

AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE WOOD FRAME PARA HABITAÇÃO SOCIAL VIA OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO

CRUZ, Alexandre (alexandre.cruz@fau.ufrj.br); CARDÃO, Ana Beatriz (ana.cardao@fau.ufrj.br); FREITAS, Caio (caio.freitas@fau.ufrj.br); URRUCHUA, Mateus (mateus.urruchua@fau.ufrj.br); CALDAS, Lucas (lucas.caldas@fau.ufrj.br)

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasi

Palavras-chave: habitação de interesse social, simulação computacional de edificações, otimização multiobjetivo

Resumo

Este trabalho buscou avaliar o potencial da utilização do sistema de wood frame em habitações de interesse social (HIS) localizadas em Curitiba, Brasília e Rio de Janeiro, em termos de desempenho térmico, energético e emissão de carbono. O estudo foi composto de três principais etapas: 1) Análise paramétrica para identificar o desempenho dos principais sistemas construtivos utilizados em HIS e compará-los com o sistema de wood frame; 2) Otimização multiobjetivo de uma HIS com o sistema de wood frame; 3) Comparação dos resultados para avaliar as soluções construtivas consideradas. As simulações computacionais foram realizadas utilizando o EnergyPlus acoplado com as ferramentas de parametrização e otimização jEPlus e jEPlus+EA, enquanto a emissão de carbono foi estimada com base no banco de dados Sidac e Ecoinvent v3.8. As otimizações multiobjetivo foram baseadas no Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) com objetivo de minimizar as horas de desconforto e a demanda de energia do sistema de ar-condicionado, simultaneamente. Durante a otimização, as variáveis de projeto consideradas foram a orientação, espessura e tipo de isolamento térmico, tipo de telhado, forro e vidro. Com base nos resultados, o sistema de wood frame destacou-se como escolha mais promissora para o estudo de caso tanto do ponto de vista térmico e energético quanto do ponto de vista de emissão de carbono.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o governo federal criou o programa “Minha Casa, Minha Vida”, e posteriormente, o “Casa Verde e Amarelo” com objetivo de facilitar o acesso a moradia através de uma linha de crédito para financiamento de habitações de interesse social (HIS). Ambos os programas foram concebidos para promover o crescimento da economia, e ao mesmo tempo, atender a demanda de moradia das famílias de baixa renda (Fundação João Pinheiro, 2021). No entanto, a estratégia de construir modelos habitacionais padronizados para reduzir custo e acelerar o processo construtivo, acabou prejudicando a qualidade das habitações entregues, em que, não há preocupação com o desempenho térmico ou energético das edificações (Hehl; Angelil, 2014).

Para compreender o desempenho térmico e energético de um edifício, normalmente opta-se por ferramentas de simulação, como por exemplo, EnergyPlus ou DesignBuilder. Dentro deste contexto, a seleção de materiais geralmente é uma tarefa muito desafiadora, uma vez que, a emissão de carbono é um parâmetro importante a ser abordado, além de propriedades térmicas. Calcular a emissão de carbono de uma construção envolve estimar a quantidade total de emissões dos principais gases de efeito estufa associadas à produção, transporte e instalação dos materiais

1

utilizados (Sharif; Hammad, 2019). Os valores de carbono incorporado podem ser obtidos a partir de estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV) ou declarações ambientais de produtos (DAPs). Como exemplo de banco de dados, podemos apontar o Sidac (Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção), uma iniciativa pública a nível nacional sob coordenação do Ministério de Minas e Energia (Sidac, 2023), e o Ecoinvent v3.8, uma associação sem fins lucrativos com sede em Zurique, na Suíça, dedicada à disponibilização de dados de alta qualidade para avaliações de sustentabilidade (Ecoinvent, 2023).

Dentre as novas soluções construtivas, os biomateriais têm se destacado como alternativas promissoras tendo em vista que são recursos renováveis, possuem a habilidade de absorver e estocar carbono, e normalmente possuem melhor desempenho térmico que materiais convencionais (concreto, cerâmica e aço), contribuindo para a redução do consumo de energia operacional (Mendon; Hart; Vangeem, 2017). Dentre diversas opções, uma das mais empregadas é a madeira, como sistema construtivo leve e racionalizado, na forma de *wood frame*. Trata-se de um sistema industrializado, estruturado em perfis de madeira plantada tratada, leve, durável, que apresenta rápida execução e redução de desperdícios, além de elevado controle de qualidade. Este sistema é amplamente utilizado em países da América do Norte, Ásia e Europa e vem conquistando espaço na América Latina (Clemente, 2019). Portanto, o *wood frame* pode ser uma escolha mais sustentável para edificações e oferecer inúmeros benefícios relacionados à construção e ao desempenho térmico-energético-carbono.

