

# DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÃO EMERGENCIAL POR SIMULAÇÃO EVOLUTIVA

*THERMAL PERFORMANCE OF EMERGENCY HOUSING THROUGH EVOLUTIVE SIMULATION*

 Tháise Sebben <sup>1</sup>

 Rodrigo Karini Leitzke <sup>2</sup>

 Thalita dos Santos Maciel <sup>3</sup>

 Tháisa Leal da Silva <sup>4</sup>

 Eduardo Grala da Cunha <sup>5</sup>

 Lauro André Ribeiro <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Faculdade Meridional, Passo Fundo, RS, Brasil, [thaisebben@gmail.com](mailto:thaisebben@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil, [rklritzke@inf.ufpel.edu.br](mailto:rklritzke@inf.ufpel.edu.br)

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil, [thalita-maciel@hotmail.com](mailto:thalita-maciel@hotmail.com)

<sup>4</sup> Faculdade Meridional, Passo Fundo, RS, Brasil, [thaisa.silva@imed.edu.br](mailto:thaisa.silva@imed.edu.br)

<sup>5</sup> Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil, [eduardogralacunha@yahoo.com.br](mailto:eduardogralacunha@yahoo.com.br)

<sup>6</sup> Faculdade Meridional, Passo Fundo, RS, Brasil, [lauro.ribeiro@imed.edu.br](mailto:lauro.ribeiro@imed.edu.br)

## Contribuição dos autores:

**TS:** conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, administração de projetos, programas, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **RKL:** curadoria de dados, análise formal, investigação, programas, visualização, escrita - rascunho original. **TSM:** análise formal, programas, visualização, escrita - rascunho original. **TLS:** conceituação, metodologia, administração de projetos, supervisão, validação, escrita - revisão e edição. **EGC:** conceituação, curadoria de dados, investigação, metodologia, supervisão, validação, escrita - revisão e edição. **LAR:** validação, escrita - revisão e edição.

**Fomento:** Não houve fomento

**Declaração de conflito:** nada foi declarado.

Editor Responsável:

Leticia de Oliveira Neves 

## Resumo

A problemática do déficit habitacional no país e a necessidade de construção de moradias emergenciais de caráter provisório geram inúmeras consequências, tanto para o território com a falta de infraestrutura urbana, como para os moradores, relacionados à saúde e ao conforto em virtude das condições construtivas inadequadas. O objetivo deste trabalho foi encontrar soluções técnicas de projeto para a estrutura de uma habitação emergencial de madeira existente, revestida internamente com embalagens Tetra Pak®, de modo a minimizar o desconforto térmico em virtude das baixas temperaturas no sul do Brasil. Para isso, utilizou-se dos processos de otimização do algoritmo evolutivo NSGA-II e a análise de Pareto com a implementação de soluções construtivas simples. Dados iniciais de desempenho térmico da moradia realizados por simulação computacional simplificada mostraram o baixo percentual em horas de conforto, atingindo cerca de 22% para 80% de aceitabilidade de indivíduos, de acordo com a ASHRAE 55 (2017). Com a implementação de estratégias passivas de projeto e de material para otimização de desempenho da edificação por simulações computacionais multiobjetivo, foi possível atingir percentuais de conforto térmico de até 58,88% para uma aceitabilidade de 80% da população. Este trabalho serve como embasamento para futuras pesquisas sobre habitações emergenciais e o uso de embalagens cartonadas como isolante térmico e a busca por melhoria na qualidade de vida dos moradores.

**Palavras-chave:** habitação emergencial, conforto térmico, embalagens Tetra Pak, simulações computacionais, NSGA-II.

## Abstract

*The problem of the housing deficit in the country and the need to build emergency housing of provisional character generate numerous consequences, both for the territory with the lack of urban infrastructure and the residents, related to health and comfort due to inadequate construction conditions. The objective of this work was to find technical design solutions for the structure of a real wooden emergency housing, internally covered with Tetra Pak® packages, to minimize the thermal discomfort of low temperatures in southern Brazil. For this, the optimization processes of the NSGA-II evolutionary algorithm and the Pareto analysis were used to implement simple constructive solutions. The house's initial thermal performance data performed by simplified computational simulation showed a low percentage of hours of comfort, reaching about 22% to 80% acceptability of individuals, according to ASHRAE 55 (2017). With the implementation of passive design and material strategies for building performance optimization, it was possible to achieve thermal comfort percentages of up to 58,88% for the acceptability of 80% of the population. This work serves as a basis for future research on precarious housing and the use of carton packs as thermal insulation, and the search for improvement in residents' quality of life.*

**Keywords:** precarious housing, thermal comfort, Tetra Pak packaging, computational simulations, NSGA-II.

How to cite this article:

SEBEN, T.; LEITZKE, R. K.; MACIEL, T. dos S.; SILVA, T. L. da; CUNHA, E. G. da; RIBEIRO, L. A. Desempenho térmico de habitação emergencial por simulação evolutiva. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 13, p. e022015, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v13i00.8665539>

Submitted 04.05.2021 – Approved 03.12.2021 – Published 28.04.2022

e022015-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 13, p. e022015, 2022, ISSN 1980-6809



## Introdução

Um levantamento realizado pela World Health Organization (WHO, 2018) mostrou que cerca de 1 bilhão de pessoas no mundo vivem em habitações irregulares, com riscos relacionados à infraestrutura, ao sistema sanitário e à contaminação, sofrendo com doenças respiratórias e de saúde mental, devido ao estresse causado pelo desconforto do ambiente. Estes dados despertam mais a atenção quando relacionados à crise sanitária causada pelo novo Coronavírus desde o ano de 2020.

No Brasil, a problemática do déficit habitacional e a falta de moradia adequada estão relacionados, em grande parte, ao histórico processo de desigualdade socioeconômica que acomete muitos brasileiros. A necessidade de uma moradia acaba por impulsionar, muitas vezes, a adaptação da construção e a ocupação irregular do território para suprir uma necessidade imediata, deixando os indivíduos concomitantemente expostos a alguma vulnerabilidade.

Atualmente, a Fundação João Pinheiro (2018) tem realizado um relevante trabalho estatístico sobre o déficit habitacional e a inadequação das moradias no Brasil. O conceito de déficit habitacional está relacionado à necessidade de construção de novas moradias por famílias de baixa renda, e o levantamento destes dados norteiam o poder público para buscar soluções para os problemas sociais e específicos de habitação, detectados em determinados momentos. A condição de possuir uma moradia provisória é uma alternativa forçada diante da dificuldade de algumas famílias em constituir um domicílio próprio. Conforme levantamento realizado em 2019 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020a), estima-se que mais de 5 milhões de domicílios ocupados se encontrem em áreas de aglomerados subnormais, relacionando-os à baixa renda das famílias e às condições inadequadas de habitabilidade.

Dentro deste conceito, incluem-se as moradias que possuem precariedade construtiva e depreciação da sua estrutura. Estas edificações, também denominadas como domicílios rústicos e improvisados, não são construídas em alvenaria ou madeira aparelhada e empregam materiais de reaproveitamento, como a madeira proveniente da construção civil, com um certo limite de vida útil do material e da estrutura, condições estas que determinam a necessidade de reposição (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2018). Neste aspecto, o conceito de moradia em condições inadequadas de habitabilidade deve possuir qualquer uma dentre estas cinco características: a ausência de banheiro de uso exclusivo, paredes externas construídas com materiais não duráveis, adensamento excessivo, ônus excessivo com aluguel e a ausência de documento que comprove a propriedade, ou ao menos uma inadequação nas condições de moradia (IBGE, 2020b).

Desse modo, a relevância do tema possibilita discussões acerca de soluções imediatas, como também alternativas econômicas capazes de minimizar as consequências da vulnerabilidade da moradia, visto que muitas famílias passam anos vivendo em condições insalubres, sem atendimento do poder público e sem condições de possuir uma moradia adequada. Dados da World Health Organization (WHO, 2018) mostram que grande parte da população passa cerca de 70% do tempo dentro de suas casas, e em alguns lugares onde os índices de desemprego são maiores, essa porcentagem de permanência aumenta principalmente entre crianças, pessoas com deficiência e com idosos, o que denota a importância de proporcionar uma habitação adequada, saudável, segura e confortável, mesmo em condições limitadas. Esse indicador conceitua e delimita o objeto deste estudo, a partir da análise de uma habitação emergencial com precariedade construtiva, localizada em um assentamento irregular, no que diz respeito às condições de moradia, relacionadas ao conforto térmico, principalmente com as baixas temperaturas. De modo geral, essas moradias não utilizam de dispositivo

mecânico para controle de temperatura e a má qualidade estrutural gera grande desconforto térmico devido à troca de temperatura que acontece com o meio externo. É necessário, assim, que os moradores encontrem outras formas de adequação às intempéries com técnicas e soluções limitadas e acessíveis como, por exemplo, estratégias de ventilação natural para o resfriamento do ambiente, bem como outras ações individuais como o uso de roupas adequadas, atividades físicas, além do uso do fogo nas regiões mais frias (NICOL, 2019). Ainda de acordo com o autor, as pessoas podem estar preparadas para lidar com condições extremas por um curto período de tempo, como ondas de frio ou de calor, mas essas condições podem se tornar intoleráveis se persistirem por mais tempo.

Foi no intuito de proporcionar uma melhor qualidade de moradia para os indivíduos que vivem em situação de vulnerabilidade em Passo Fundo –RS, que surgiu o Projeto Social Brasil Sem Frestas (BRASIL, 2018). O projeto utiliza as embalagens Tetra Pak® para isolar frestas de paredes e forros em habitações precárias de madeira, visto que se trata de um material de fácil obtenção e simples montagem. As embalagens são selecionadas, higienizadas, cortadas e fixadas formando uma placa de revestimento interno em casas construídas, em sua maioria, com materiais de reaproveitamento, principalmente a madeira, as telhas e esquadrias. Essas habitações têm caráter emergencial por possuírem uma estrutura física vulnerável, expostas aos riscos de colapso e às intempéries ambientais, com durabilidade limitada. Além disso, ainda sofrem com a perspectiva de desocupação imediata, já que geralmente, são construídas em áreas de ocupações irregulares públicas e também privadas.

O Projeto Brasil Sem Frestas tem cunho social e não possui fins lucrativos, atuando há mais de dez anos no município de Passo Fundo – RS. Atualmente, possui ampliação das atividades em vários lugares do país, expandindo a ideia de utilizar internamente as embalagens cartonadas como uma barreira isolante em paredes, abaixo da cobertura, e por vezes no piso. Esta alternativa simples e econômica de reutilização de um material reciclável surgiu no intuito de minimizar o desconforto térmico, principalmente com as baixas temperaturas do inverno da região Sul do Brasil. Contudo, a técnica não se limita apenas ao município, mas tem expandido para outras cidades localizadas nas regiões mais quentes do país, como no Rio de Janeiro, Mato Grosso do Sul e Brasília (BRASIL, 2018).

De acordo com os voluntários do Projeto Brasil Sem Frestas (2020), a resposta dos moradores é de satisfação quanto ao melhoramento das condições térmicas da habitação. Porém, estudos preliminares já elaborados por Sebben, Silva e Cunha (2020) mostraram resultados inexpressivos de conforto térmico, mesmo com a aplicação do revestimento cartonado. Isso se deve ao fato da habitação não possuir materiais e sistema construtivo adequados que permitam conservar o ambiente a uma temperatura estável por mais tempo, minimizando as trocas de temperatura com o meio externo. Vale ressaltar que, conforme os estudos realizados pelos mesmos autores, as simulações computacionais simplificadas, realizadas inicialmente, não permitem a avaliação da falta de estanqueidade do sistema construtivo ocasionado pelas frestas das paredes e cobertura. Não obstante, os resultados das simulações simplificadas demonstraram o baixo desempenho térmico da moradia para o período frio.

Quanto ao desempenho do material reciclável e suas características físicas e termoenergéticas, uma pesquisa realizada por Santos (2019) mostrou que os materiais que compõem as embalagens Tetra Pak possuem características de baixa emissividade, e o seu uso como isolante térmico auxiliou na diminuição da temperatura interna do ambiente quando submetidos à altas temperaturas, relacionado pelo controle de radiação térmica entre superfícies com temperaturas diferenciadas. Ainda neste estudo,

os resultados demonstraram ter um bom desempenho do material quando comparado com outros materiais isolantes térmicos comercialmente utilizados.

Outros estudos e testes laboratoriais desenvolvidos por Jahnke (2006) constataram que as características de baixa emissividade da superfície aluminizada possuem resultados positivos de resistência e isolamento térmico com o uso do material. Neste experimento, foram montados painéis de madeira com uma câmara de ar preenchida com cortes de filetes das embalagens em seu interior, simulando uma parede tipo “sanduíche”, em conjunto com a aplicação de mantas na cobertura com a face aluminizada voltada ao interior da edificação. Os resultados mostraram uma diminuição do superaquecimento dos modelos de ensaio, em ambas as superfícies.

Algumas análises e manipulações de um determinado material, e/ou contexto de moradia também podem ser realizadas utilizando alguns dos métodos de programação e simulações computacionais existentes, como, por exemplo, pela utilização das simulações termoenergéticas. A análise com a otimização multiobjetivo pelo algoritmo NSGA-II é uma ferramenta que permite ampliar a avaliação de um determinado contexto de habitação, aplicando um conjunto de estratégias de projeto e materiais construtivos para serem manipuladas e exploradas, antes mesmo da sua implementação, baseado em uma ordenação de dominância, e que também pode ser utilizado para simular outras variáveis além do conforto térmico, como o impacto ambiental, o consumo de energia, custos de investimento, dentre outros (CARLUCCI *et al.*, 2015; ZHOU *et al.*, 2020). Segundo Carlucci *et al.*, (2015), a ferramenta de otimização não busca encontrar apenas uma solução para o objetivo problema, mas um conjunto de variações de soluções de projeto que proporcionem resultados positivos dentro da análise sistemática do todo.

Assim, o objetivo deste trabalho foi encontrar soluções técnicas de projeto para o envelope de uma habitação emergencial existente, revestida internamente com embalagens Tetra Pak®, a partir de otimização evolutiva multiobjetivo. Este trabalho denota, acima de tudo, a vulnerabilidade e a precariedade habitacional de quem depende deste tipo de moradia por um determinado período. Por isso, o estudo tem caráter experimental e poderá dar subsídios para a continuidade das pesquisas quanto ao desempenho térmico, o uso de materiais alternativos e possibilidades de técnicas de construção e de projeto para moradias de caráter emergencial e provisório.

### **Fundamentação teórica**

A concepção de uma edificação é caracterizada por uma série de tomadas de decisões e pode exercer grande influência no seu desempenho final. Por esse motivo, considerando o grande número de variáveis interdependentes, que a mesma possui, dificilmente a avaliação desse desempenho será concluída por inferência. Com a inserção do uso do computador é possível desenvolver modelos computacionais com capacidade de representação do comportamento de edificações reais, sejam em fase de projeto ou após a sua construção (DIDONÉ; PEREIRA, 2010).

A simulação computacional é usualmente utilizada em pesquisas científicas que visam à investigação do comportamento da envoltória das edificações, seja para o aumento do conforto térmico ou para redução do consumo de energia elétrica. Diferentes ferramentas computacionais foram desenvolvidas nos últimos anos e, segundo Souza (2012), o *EnergyPlus* (EP) é a mais reconhecida e utilizada como instrumento para análise computacional de conforto térmico e eficiência energética. Contudo, apesar de possibilitarem resultados aceitáveis, é possível que estas ferramentas não apresentem

soluções ideais se utilizadas apenas com base em metodologias por indução (MAGNIER, 2008).

Segundo Bre e Fachinotti (2017), esse problema tem sido resolvido por muitos autores por meio da Otimização Baseada em Simulação, que corresponde à combinação de um *software* de simulação acoplado a algum algoritmo de otimização.

Entre as estratégias utilizadas para avaliação do desempenho térmico e energético dos edifícios, os algoritmos evolutivos multiobjetivo são amplamente utilizados. