

O POTENCIAL DO SISTEMA DE *WOOD FRAME* PARA HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL CONSIDERANDO O DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

THE POTENTIAL OF THE WOOD FRAME SYSTEM FOR SOCIAL HOUSING CONSIDERING THERMAL AND ENERGY PERFORMANCE IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE

Alexandre Santana Cruz¹
alexandre.cruz@fau.ufrj.br

Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos²
leopoldo.bastos@fau.ufrj.br

Resumo: A crise energética e as mudanças climáticas continuam sendo questões importantes para o desenvolvimento da humanidade. Dentro deste contexto, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) afirma que as regiões tropicais serão as mais afetadas pelo aquecimento global. Paralelamente, apesar dos avanços sociais e econômicos no Brasil, estima-se que 20% da população viva em condições inadequadas. Sendo assim, o déficit habitacional representa uma oportunidade de implementação de novas tecnologias para economizar energia e promover maior resiliência ao ambiente construído. Por esse motivo, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial do sistema de *wood frame* para habitações de interesse social, considerando o desempenho térmico e energético, frente às mudanças climáticas em três zona bioclimáticas brasileira. O estudo foi composto por duas principais etapas: 1) Os arquivos climáticos futuros foram desenvolvidos utilizando a ferramenta CCWorldWeatherGen; e 2) Uma análise paramétrica foi realizada para explorar diferentes sistemas construtivos. Nesta etapa, o objetivo foi estimar as horas de desconforto e a demanda de energia das

¹ Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PROARQ - UFRJ). Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e mestrado em Arquitetura e Urbanismo pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Participou do Programa Ciências sem Fronteiras, desenvolvendo atividades na University of New Hampshire (UNH), nos Estados Unidos, e atuou como aluno-pesquisador no Summer Practicum Program in Civil Engineering na California State University Long Beach (CSULB).

² Docente do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PROARQ-UFRJ) e coordenador do Grupo de Pesquisa Projeto Arquitetura e Sustentabilidade (GPAS). Atua também como docente no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Cidade da Universidade Vila Velha (UVV). Possui experiência internacional por meio de pós-doutorado no LAAS/CNRS, em Toulouse, França. É doutor e mestre em Ciências em Engenharia Mecânica pela UFRJ e graduado em Engenharia Industrial Mecânica pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Além disso, atuou como professor visitante na Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), bem como na Universidade de Coimbra, na Universidade Técnica de Berlim, no Centre Thermique des Bâtiments (CETHIL) – Institut des Sciences Appliquées de Lyon (INSA) e na École d'Architecture (ENSA) e INSA de Toulouse.

possíveis combinações de envelope do modelo; e por fim, identificar a melhor solução construtiva para cada localização avaliada. O EnergyPlus foi utilizado como ferramenta de simulação e acoplado com a ferramenta de parametrização jEPlus para realizar a análise paramétrica. As três cidades consideradas foram Curitiba – PR, Brasília – DF e Rio de Janeiro – RJ, enquanto os sistemas construtivos avaliados foram as paredes de bloco de concreto, paredes de *wood frame*, telhado de fibrocimento, e telhado de fibrocimento com isolamento térmico. Os resultados apontaram que as paredes de *wood frame* combinadas com telhados isolados termicamente representam uma alternativa construtiva promissora para promover resiliência em habitações de interesse social frente às mudanças climáticas.

Palavras-Chave: habitação de interesse social, simulação computacional, sistema de *wood frame*, mudanças climáticas

Abstract: The energy crisis and climate change continue to be important issues for human development. Within this context, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) states that tropical regions will be most affected by global warming. At the same time, despite social and economic advances in Brazil, it is estimated that 20% of its population lives in inadequate conditions. Therefore, the housing deficit represents an opportunity to implement new technologies to save energy and promote greater resilience to the built environment. For this reason, this work aimed to evaluate the potential of the wood frame system for social housing, considering the thermal and energy performance, toward climate change in three Brazilian bioclimatic zones. The study consisted of two main steps: 1) Future weather files were developed using the CCWorldWeatherGen tool; 2) A parametric analysis was performed to explore different building systems. In this step, the objective was to estimate the discomfort hours and the energy demand of the possible envelope combinations of the model; and finally, identify the best constructive solution for each evaluated location. The EnergyPlus was used as a simulation tool and coupled with the jEPlus parameterization tool to perform the parametric analysis. The three cities considered were Curitiba - PR, Brasília - DF and Rio de Janeiro - RJ, while the constructive systems evaluated were concrete block walls, wood frame walls, fiber cement roof, and fiber cement roof with thermal insulation. The results showed that wood frame walls combined with thermally insulated roofs represent a promising constructive alternative to promote resilience in social housing in the face of climate change.

Keywords: social housing, computer simulation, wood frame system, climate change

1. Introdução

No Brasil, estima-se que haja um déficit de 6 milhões de unidades habitacionais (FJP 2021). Para atender essa demanda, o Governo Federal implementou os programas "Minha Casa, Minha Vida" e posteriormente o "Casa Verde e Amarelo", com o intuito de facilitar o acesso à moradia para famílias de baixa renda (Governo Federal, 2022). 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. Além disso, foi adotado um modelo padronizado em todo o país visando reduzir custos e agilizar o processo de construção. Contudo, como resultado, muitos dos edifícios construídos apresentam baixa qualidade e não atendem às necessidades dos moradores, especialmente no que diz respeito ao conforto térmico e desempenho energético (Cruz, Carvalho, e Cunha 2020; Dalbem et al. 2019).

As discussões sobre eficiência energética são recentes no Brasil. A NBR 15220, lançada em 2005, foi a primeira norma brasileira a oferecer diretrizes e estratégias para avaliar o desempenho térmico de habitações de interesse social, levando em conta aspectos construtivos e bioclimáticos (ABNT, 2005). Em seguida, em 2008, a NBR 15575 estabeleceu requisitos e critérios de desempenho para edificações residenciais na fase de projeto (ABNT, 2013). Posteriormente, em 2010, foi publicado o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética dos Edifícios Residenciais (RTQ-R), que classifica os edifícios em termos de eficiência energética em uma escala de "A" a "E" (INMETRO, 2012). Apesar dos avanços na regulamentação nos últimos anos, as edificações representam metade da demanda total de energia elétrica no Brasil, sendo o setor residencial o maior consumidor, responsável por um quarto dessa demanda (MME, 2019).

Ao mesmo tempo, é crescente a preocupação com as mudanças climáticas, uma vez que pode representar uma ameaça ao desempenho térmico e energético de edificações, podendo aumentar a demanda de energia dos edifícios e a dependência dos sistemas de climatização (HVAC) (Invidiata e Ghisi, 2016). Por meio de simulações com dados meteorológicos futuros, diversos estudos têm demonstrado que a implementação de medidas de adaptação é crucial para mitigar o impacto das mudanças climáticas no desempenho térmico e energético das construções (Triana, Lamberts, e Sassi 2018). Essas medidas incluem o uso de dispositivos de sombreamento em janelas, revestimentos com baixa absorção solar e a aplicação de isolamento térmico (Cruz e Cunha, 2021).

Dentre as soluções construtivas inovadoras, os biomateriais têm se destacado como alternativas promissoras. Esses materiais, derivados de fontes renováveis, possuem a capacidade de armazenar carbono, além de apresentarem um desempenho térmico superior em relação aos materiais convencionais, como concreto, cerâmica e aço. Desta forma, contribui para a redução do consumo de energia durante a operação dos edifícios. Entre as diversas opções disponíveis, a madeira desponta como um sistema construtivo leve e otimizado, conhecido como *wood frame*. Esse sistema utiliza perfis de madeira provenientes de florestas plantadas e tratadas. O *wood frame* se destaca por sua leveza, durabilidade, rapidez na execução e redução de desperdícios, proporcionando um elevado controle de qualidade (Mendon, Hart, e Vangeem 2017). Amplamente adotado em países da América do Norte, Ásia e Europa, o *wood frame* vem conquistando espaço na América Latina (Clemente,

2019). Quando combinado com isolantes térmicos, como lã de rocha e vidro, o *wood frame* possibilita a criação de um envelope de alto desempenho, reduzindo as trocas de calor indesejadas. Isso resulta em uma melhoria na qualidade do ar interno e na redução do risco de problemas relacionados à umidade e crescimento de mofo. Dessa forma, o *wood frame* se apresenta como uma escolha mais sustentável para a construção de edifícios, oferecendo uma série de benefícios em termos de construção e desempenho térmico-energético (Mendon, Hart, e Vangeem 2017).

2. Objetivo

O propósito principal deste estudo foi avaliar o potencial, em relação ao desempenho térmico e energético, da utilização do sistema de *wood frame* em uma habitação de interesse social frente às mudanças climáticas. Para isso, um modelo de habitação de interesse social foi analisado em diferentes zonas bioclimáticas (Curitiba, Brasília e Rio de Janeiro). Sendo assim, este trabalho científico contribui ao apresentar um estudo que considera arquivos climáticos futuros e traz à tona a discussão de uma análise mais robusta para promover a resiliência do ambiente construído. Além disso, contribui para a divulgação de sistemas construtivos não convencionais, mais industrializados e que façam uso de biomateriais, como é o caso do *wood frame*.

3. Método

Como mencionado, um projeto de habitação de interesse social foi utilizado como estudo de caso. Na Tabela 1 foi apresentado o método seguido para este trabalho, que foi dividido em três etapas.

Etapa	Descrição	Objetivo	Variáveis
1	Geração de arquivos climáticos futuros.	Identificar mudanças climáticas.	1. Temperatura de bulbo seco, 2. Umidade relativa, 3. Radiação global horizontal.
2	Análise paramétrica	Estimar horas de desconforto e demanda de energia.	1. Tipo de parede, 2. Tipo de telhado, 3. Arquivos climáticos futuro.

Tabela 1. Etapas do método.

Na etapa 1, os arquivos climáticos futuros foram desenvolvidos utilizando a ferramenta CCWorldWeatherGen. Nesta etapa, os parâmetros avaliados foram a temperatura de bulbo seco, umidade relativa e radiação global horizontal. Na segunda etapa, uma análise paramétrica foi realizada para explorar diferentes sistemas construtivos. Nesta etapa, o objetivo foi estimar as horas de desconforto e a demanda de energia das possíveis combinações de envelope do modelo. O EnergyPlus foi utilizado como ferramenta de simulação e foi acoplado com a ferramenta de parametrização jEPlus para realizar a análise paramétrica. Além disso, as variáveis de projeto foram o tipo de parede, tipo de telhado e os arquivos climáticos futuros desenvolvidos na etapa anterior. Os sistemas construtivos considerados foram as paredes de bloco de concreto, paredes de *wood frame*, telhado de fibrocimento, e telhado de fibrocimento com isolamento térmico; enquanto as três cidades consideradas foram Curitiba – PR, Brasília – DF e Rio de Janeiro – RJ, localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 4 e 8, respectivamente. Finalmente, uma análise comparativa foi realizada para identificar a melhor solução construtiva.