2 OBJETIVO

Este trabalho buscou avaliar o potencial da utilização do sistema de *wood frame*, com base no desempenho térmico, energético e emissão de carbono, em um modelo de HIS localizado em cidades de diferentes zonas bioclimáticas (Curitiba, Brasília e Rio de Janeiro). Além disso, o estudo tem o objetivo de apresentar uma metodologia robusta de avaliação de edifícios que vai além de simples simulações, visando promover soluções mais sustentáveis no setor de construção. Adicionalmente, busca difundir o potencial de sistemas construtivos industrializados e não convencionais que empregam biomateriais, como o *wood frame*.

3 MÉTODO

O método aplicado para realização deste trabalho foi composto por três principais etapas. Na primeira etapa, uma análise paramétrica foi realizada para identificar o desempenho térmico, energético e emissão de carbono dos principais sistemas construtivos utilizados em HIS e compará-los com o sistema de *wood frame*. Nesta etapa, as variáveis de projeto foram o tipo de telhado e parede. Na segunda etapa, uma otimização multiobjetivo de uma HIS com paredes de *wood frame* foi realizada. As variáveis de projeto consideradas foram a orientação do edifício, a espessura e tipo de isolamento térmico, tipo de telhado, forro e vidro. Por fim, a última e terceira etapa foi focada em comparar os resultados para avaliar as soluções construtivas consideradas e identificar as composições com melhor desempenho. As simulações computacionais foram realizadas utilizando o EnergyPlus acoplado com as ferramentas de parametrização e otimização jEPlus e jEPlus+EA, e a emissão de carbono para cada solução foi estimada com base no banco de dados Sidac e Ecoinvent v3.8. As otimizações multiobjetivo foram baseadas no *Non-dominated Sorting Genetic*

Algorithm II (NSGA-II) com objetivo de minimizar as horas de desconforto e a demanda de energia do sistema de ar condicionado, enquanto a emissão de carbono das soluções ótimas (Pareto) foi utilizada como métrica para selecionar a melhor solução otimizada.

3.1 Estudo de caso

Um modelo de HIS com área total de 43m² foi utilizada como estudo de caso. Este modelo residencial é baseado no programa nacional de HIS chamado “Casa Verde e Amarela”. O modelo residencial é composto por uma sala com cozinha, dois quartos e um banheiro. A Figura 1 ilustrou o modelo residencial utilizado como estudo de caso.

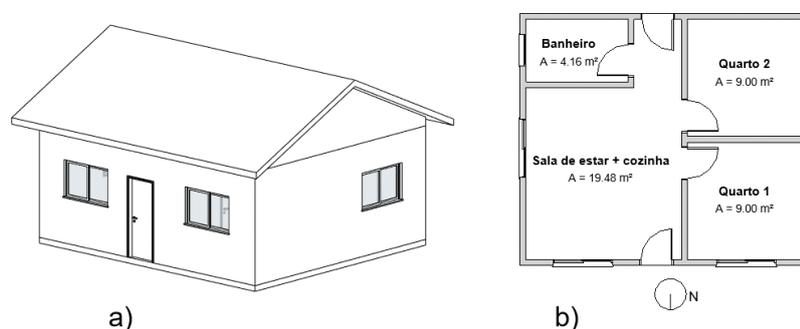


Figura 1. Estudo de caso – Vista 3D e planta baixa.

O modelo de energia criado no EnergyPlus foi composto por um total de quatro zonas térmicas e seguiu os valores padrão de simulação (ocupação e iluminação) estipulados pelo RTQ-R como estratégia de configuração (INMETRO, 2012). Adotou-se um total de duas pessoas por quarto e quatro pessoas na sala. A taxa metabólica para a sala e quartos foram iguais a 5 W/m² e 6 W/m², e a densidade de potência de iluminação para sala e quarto foram iguais a 108 W/pessoa e 81 W/pessoa, respectivamente. Além disso, foi considerada uma carga de equipamento de 1,5 W/m² para a sala durante 24h.

