimáticas (Zs) (Figura 2), selecionando para cada estado a Z predominante na área mais densamente povoada. Realizando essas ponderações, encontrou-se uma economia média de 5,4% no consumo de eletricidade para a climatização das residências construídas com *steel frame*.

Figura 1: HIS e sistemas de parede



Fonte: os autores.

Figura 2: Simplificação das zonas bioclimáticas (Zs) com as cidades selecionadas para análise



Fonte: elaborado pelos autores no Canva.

Este estudo utilizou TRUs para fornecer uma perspectiva holística dos impactos ambientais e econômicos da substituição de materiais no setor de HIS. Esse método permite uma visão macroeconômica das mudanças na construção civil, possibilitando comparar não apenas as emissões diretas por m², mas também os efeitos indiretos em toda a economia brasileira, considerando as interconexões entre os setores produtivos. A análise

foi realizada no programa *Multifunctional Analysis of Regions through Input-Output* (MARIO) (Tahavori *et al.*, 2023).

Foram considerados três cenários para a análise, no ano de referência:

1. **Cenário de referência**: representa a construção convencional, em que 100% das HIS utilizam alvenaria estrutural.
2. **Cenário de novos materiais: a**valia o impacto da introdução do *steel frame* em 3,55% do setor da construção civil, percentual correspondente à participação das HIS no mercado da construção. Essa análise considera as mudanças no consumo de materiais, como cimento, aço, vidro, papel e combustíveis fósseis, permitindo identificar os efeitos indiretos da substituição na cadeia produtiva e quantificar o impacto econômico e as emissões de CO_2 associadas à produção e ao transporte dos novos insumos.
3. **Cenário de redução de consumo de energia:** examina os efeitos da economia energética proporcionada pelo novo sistema construtivo. Foi considerada uma redução de 5,4% no consumo energético das edificações, das quais, em média, 17% da eletricidade é utilizada para climatização, resultando em uma diminuição total de 0,92% no consumo residencial de energia no Brasil (5,4% · 17% = 0,92%). Para avaliar se essa economia compensa o aumento das emissões associadas ao uso de *steel frame*, utilizou-se a base de dados EXIOBASE HYBRID v3 – 2011, que permite mapear a pegada de carbono das commodities empregadas.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A Tabela 1 apresenta os resultados compilados das análises. Nota-se que a substituição da construção tradicional de alvenaria estrutural pelo *steel frame* resultou em um aumento de 594 mil toneladas de CO_2 no cenário 2 (novos materiais) em comparação ao cenário 1 (referência). Esse aumento foi impulsionado pelo maior consumo de aço do novo sistema, que demanda uma extensa cadeia produtiva de *commodities*. Apesar da redução significativa no uso de cimento, um dos principais emissores de CO_2 da indústria da construção, essa economia não foi suficiente para compensar as emissões adicionais oriundas da produção de aço, gesso e outros materiais da nova envoltória.

Por outro lado, o cenário 3 (redução de energia) mostrou uma diminuição de 119 mil toneladas de CO_2 em relação ao cenário de referência, devido à redução projetada no consumo de eletricidade. Como essa redução foi distribuída uniformemente entre todas as fontes de energia, o impacto foi atenuado. No entanto, em um cenário mais realista para o Brasil, onde a desativação de usinas a carvão e gás ocorreria primeiro, a queda nas emissões poderia ser ainda maior. Ao ritmo atual, a economia energética proporcionada pela nova envoltória compensaria as emissões extras da produção de novos materiais em aproximadamente 5 anos.

Tabela 1: Emissões de CO_2 por Setor e Cenário

Cenário	Emissões de CO_2 por unidade de produção da commodity "obras de construção"[1]	Emissões totais de CO_2 da commodity "obras de construção"[2]	Emissões totais de CO_2 das commodities relacionadas à eletricidade[3]
1) Referência	241,00 toneladas CO_2/M€	44.449.772,8 toneladas CO_2	12.913.011,6 toneladas CO_2
2) Novos Materiais	244,2 toneladas CO_2/M€ (+1,33%)	45.043.326,5 toneladas CO_2 (+1,33%)	-
3) Redução de energia	-	-	12.794.280,7 toneladas CO_2 (-0,93%)

[1]Este valor representa as emissões de CO_2 de toda a cadeia econômica brasileira relacionadas à produção de 1 milhão de euros em obras de construção civil em 2011 – incluindo todas as commodities diretas necessárias para a atividade, bem como as commodities indiretas exigidas para a produção dessas diretas e assim por diante (considerando toda a economia global).

[2]Este valor representa as emissões totais de CO_2 de toda a cadeia econômica brasileira relacionadas à produção de obras de construção civil em 2011. Nos cenários 1 e 3, o valor total da construção foi de M€ 204.480, enquanto no cenário 2 o valor foi ligeiramente maior, M€ 206.929, devido ao aumento nos custos da nova solução construtiva (considerando toda a economia global).

[3]Este valor representa as emissões totais de CO_2 de toda a cadeia econômica brasileira associadas às *commodities* relacionadas à geração de eletricidade em 2011. São consideradas as emissões de eletricidade gerada por biomassa e resíduos, carvão, gás, energia geotérmica, hidrelétrica, nuclear, petróleo e derivados, solar fotovoltaica, solar térmica, marés/ondas/oceano e eólica.

Fonte: os autores.

Ao longo de 30 anos, assumindo estabilidade econômica, ambiental e técnica, essa redução no consumo de eletricidade poderia evitar a emissão de 3,6 milhões de toneladas de CO_2. Isso resultaria não apenas em benefícios ambientais, mas também em um impacto econômico e social positivo, reduzindo os custos de energia para famílias de baixa renda e melhorando seu bem-estar.

4 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que a substituição da alvenaria convencional por vedação em *steel frame*, apesar de aumentar as emissões de CO_2 em 594 mil toneladas devido à maior demanda por aço e gesso, pode ter um impacto ambiental positivo no longo prazo. A economia de eletricidade proporcionada pelo novo sistema construtivo compensaria esse aumento em cerca de cinco anos. Em 30 anos, a redução acumulada nas emissões poderia atingir 3,6 milhões de toneladas de CO_2, evidenciando que a eficiência energética supera os impactos iniciais da mudança nos materiais.

Além da mitigação de emissões, sistemas construtivos mais eficientes trazem benefícios econômicos e sociais. A menor demanda por eletricidade reduz custos para famílias de baixa renda, promovendo acessibilidade energética. Políticas públicas que incentivem essa modernização podem acelerar a transição para soluções sustentáveis. Embora novos materiais inicialmente elevem as emissões, a economia energética compensa esse impacto e impulsiona a descarbonização do setor habitacional. Assim, integrar eficiência energética e inovação na construção civil é essencial para reduzir a pegada de carbono e mitigar mudanças climáticas.

Apesar dos avanços, algumas limitações metodológicas devem ser reconhecidas. O estudo considerou apenas as 289,6 mil unidades habitacionais construídas em 2011, adotando uma HIS de 40 m², sem incluir apartamentos ou unidades maiores. Além disso, a análise focou exclusivamente nas paredes, desconsiderando o impacto de outros elementos da envoltória. A aplicação de um sistema único para todas as ZBs também restringiu a avaliação de soluções mais adaptadas às condições climáticas regionais. Essas limitações possivelmente subestimaram o impacto total da substituição dos sistemas.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências de fomento CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Código Financeiro 001 – bolsas de doutorado para Vítor Mendes e Carolina Lopes); CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – projeto 305818/2023-6 para Júlia Mendes e bolsa 400077/2023-0 para Eduardo Ribeiro) e a Climate Compatible Growth, organizadora do EMP-LAC.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220** - Desempenho térmico de edificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575** - Edifícios Residenciais - Desempenho Térmico. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2024.

FERRARA, M. *et al.* Influence of envelope design in the optimization of the energy performance of a multi-family building. **Energy Procedia**, 2017. 308-317.

IBGE. SCN - Sistema de Contas Nacionais. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2022. Disponivel em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html?=&t=sobre>. Acesso em: 1 fev. 2025.

LIN, Y. H. et al. Multi-objective optimization design of green building envelopes and air conditioning systems for energy conservation and CO2 emission reduction. **Sustainable Cities and Society**, 2021. 102555.

OECD. Statistical Insights: What role for supply-use tables?, 2022. Disponivel em: <https://web-archive.oecd.org/2022-01-26/622601-statistical-insights-what-role-for-supply-use-tables.htm>. Acesso em: 29 jan. 2024.

SADINENI, S. B.; MADALA, S.; BOEHM, R. F. Passive building energy savings: A review of building envelope components. **Renewable and sustainable energy reviews**, 8, 2011. 3617-3631.

SCIENCE DIRECT TOPICS. Life Cycle Assessment - Engineering, 2024. Disponivel em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/life-cycle-assessment>. Acesso em: 29 jan. 2024.

TAHAVORI, M. A. *et al.* MARIO: A Versatile and User-Friendly Software for Building Input-Output Models. **Journal of Open Research Software**, 11, 2023. 1-13.

ZHAO, J.; DONG, K.; DONG, X. How does energy poverty eradication affect global carbon neutrality? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 191, p. 114104, 2024.

ZHU, J. *et al.* Optimization method for building envelope design to minimize carbon emissions of building operational energy consumption using orthogonal experimental design (OED). **Habitat International**, 2013. 148-154.