3.1. Estudo de caso

Foi utilizado um modelo de habitação de interesse social com uma área total de 43m². Essa residência segue o programa nacional de habitação de interesse social denominado "Casa Verde e Amarela" (Governo Federal, 2022). O modelo é composto por uma sala integrada à cozinha, dois quartos e um banheiro. A Figura 1 ilustra o modelo residencial utilizado como objeto de estudo.

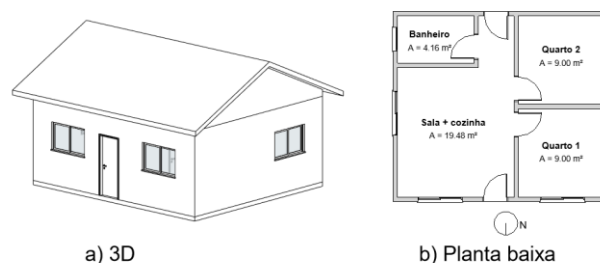


Figura 1 – Modelo residencial

3.1.1. Sistemas construtivos

Como dito anteriormente, os sistemas construtivos avaliados neste estudo foram: paredes de bloco de concreto, paredes de *wood frame*, telhado de fibrocimento, e telhado de fibrocimento com isolamento térmico. A Tabela 2 apresentou a lista completa dos sistemas construtivos avaliados, seus respectivos ID e propriedades térmicas como transmitância térmica (U), capacidade térmica (CT), absorvância solar (α).

ID	Categoria	Descrição	U (W/m ² K)	CT (kJ/m ² K)	α
P1	Parede	Tijolo cerâmico	2,48	158	0,2
P2		Wood frame	0,62	33	
T1	Telhado	Telha fibrocimento	2,25	84	0,5
T2		Telha fibrocimento com EPS	0,65	34	

Tabela 2 – Sistemas construtivos avaliados.

A parede de *wood frame* possui por várias camadas, sua estrutura é composta por um painel de madeira estruturado em Pinus preenchido por poliestireno expandido (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 (Mendon, Hart, e Vangeem 2017). Existem vários tipos de materiais de isolamento térmico, como lã de rocha, lã de vidro, espuma rígida de poliuretano e espuma de poliestireno extrudado. Neste estudo foram adotados painéis de poliestireno expandido (EPS) como isolante térmico, pois sua leveza garante fácil aplicação sem grandes alterações no processo construtivo (Ramli Sulong, Mustapa, e Abdul Rashid, 2019). Por fim, ambos os telhados apresentaram forro de PVC em suas respectivas composições.

3.1.2. Configurações do modelo

O modelo de energia desenvolvido no EnergyPlus foi composto por quatro zonas térmicas e seguiu os valores padrão de simulação estabelecidos pelo RTQ-R como estratégia de configuração (INMETRO, 2012). Para o estudo de caso em questão, os horários de ocupação e iluminação foram configurados de acordo com a Figura 2. Foi adotado um total de duas pessoas por quarto e quatro pessoas na sala, enquanto o padrão de iluminação variou de acordo com a presença de pessoas no ambiente e o horário do dia. A taxa metabólica para a sala e os quartos foi estabelecida em 108 W/pessoa e 81 W/pessoa, respectivamente. Quanto à densidade de potência de iluminação, adotou-se 6 W/m² para sala e 5 W/m² para os quartos. Além disso, foi considerada uma carga de equipamento de 1,5 W/m² para a sala, que permaneceu ativa durante as 24 horas do dia.

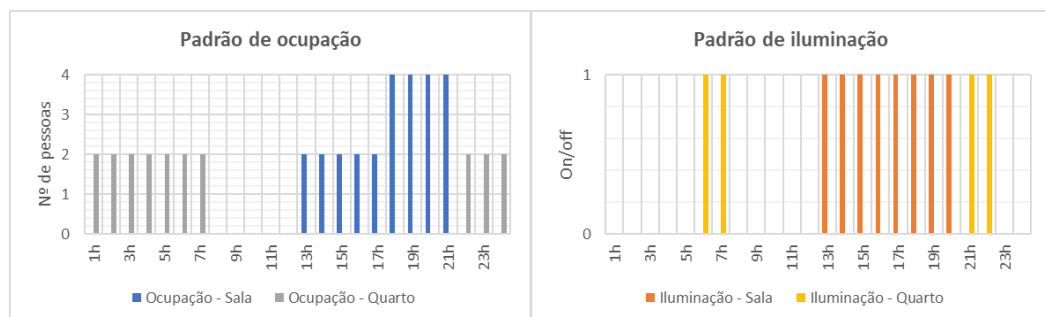


Figura 2 – Padrão de ocupação e iluminação

O estudo de caso foi configurado com dois modos de operação: 1) ventilação natural e 2) ar-condicionado nos quartos e na sala. No primeiro modo de operação, a ventilação natural foi estabelecida para ocorrer durante o horário de ocupação dos ambientes e foi configurada utilizando o objeto Airflow network no EnergyPlus (DOE, 2021). A ventilação natural foi programada para acontecer em duas situações: quando a temperatura do ar interno é igual ou superior ao *setpoint* do termostato e quando a temperatura do ar interno é maior do que a temperatura externa. O modelo de conforto térmico adotado neste estudo baseou-se no modelo de conforto adaptativo da ASHRAE, com limites de aceitabilidade de 90% (ASHRAE, 2010). No segundo modo de operação, o sistema de ar-condicionado foi modelado utilizando o objeto Packaged Terminal Heat Pump (PTHP) no EnergyPlus (DOE, 2021). O sistema foi configurado com um *setpoint* de 20°C para aquecimento e 25°C para resfriamento,

além de um coeficiente de performance (COP) de 3,24 (INMETRO, 2012). Portanto, os indicadores de performance foram calculados a partir das Equações 1 e 2:

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

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

Onde: HD foi o número de horas de desconforto ao longo de um ano e HD_{sl} , HD_{qt1} e HD_{qt2} representaram o número de horas de desconforto na sala de estar, quarto 1 e quarto 2, respectivamente. DE representou a demanda total de energia do sistema de ar-condicionado em um ano e DE_{sl} , DE_{qt1} e DE_{qt2} representaram a demanda de energia do sistema de ar-condicionado para a sala de estar, quarto 1, quarto 2, respectivamente.

3.2. Previsão das mudanças climáticas

Conforme a NBR 15220, o território brasileiro possui oito Zonas Bioclimáticas (ZB), sendo a ZB 8 classificada como a zona mais quente e ZB 1 a zona mais fria (ABNT, 2005). Com o objetivo de realizar uma análise abrangendo uma diversidade climática significativa, foram selecionadas três cidades brasileiras. Este estudo considerou as cidades de Curitiba, Brasília e Rio de Janeiro, localizadas nas Zonas Bioclimáticas 1, 4 e 8, que correspondem a aproximadamente 0,8%, 2,0% e 53,7% do território brasileiro, respectivamente. A Tabela 3 apresentou os dados climáticos atuais, incluindo temperatura de bulbo seco - TBC (°C), umidade relativa - UR (%) e radiação horizontal global - RGH (Wh/m^2), para as cidades analisadas.

Cidade	ZB	TBC (°C)			UR (%)	RGH (Wh/m^2)
		Média	Max	Min	Média	Média
Curitiba - PR	1	16	31	-2	86	129
Brasília - DF	4	21	33	6	75	167
Rio de Janeiro - RJ	8	25	38	14	82	210

Tabela 3. Média anual dos parâmetros climáticos

Esta pesquisa levou em consideração, cenários climáticos futuros para avaliar o impacto das mudanças climáticas. De acordo com estudos anteriores (Cruz e Cunha 2021; Invidiata e Ghisi 2016; Triana, Lamberts, e Sassi 2018), utilizou-se a ferramenta denominada CCWorldWeatherGen para gerar arquivos climáticos futuros (SER Group, 2012). Essa ferramenta é baseada no Microsoft Excel e utiliza arquivos EnergyPlus Weather (EPW) para gerar dados meteorológicos futuros para qualquer local no mundo, seguindo o cenário de emissões A2 para os anos 2020, 2050 e 2080. O estudo foi baseado no cenário A2 que representa a tendência mundial atual de altas emissões (IPCC, 2001). Por fim, os arquivos climáticos das três cidades avaliadas no formato *Test Reference Year* (TRY) foram inseridos na ferramenta CCWorldWeatherGen para desenvolvimento dos arquivos climáticos futuros.

3.3. Simulações

A abordagem de simulação considerada neste estudo foi a simulação paramétrica. A análise paramétrica varia um parâmetro de cada vez, enquanto os outros são mantidos constantes. Nesta etapa, o objetivo foi estimar as horas de desconforto e a demanda de energia das possíveis combinações de envelope do modelo. O EnergyPlus foi utilizado como ferramenta de simulação e foi acoplado com a ferramenta de parametrização jEPlus para realizar a análise paramétrica. A ferramenta jEPlus tem a capacidade de preparar automaticamente os arquivos de entrada (formato de arquivo idf) para o EnergyPlus de acordo com um arquivo de tarefas, em que o EnergyPlus é inicializado para simulações paralelas e os resultados das simulações são coletados de acordo com a configuração especificada pelo usuário (Zhang, Yi; Korolija 2019).

As variáveis de projeto foram o tipo de parede, tipo de telhado, localização e os arquivos climáticos atuais e futuros como indicado na Tabela 4. Os sistemas construtivos considerados foram as paredes de bloco de concreto, paredes de *wood frame*, telhado de fibrocimento, e telhado de fibrocimento com isolamento térmico (veja a Tabela 2); enquanto as três cidades consideradas foram Curitiba – PR, Brasília – DF e Rio de Janeiro – RJ, localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 4 e 8, respectivamente. Finalmente, com base nos resultados, uma análise comparativa foi realizada para identificar a melhor solução construtiva em termos de

desempenho térmico e energético frente as mudanças climáticas para cada uma das cidades avaliadas.

Variável	Amostragem
Tipo de parede	P1 a P2
Tipo de telhado	T1 a T2
Localização	ZB 1 a ZB3
Contexto climático	Atual ou futuro

Tabela 4. Variáveis de projeto utilizadas na análise paramétrica

4. Resultados

Os resultados foram apresentados em duas etapas. Na primeira, as previsões das mudanças climáticas foram ilustradas a partir da análise dos arquivos futuros. E na segunda etapa, os resultados das simulações paramétricas e a análise comparativa foram apresentados.

4.1. Previsão das mudanças climáticas

A Figura 3 mostra as médias mensais da temperatura de bulbo seco (°C) - TBC, umidade relativa (%) - UR e radiação horizontal global (Wh/m²) – RHG das cidades analisadas para os arquivos climáticos atuais (TRY) e futuros (2080).

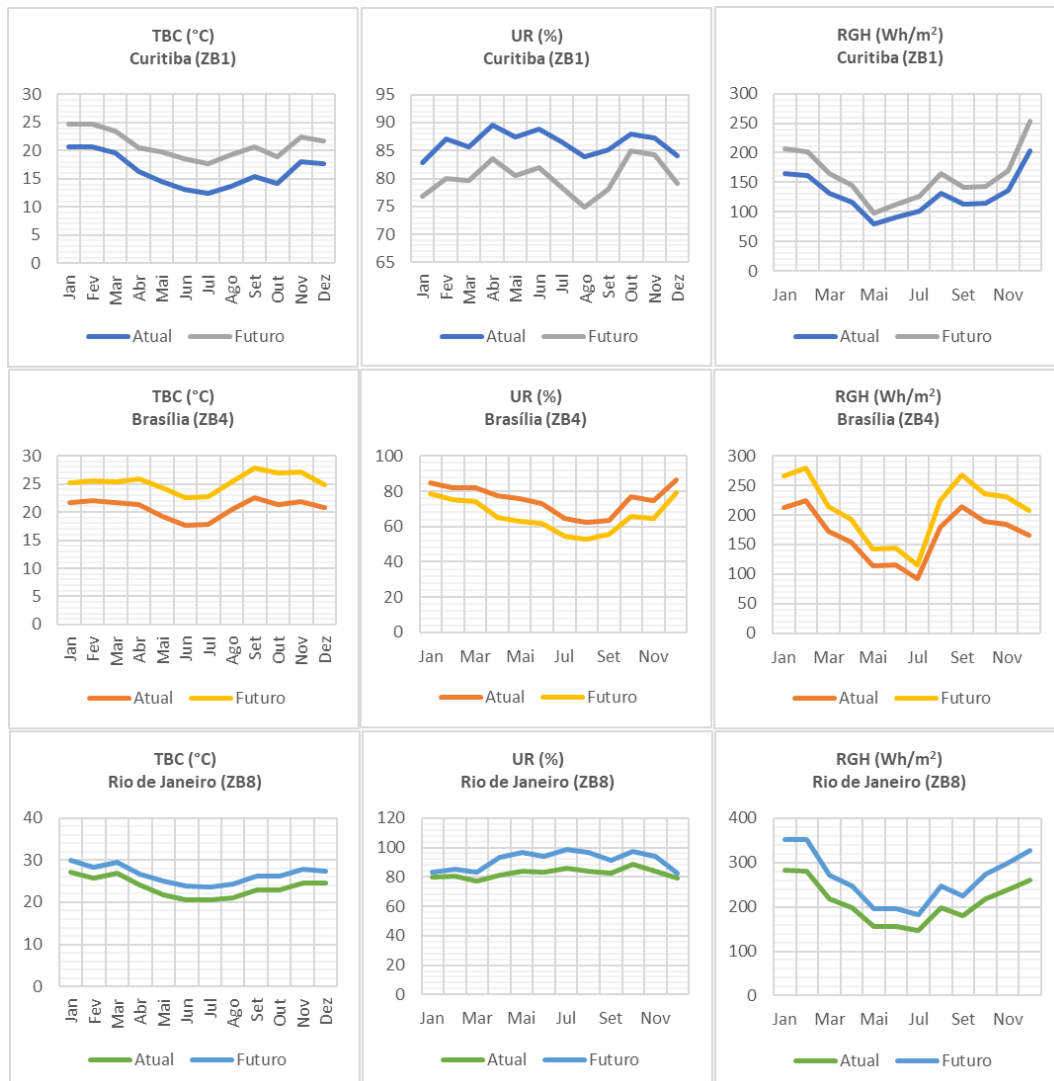


Figura 3 – Parâmetros climáticos para contexto atual e futuro.

Conforme apontado pelo IPCC, o clima global está aquecendo rapidamente, com aumento da frequência de eventos severos, incluindo ondas de calor. Além disso, com base nas previsões e nos resultados apresentados, espera-se que o contexto climático atual mude drasticamente. Analisando a cidade de Curitiba (ZB1), a média anual da temperatura de bulbo seco, umidade relativa e radiação global horizontal deve aumentar cerca de 4,6°C, -6,2%, e 32Wh/m² até 2080, respectivamente. Para a cidade de Brasília (ZB4), a média anual da temperatura de bulbo seco, umidade relativa e radiação global horizontal deve aumentar cerca de 4,1°C, -9,3%, e 42Wh/m² até 2080, respectivamente. E finalmente, para cidade do Rio de

Janeiro (ZB8), a média anual da temperatura de bulbo seco, umidade relativa e radiação global horizontal deve aumentar cerca de 3°C, 10%, e 52,7Wh/m² até 2080, respectivamente.

4.2. Simulações

Na segunda etapa, uma análise paramétrica foi realizada para explorar diferentes sistemas construtivos. Nesta etapa, o objetivo foi estimar as horas de desconforto e a demanda de energia das possíveis combinações de envelope do modelo. As variáveis de projeto foram o tipo de parede, tipo de telhado e os arquivos climáticos atuais e futuros. Os sistemas construtivos considerados foram as paredes de bloco de concreto, paredes de *wood frame*, telhado de fibrocimento, e telhado de fibrocimento com isolamento térmico; enquanto as três cidades consideradas foram Curitiba – PR, Brasília – DF e Rio de Janeiro – RJ, localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 4 e 8, respectivamente.

A Figura 4 e 5 apresentaram o desempenho térmico e energético para as possíveis combinações de envelope nas três cidades avaliadas no contexto climático atual e futuro, respectivamente. Inicialmente foi avaliado o desempenho térmico e posteriormente o desempenho energético.

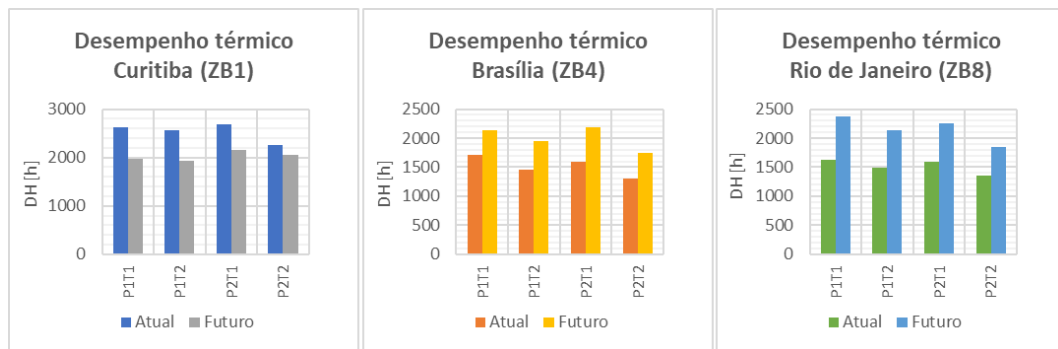


Figura 4 – Desempenho térmico atual e futuro para ZB1, ZB4 e ZB8.

Com base nos resultados apresentados na Figura 4, foi possível identificar a melhor e pior solução em termos de desempenho térmico para cada cidade avaliada. Para a cidade de Curitiba (ZB1), considerando o arquivo climático atual, a melhor solução foi a combinação P2T2, enquanto P2T1 registrou o pior desempenho. A solução P2T2 conseguiu promover uma redução em 16% nas horas de desconforto quando comparada com a solução P2T1. Porém, considerando o arquivo climático futuro, os resultados foram diferentes. A combinação P1T2

registrou a melhor performance, enquanto P2T1 se manteve com o pior desempenho. A solução P1T2 conseguiu promover uma redução em 10% nas horas de desconforto quando comparada com a solução P2T1. Em termos de impacto devido ao arquivo climático atual e futuro, na cidade de Curitiba, as horas de desconforto diminuíram em até 25% devido as projeções das mudanças climáticas. Para a cidade de Brasília (ZB4), considerando o arquivo climático atual, a melhor solução foi a combinação P2T2, enquanto P1T1 registrou o pior desempenho. A solução P2T2 conseguiu promover uma redução em 24% nas horas de desconforto quando comparada com a solução P1T1. Porém, considerando o arquivo climático futuro, os resultados foram diferentes. A combinação P2T2 manteve-se com a melhor performance, enquanto P2T1 registrou o pior desempenho. A solução P2T2 conseguiu promover uma redução em 18% nas horas de desconforto quando comparada com a solução P2T1. Em termos de impacto devido ao arquivo climático atual e futuro, na cidade de Brasília, as horas de desconforto aumentaram em até 37% devido as projeções das mudanças climáticas. Para a cidade do Rio de Janeiro (ZB8), considerando o arquivo climático atual, a melhor solução foi a combinação P2T2, enquanto P1T1 registrou o pior desempenho. A solução P2T2 conseguiu promover uma redução em 17% nas horas de desconforto quando comparada com a solução P1T1. Porém, considerando o arquivo climático futuro, os resultados foram diferentes. A combinação P2T2 manteve-se com a melhor performance, enquanto P2T1 registrou o pior desempenho. A solução P2T2 conseguiu promover uma redução em 21% nas horas de desconforto quando comparada com a solução P2T1. Em termos de impacto devido ao arquivo climático atual e futuro, na cidade do Rio de Janeiro, as horas de desconforto aumentaram em até 45% devido as projeções das mudanças climáticas.

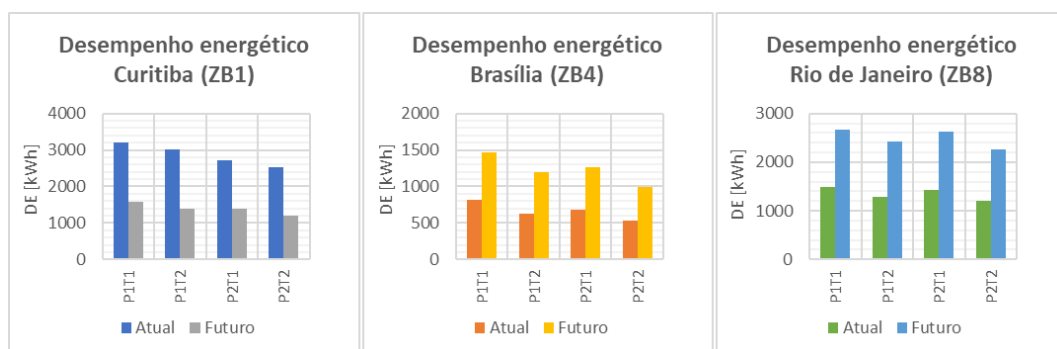


Figura 5 – Desempenho energético atual e futuro para ZB1, ZB4 e ZB8.

Com base nos resultados apresentados na Figura 5, foi possível identificar a melhor e a pior solução em termos de desempenho energético para cada cidade avaliada. Para a cidade de Curitiba (ZB1), considerando o arquivo climático atual, a melhor solução foi a combinação P2T2, enquanto P1T1 registrou o pior desempenho. A solução P2T2 conseguiu promover uma redução em 19% da demanda de energia quando comparada com a solução P2T1. Além disso, considerando o arquivo climático futuro, os resultados para melhor e pior solução foram semelhantes. Porém, com um potencial de redução em 31% da demanda de energia. Em termos de impacto devido ao arquivo climático atual e futuro, na cidade de Curitiba, a demanda de energia diminuiu em até 54% devido as projeções das mudanças climáticas. Para a cidade de Brasília (ZB4), considerando o arquivo climático atual, a melhor solução foi a combinação P2T2, enquanto P1T1 registrou o pior desempenho. A solução P2T2 conseguiu promover uma redução em 35% da demanda de energia quando comparada com a solução P2T1. Semelhante a cidade de Curitiba, considerando o arquivo climático futuro, os resultados para melhor e pior solução foram semelhantes. Porém, com um potencial de redução em 32% da demanda de energia. Em termos de impacto devido ao arquivo climático atual e futuro, na cidade de Brasília, a demanda de energia aumentará em até 87% devido as projeções das mudanças climáticas. Para a cidade do Rio de Janeiro (ZB8), considerando o arquivo climático atual, a melhor solução foi a combinação P2T2, enquanto P1T1 registrou o pior desempenho. A solução P2T2 conseguiu promover uma redução em 19% da demanda de energia quando comparada com a solução P2T1. Semelhante as cidades anteriormente avaliadas, considerando o arquivo climático futuro, os resultados para melhor e pior solução foram semelhantes. Porém, com um aumento em 16% da demanda de energia. Em termos de impacto devido ao arquivo climático atual e futuro, na cidade de Brasília, a demanda de energia aumentará em até 90% devido as projeções das mudanças climáticas.

Além disso, uma análise comparativa foi realizada para quantificar o impacto das mudanças climáticas no desempenho térmico e energético das melhores soluções para cada cidade. A Figura 6 ilustrou o desempenho térmico e energético das soluções P2T2 e P1T2 em Curitiba (ZB1) e P2T2 para Brasília (ZB4) e Rio de Janeiro (ZB8), respectivamente.

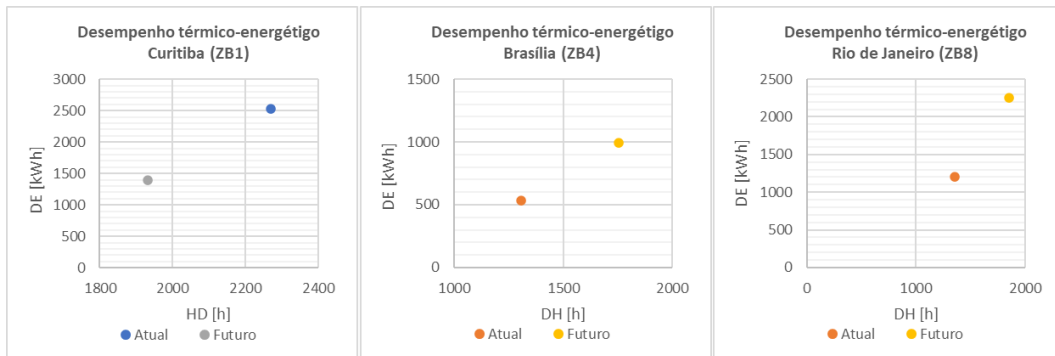


Figura 6 – Desempenho térmico-energético das melhores soluções para ZB1, ZB4 e ZB8.

Diferentemente das melhores soluções para Brasília e Rio de Janeiro, em Curitiba a solução ótima mudou ao considerar o contexto climático futuro. Devido as mudanças climáticas, a expectativa para cidade de Curitiba é de uma redução das horas de desconforto e demanda de energia em 25% e 54%, respectivamente. Sendo assim, as mudanças climáticas favoreceram o desempenho avaliado e as paredes de bloco de concreto se destacam em relação as paredes de *wood frame* para esta localização. No entanto, o telhado de fibrocimento com isolamento térmico se manteve como estratégia preferida. Para cidade de Brasília e Rio de Janeiro, as soluções ótimas atuais e futuras foram as mesmas. A parede de *wood frame* e telhado de fibrocimento com isolamento térmico se destacaram tanto no contexto climático atual quanto no futuro. Devido às mudanças climáticas, a expectativa para cidade de Brasília é de um aumento das horas de desconforto e demanda de energia em 37% e 87%, respectivamente. Enquanto a expectativa para cidade do Rio de Janeiro é de um aumento das horas de desconforto e demanda de energia em 45% e 90%, respectivamente. Finalmente, foi possível concluir que as paredes de *wood frame* combinadas com telhados isolados termicamente representam uma alternativa construtiva promissora para promover resiliência em habitações de interesse social frente as mudanças climáticas.

5. Conclusão

O propósito principal deste estudo foi avaliar o potencial, em relação ao desempenho térmico e energético, da utilização do sistema de *wood frame* em uma habitação de interesse social frente às mudanças climáticas. Para isso, um modelo de habitação de interesse social foi analisado em diferentes zonas bioclimáticas (Curitiba, Brasília e Rio de Janeiro). Na primeira

etapa, os arquivos climáticos futuros foram desenvolvidos utilizando a ferramenta CCWorldWeatherGen. Com base nas previsões e nos resultados apresentados, espera-se que o contexto climático atual mude drasticamente. Para cidade de Curitiba, a média anual da temperatura de bulbo seco, umidade relativa e radiação global horizontal deve aumentar cerca de 4,6°C, -6,2%, e 32Wh/m² até 2080, respectivamente. Para a cidade de Brasília, esses valores devem aumentar cerca de 4,1°C, -9,3%, e 42Wh/m² até 2080, respectivamente. E finalmente, para cidade do Rio de Janeiro, a média anual da temperatura de bulbo seco, umidade relativa e radiação global horizontal deve aumentar cerca de 3°C, 10%, e 52,7Wh/m² até 2080, respectivamente. Na segunda etapa, uma análise paramétrica foi realizada para explorar diferentes sistemas construtivos. Nesta etapa, o objetivo foi estimar as horas de desconforto e a demanda de energia das possíveis combinações de envelope do modelo. Os sistemas construtivos considerados foram as paredes de bloco de concreto, paredes de *wood frame*, telhado de fibrocimento, e telhado de fibrocimento com isolamento térmico. Devido às mudanças climáticas, a expectativa para cidade de Curitiba é de uma redução das horas de desconforto e demanda de energia em até 25% e 53%, respectivamente. A expectativa para cidade de Brasília é de um aumento das horas de desconforto e demanda de energia em 37% e 87%, respectivamente. Enquanto a expectativa para cidade do Rio de Janeiro é de um aumento das horas de desconforto e demanda de energia em 45% e 90%, respectivamente. Considerando o contexto climático atual, a melhor solução para as cidades avaliadas foi a parede de *wood frame* e o telhado de fibrocimento com isolamento térmico. No entanto, para o contexto climático futuro, a melhor solução para Curitiba foi a parede de bloco de concreto e o telhado de fibrocimento com isolamento térmico, enquanto a solução ótima se manteve para as cidades de Brasília e Rio de Janeiro. Finalmente, foi possível concluir que as paredes de *wood frame* combinadas com telhados isolados termicamente representam uma alternativa construtiva promissora para promover resiliência em habitações de interesse social frente às mudanças climáticas.

Referências

U.S. Department of Energy. 2021. “EnergyPlus™ Input Output Reference.”

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2005. **NBR 15220**: O Desempenho Térmico Para Edificações de Interesse Social.

———. 2013. *NBR 15575 NBR 15575: A Norma Brasileira de Desempenho de Edifícios Habitacionais*. Rio de Janeiro.

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

Brazilian Federal Government. 2022. “**Programa MCMV - Minha Casa, Minha Vida No Brasil.**” <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/habitacao/minha-casa-minha-vida/programa-minha-casa-minha-vida-mcmv> (October 21, 2022).

Clemente, Beatriz Mapa. 2019. “**Avaliação de Desempenho Térmico de Edificação Em Wood Frame No Brasil.**”

Cruz, Alexandre S., Ramon S. de Carvalho, and Eduardo G. da Cunha. 2020. “Passive House Alternative Proposal for the Brazilian Bioclimatic Zone 8.” *International Journal of Sustainable Development and Planning* 15(6): 827–33.

Cruz, Alexandre Santana, and Eduardo Grala da Cunha. 2021. “The Impact of Climate Change on the Thermal-Energy Performance of the SCIP and ICF Wall Systems for Social Housing in Brazil.” *Indoor and Built Environment* 0(0): 1–15.

Dalbem, Renata et al. 2019. “Optimisation of a Social Housing for South of Brazil: From Basic Performance Standard to Passive House Concept.” *Energy* 167: 1278–96.

FJP, Fundação João Pinheiro. 2021. “**Deficit Habitacional e Inadequação De Morádias No Brasil: Principais Resultados Para o Período de 2016 a 2019.**” : 71. http://novosite.fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2020/12/04.03_Cartilha_DH_compressed.pdf.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia. 2012. *RTQ-R O Regulamento Técnico Da Qualidade Para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQ-R*. <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001788.pdf>.

Invidiata, Andrea, and Enedir Ghisi. 2016. “Impact of Climate Change on Heating and Cooling Energy Demand in Houses in Brazil.” *Energy and Buildings* 130(2016): 20–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.067>.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. *Third Assessment Report of the IPCC. III AR*. Geneva – Switzerland.

Mendon, Vrushali, Reid Hart, and Martha Vangeem. 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.**” : 2599–2608.

MME, Ministry of Mines and Energy. 2019. **Brazilian Energy Balance.**

Ramli Sulong, Nor Hafizah, Siti Aisyah Syaerah Mustapa, and Muhammad Khairi Abdul Rashid. 2019. "Application of Expanded Polystyrene (EPS) in Buildings and Constructions: A Review." **Journal of Applied Polymer Science** 136(20): 1–11.

SUSTAINABLE ENERGY RESEARCH GROUP - University of Southampton. 2012. CCWorldWeatherGen **Climate Change World Weather File Generator for World-Wide Weather Data.** <http://www.energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen>.