O estudo de caso foi configurado para dois modos de operação: 1) naturalmente ventilado e 2) com sistema ar-condicionado na sala e quartos. Para o primeiro modo de operação, a ventilação natural estabelecida para acontecer durante o horário de ocupação dos ambientes e foi configurada usando o objeto *Airflow network* no EnergyPlus. A ventilação natural foi configurada para acontecer em duas situações: 1) quando a temperatura do ar interno é igual ou superior ao *setpoint* do termostato e 2) quando a temperatura do ar interno é superior à temperatura externa. O modelo de conforto térmico considerado para este estudo foi baseado no modelo de conforto adaptativo da ASHRAE com limites de aceitabilidade de 90% (ASHRAE, 2010). Para o segundo modo de operação, o sistema ar-condicionado foi modelado usando o objeto *Packaged Terminal Heat Pump* (PTHP) no EnergyPlus. O sistema de ar condicionado foi configurado com *setpoint* de 20°C para aquecimento e 25°C para resfriamento e um coeficiente de desempenho (COP) igual a 3,00.

3.2 Variáveis de projeto

As variáveis de projeto foram referentes a composição do envelope. As composições consideradas representam os sistemas construtivos mais comum adotados no país e o sistema de *wood frame* ainda pouco utilizado. A parede de *wood frame* é feita em várias camadas, sua estrutura

é composta por um painel de madeira estruturado em Pinus preenchido por lã de rocha (50mm), chapas de OSB (*Oriented Strand Board*) com 18mm em ambos os lados, placa de gesso de 13mm em ambos os lados, caso seja parede interna, e no caso de paredes externa, a placa de gesso da face externa é substituída por placa cimentícia de 10mm (Clemente, 2019). Tabela 1 ilustrou os sistemas construtivos considerados neste estudo e suas respectivas propriedades, sendo elas, condutividade (λ), calor específico (c) e fator de emissão de carbono (ECf). É importante ressaltar que para os biomateriais, foi considerado o potencial máximo de estoque de carbono (o que justifica os valores de ECf negativos), partindo do princípio de que eles foram provenientes de florestas plantadas certificadas, terão a durabilidade adequada e no fim de vida não serão queimados.

Tabela 1. Sistemas construtivos considerados (Ecoinvent, 2023; Sidac, 2023).

Categoria	ID	Descrição	λ (W/mK)	c (J/kgK)	ECf
Parede	P ₁	Tijolo cerâmico	0,9	1600	0,15 kgCO _{2eq} /kg
	P ₂	Bloco de concreto	1,75	2400	0,12 kgCO _{2eq} /kg
	P ₃	Wood frame	0,621	-	Placa cimentícia: 0,8 kgCO _{2eq} /kg OSB: -662,22 kgCO _{2eq} /m ³ Lã de rocha: 1,32 kgCO _{2eq} /kg Placa de gesso: 0,34 kgCO _{2eq} /kg
Telhado	T ₁	Telha fibrocimento	0,65	1600	0,89 kgCO _{2eq} /kg
	T ₂	Telha cerâmica	1,05	2000	0,15kgCO _{2eq} /kg
Forro	F ₁	Gesso	0,35	850	0,34 kgCO _{2eq} /kg
	F ₂	Madeira	0,12	1340	-66,62 kgCO _{2eq} /m ³
Isolamento térmico	I ₁	Lã de rocha	0,044	750	1,32 kgCO _{2eq} /kg
	I ₂	Lã de Madeira	0,065	1810	-1,28 kgCO _{2eq} /kg
Vidro	V ₁	Simplex	5,871	0,872	40 kgCO _{2eq} /m ²
	V ₂	Duplo low-e	2,11	0,62	90 kgCO _{2eq} /m ²
	V ₃	Tripla low-e	1,31	0,552	130 kgCO _{2eq} /m ²

3.3 Localização

O Brasil é um país de ampla diversidade climática devido dimensão continental de seu território. Baseado na NBR 15220, o país é dividido em oito zonas bioclimáticas (ZB). Em busca de realizar uma análise com uma diversidade climática considerável, três cidades brasileiras foram selecionadas. As cidades de Curitiba, Brasília e Rio de Janeiro, localizadas nas ZB 1, 4, 8, na qual representam cerca de 0,8%, 2,0% e 53,7% do território brasileiro, respectivamente, foram consideradas neste estudo (ABNT, 2005). Figura 3 ilustrou os dados climáticos médios anuais (temperatura de bulbo seco (°C), Umidade relativa (%) e Radiação horizontal global (Wh/m²)) para as cidades avaliadas.

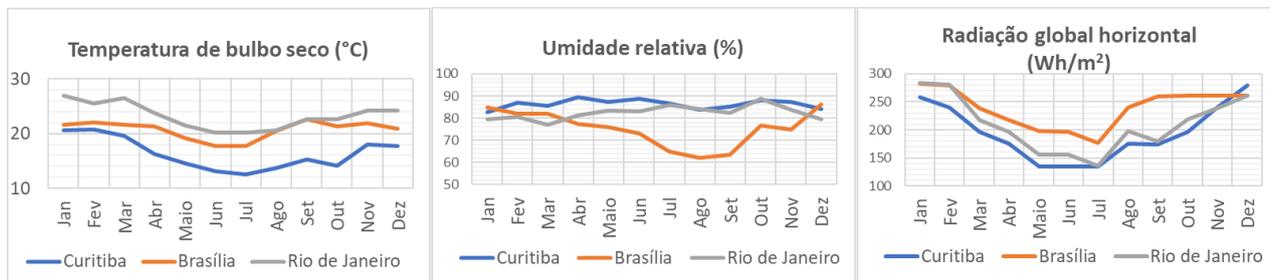


Figura 3. Dados climáticos das cidades de Curitiba, Brasília e Rio de Janeiro.

3.4 Indicadores de desempenho

Foram utilizados três indicadores de desempenho: térmico, energético e carbono equivalente. A performance térmica e energética diz respeito a capacidade do ambiente construído em proporcionar conforto térmico para o usuário e a demanda de energia do sistema de ar-condicionado quando utilizado. Esses dois indicadores de performance foram estimados através do software EnergyPlus. O indicador carbono equivalente diz respeito a quantidade de emissão de carbono proveniente do material utilizado no envelope. Este foi calculado a partir do banco de dados Sidac e Ecoinvent v3.8 (Ecoinvent, 2023; Sidac, 2023). Os três indicadores de performance foram calculados a partir das Equações 1-3:

$$HD = \frac{HD_{sl} + HD_{qt1} + HD_{qt2}}{3} \quad (1)$$

$$DE = DE_{sl} + DE_{qt1} + DE_{qt2} \quad (2)$$

$$CE = \frac{M * EC_f}{A_{total}} \quad (3)$$

Onde: HD foi o número de horas de desconforto ao longo de um ano e HD_{sl}, HD_{qt1} e HD_{qt2} representaram as horas de desconforto na sala de estar, quarto 1 e quarto 2, respectivamente. DE é a demanda total de energia do sistema de ar-condicionado em um ano e DE_{sl}, DE_{qt1} e DE_{qt2} representam a demanda de energia para a sala de estar, quarto 1, quarto 2, respectivamente. CE é a emissão de carbono equivalente dos materiais utilizados no envelope, A_{total} é a área total construída do modelo, M é a área do material em m² (ou volume em m³ ou peso em kg) e EC_f é o fator de emissão de carbono equivalente em kgCO_{2eq}/m² (ou em kgCO_{2eq}/m³ ou kgCO_{2eq}/kg) para cada material de envelope, respectivamente. Finalmente, a variação dos resultados foi baseada em uma combinação aleatória das variáveis de design apresentadas na Tabela 1.

3.5 Abordagem de simulação

Duas abordagens de simulação foram consideradas neste estudo: Na primeira uma análise paramétrica realizada para identificar o desempenho dos principais sistemas construtivos utilizados em HIS e compará-los com o sistema de *wood frame*. A análise paramétrica varia um parâmetro de cada vez, enquanto os outros são mantidos constantes (Solgi *et al.*, 2019). As variáveis de projeto consideradas na análise paramétrica foram o tipo de parede (P₁₋₃) e o tipo de telhado (T_{1F1} ou T_{2F2}). Na segunda etapa, uma otimização multiobjetivo do envelope do estudo de caso com base no NSGA-II foi realizada para minimizar as horas de desconforto e a demanda de energia do sistema de ar-condicionado. Uma otimização multiobjetivo baseada em um algoritmo genético normalmente é focada em identificar a melhor utilização de um determinado recurso ou grupo de recursos para

um determinado problema (Machairas; Tsangrassoulis; Axarli, 2014). Neste estudo, o algoritmo NSGA-II foi usado devido à sua popularidade em estudos de otimização do desempenho de edificações. O algoritmo foi configurado com tamanho da população, taxas de cruzamento, mutação, tamanho do torneio e gerações iguais a 50; 1; 0,2; 2 e 100, respectivamente. O modelo com sistema de *wood frame* nas paredes foi otimizado a partir da orientação solar, espessura e tipo de isolamento térmico, tipo de telhado, forro e vidro. Além disso, a emissão de carbono das soluções ótimas (Pareto) foi utilizada como métrica para selecionar a melhor solução otimizada. Tabela 2 apresentou o ID e as amostragem para as variáveis de projeto consideradas na otimização.

Tabela 2. Variáveis de projeto para otimização multiobjetivo.

ID	Descrição - Amostragem	ID	Descrição - Amostragem
m0	Orientação – [0:45:360]	m4	Tipo de I: Parede – I ₁₋₂
m1	Tipo de vidro – V ₁₋₃	m5	Tipo de I: Telhado – I ₁₋₂
m2	Espessura I: Parede – [0.05:0.1:0.45]	m6	Tipo de telhado – T ₁₋₂
m3	Espessura I:Telhado – [0.05:0.1:0.45]	m7	Tipo de forro – F ₁₋₃

4 RESULTADOS

4.1 Análise paramétrica

A análise paramétrica foi realizada para identificar o desempenho térmico, energético e emissão de carbono dos principais sistemas construtivos utilizados em HIS e compará-los com o sistema de *wood frame*. Figura 4 apresentou os resultados do desempenho para cada uma das combinações possíveis. Note que o desempenho térmico e energético varia para cada cidade considerada, enquanto o desempenho de emissão de carbono é o mesmo para todas as localizações avaliadas.

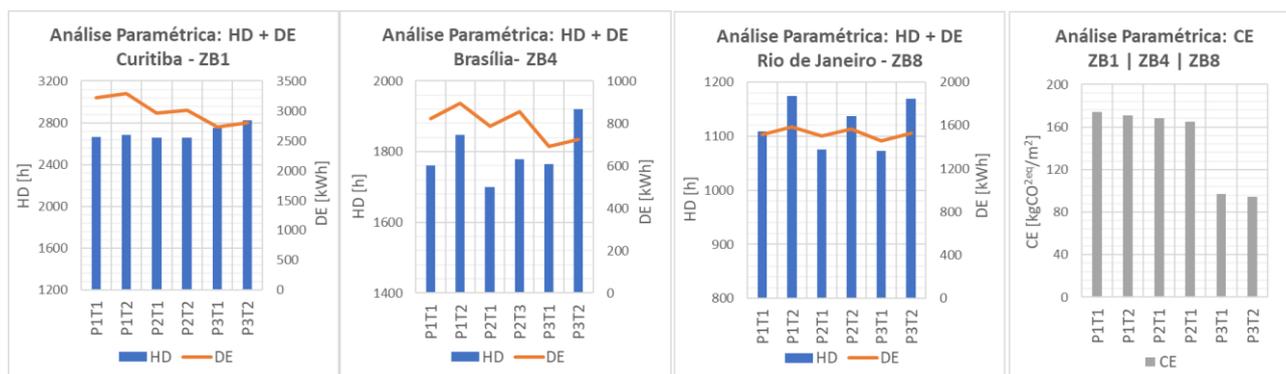


Figura 4. Resultado da análise paramétrica.

Em relação a desempenho térmico e energético, a cidade de Curitiba registrou a pior performance, enquanto o Rio de Janeiro registrou a melhor performance entre as cidades avaliadas. Na cidade de Curitiba, a variação de horas de desconforto e demanda de energia entre a melhor

solução e pior atingiu cerca de 6% e 20%, respectivamente. Sendo P2T1 a melhor solução para desempenho térmico e P3T1 a melhor solução para desempenho energético. Na cidade de Brasília, a variação de horas de desconforto e demanda de energia entre a melhor solução e pior atingiu cerca de 13% e 30%, respectivamente. Sendo P2T1 a melhor solução para desempenho térmico e P3T1 a melhor solução para desempenho energético. Na cidade de Rio de Janeiro, a variação de horas de desconforto e demanda de energia entre a melhor solução e pior atingiu cerca de 10% e 9%, respectivamente. Sendo P3T1 a melhor solução tanto para desempenho térmico quanto para o desempenho energético. Finalmente, foi possível concluir que o sistema de wood frame registrou o melhor desempenho energético em todas as cidades avaliadas, enquanto o bloco cerâmico e de concreto teve um melhor desempenho térmico para as cidades de Brasília e Curitiba. Em relação ao desempenho de emissão de carbono, há uma variação de performance entre as soluções propostas. A composição P1T1 registrou o pior desempenho, enquanto a composição P3T2 teve o melhor resultado para carbono equivalente. Houve uma redução de 46% das emissões de carbono entre a melhor e pior composição. Esses resultados foram encontrados devido a utilização de biomateriais na composição de paredes e telhados, uma vez que, o sistema de *wood frame* combinado com forro de madeira possui um grande potencial de absorver e estocar carbono.

4.2 Otimização multiobjetivo

Em seguida, três otimizações multiobjetivos de uma HIS com paredes de *wood frame* foram realizadas, isto é, uma otimização para cada cidade considerada (Curitiba, Brasília e Rio de Janeiro). Figura 5 apresentou os resultados da otimização multiobjetivo para cada cidade, enquanto a Tabela 3 indicou a configuração das soluções ótimas que foram selecionadas a partir do desempenho de emissão de carbono das frentes de Pareto.

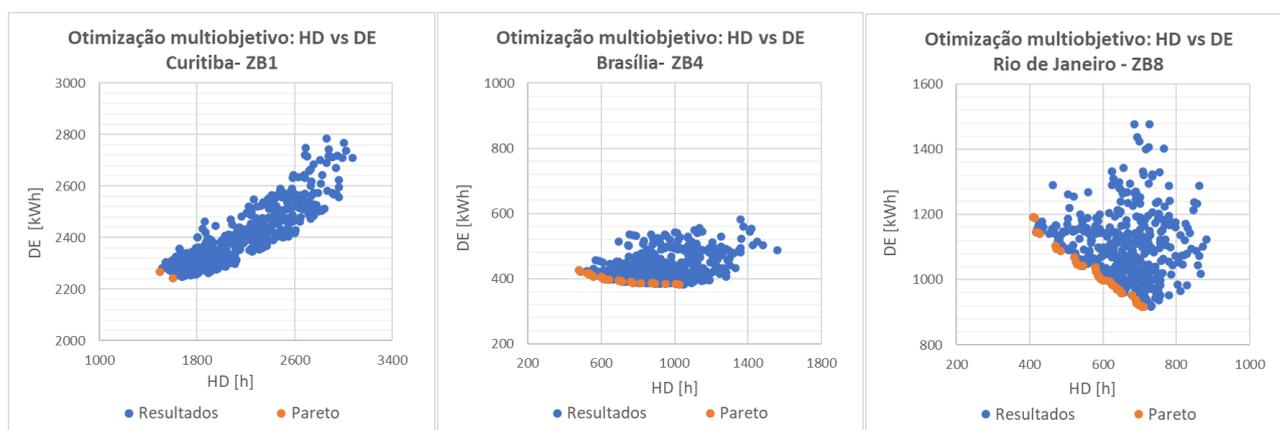


Figura 5. Resultado da otimização multiobjetivo.

Cada um dos pontos nos três gráficos presentes na Figura 5 representa uma possível combinação das variáveis de projeto. Como os dois objetivos envolvidos no processo de otimização são conflitantes, sendo eles, a redução das horas de desconforto e a demanda de energia de ar-condicionado, o resultado da otimização é um conjunto de soluções ótimas. Em relação aos resultados da otimização, as frentes de Pareto para as cidades de Curitiba, Brasília e Rio de Janeiro, foram compostas por cerca de 2, 33 e 47 soluções, respectivamente. O número reduzido de

soluções ótimas para a cidade de Curitiba é provavelmente proveniente das condições climáticas da cidade. O clima mais severo com baixas temperaturas exige normalmente elevados níveis de isolamento térmico e vidros de alto desempenho.

Tabela 3. Configuração e desempenho das soluções otimizadas.

Configuração e desempenho das soluções ótimas											
ZB	m0	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	HD	DE	CE
ZB1	360	V ₃	0,15	0,15	l ₂	l ₂	T ₂	F ₂	1494	2269	21,96
ZB4	360	V ₃	0,15	0,15	l ₂	l ₂	T ₂	F ₂	478	424	
ZB8	360	V ₃	0,15	0,15	l ₂	l ₂	T ₂	F ₂	413	1188	

Baseado na Tabela 3 foi possível identificar que as soluções ótimas possuem configurações idênticas. Como esperado, os desempenhos térmico e energético variaram de acordo com as condições climáticas de cada cidade avaliada, enquanto o desempenho de emissão de carbono manteve-se o mesmo para todas as cidades. A solução ótima foi composta por uma orientação solar oposta a inicial, vidros de alto desempenho, elevada espessura de isolamento térmico (lã de madeira) para paredes externas e telhado, telhas cerâmicas e forro de madeira.

4.3 Comparação dos resultados

Por fim, a última e terceira etapa foi focada em comparar os resultados para avaliar o potencial das soluções construtivas consideradas e identificar as composições com melhor desempenho. Figure 6 apresentou os resultados de desempenho térmico e energético das melhores soluções para cidade, e os resultados de emissão de carbono para cada uma das composições consideradas. Note que as cidades de Curitiba e Brasília fizeram referência a três soluções, em contraste as duas soluções para cidade do Rio de Janeiro. O número de soluções para cidade do Rio de Janeiro foi menor pois na primeira etapa (análise paramétrica) a melhor solução para o desempenho térmico foi a mesma que para o desempenho energético.

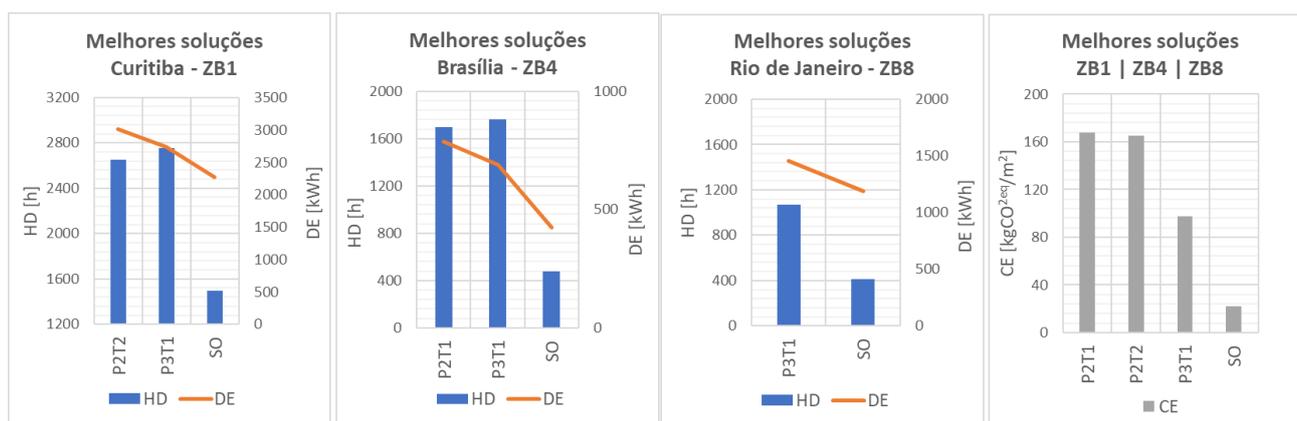


Figura 6. Comparação do desempenho das melhores soluções.

Para a cidade de Curitiba (ZB1), a solução otimizada (SO) foi capaz de reduzir as horas de desconforto das composições P2T2 e P3T1 em cerca de 44% e 46%, respectivamente. Em relação a demanda de energia do sistema de ar-condicionado, a solução otimizada (SO) foi capaz de reduzir em 25% para composição P2T2 e em 17% para composição P3T1. Para a cidade de Brasília (ZB4), a solução otimizada (SO) foi capaz de reduzir as horas de desconforto das composições P2T1 e P3T1 em cerca de 72% e 73%, respectivamente. Em relação a demanda de energia do sistema de ar-condicionado, a solução otimizada (SO) foi capaz de reduzir em 46% para composição P2T1 e em 39% para composição P3T1. Para a cidade do Rio de Janeiro (ZB8), a solução otimizada (SO) foi capaz de reduzir as horas de desconforto e demanda de energia do sistema de ar-condicionado da composição P3T1 em cerca de 61% e 18%, respectivamente. Finalmente, em termos de emissão de carbono, a solução otimizada foi capaz de reduzir as emissões em até 87%. Este resultado conferiu saldo promissor para edificação, isto é, a solução otimizada é capaz de absorver e estocar uma quantidade considerável de carbono. Portanto, as composições que consideraram biomateriais, destacaram-se como escolhas promissoras para o estudo de caso tanto do ponto de vista térmico e energético quanto do ponto de vista de emissão de carbono.

5 CONCLUSÕES

O método aplicado para realização deste trabalho foi composto por três principais etapas. Na primeira etapa, foi possível concluir que o sistema de *wood frame* registrou o melhor desempenho energético em todas as cidades avaliadas, enquanto o bloco cerâmico e de concreto teve um melhor desempenho térmico para as cidades de Brasília e Curitiba, respectivamente. Além disso, foi registrada uma redução de 46% das emissões de carbono. Esses resultados foram encontrados devido a utilização de biomateriais na composição de paredes e telhados. Na segunda etapa, foi possível identificar que as soluções ótimas possuem configurações idênticas. As soluções ótimas foram compostas por uma orientação solar oposta a inicial, vidros de alto desempenho, elevada espessura de isolamento térmico (lã de madeira) para paredes externas e telhado, telhas cerâmicas e forro de madeira. Por fim, na última etapa, identificou-se que a solução otimizada foi capaz de reduzir as horas de desconforto e a demanda de energia em até 73% e 46%, respectivamente. Em termos de emissão de carbono, a solução otimizada foi capaz de reduzir as emissões em até 87%. Este resultado conferiu saldo promissor para edificação, isto é, a solução otimizada é capaz de absorver e estocar uma quantidade considerável de carbono. Finalmente, o sistema de *wood frame*, que é composto por biomateriais, destacou-se como uma escolha promissora para o estudo de caso tanto do ponto de vista térmico e energético quanto do ponto de vista de emissão de carbono.

O trabalho apresentou algumas limitações que serão abordadas em projetos futuros: 1) Apenas um modelo foi avaliado - futuras investigações focarão em diferentes tipologias residenciais; 2) Foi considerado apenas um cenário otimizado de estoque de carbono nos biomateriais, que pode mudar dependendo do tipo de produção do biomateriais, vida útil e fim de vida; 3) A solução ótima também deve ser avaliada pelo custo do ciclo de vida (LCC) - Para entender melhor a viabilidade de cada solução de projeto, o custo deve ser integrado ao processo de otimização.

6 REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2005) NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações. 2005. Rio de Janeiro, Brasil.

ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (2010) ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. **ASHRAE STANDARD - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. 2010. Atlanta, GA. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0140700779901142>>.

Clemente, B. M. (2019) Avaliação de desempenho térmico de edificação em wood frame no Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, Brasil.

Ecoinvent. (2023) Environmental data worldwide - Ecoinvent database. Disponível em: <<https://ecoinvent.org/>>. Acesso em: 4 set. 2023.

Fundação João Pinheiro. (2019) Deficit Habitacional E Inadequação De Moradias no Brasil: Principais Resultados para o Período de 2016 a 2019. Disponível em: < <https://fjp.mg.gov.br/deficit-habitacional-no-brasil/>>. Acesso em: 4 set. 2023.

HEHL, Ranier.; ANGELIL, Marc. (2014) Minha casa - nossa cidade: innovating mass housing for social change in Brazil. São Paulo. Ruby Press.

INMETRO - Instituto Nacional De Metrologia. (2012) O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQ. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001788.pdf>>. Acesso em: 4 set. 2023.

Machairas, V.; Tsangrassoulis, A.; Axarli, K. (2014) Algorithms for optimization of building design: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 31, n. 1364, p. 101–112. DOI: 10.1016/j.rser.2013.11.036. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.036>>. Acesso em: 4 set. 2023.

Mendon, V.; Hart, R.; Vangeem, M. (2017). Evaluating the Thermal Performance of Mass Walls Compared to Wood-Framed and Steel- Framed Walls in Residential Buildings using EnergyPlus. Pacific Northwest National Laboratory, Richland Washington, USA Self-employed, Mount Prospect, Illinois, USA. p. 2599–2608.

Sharif, S. A.; Hammad, A. (2019) Developing surrogate ANN for selecting near-optimal building energy renovation methods considering energy consumption, LCC and LCA. Journal of Building Engineering, v. 25, p. 100790. DOI: 10.1016/j.job.2019.100790. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100790>>. Acesso em: 4 set. 2023.

Sidac. (2023) Brazilian Construction Environmental Performance Information System - Sidac. Disponível em: <<https://sidac.org.br/>>. Acesso em: 4 set. 2023.

Solgi, E. et al. (2019) A parametric study of phase change material characteristics when coupled with thermal insulation for different Australian climatic zones. Building and Environment, v. 163, n. June, p. 106317. 2019. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106317. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106317>>. Acesso em: 4 set. 2023.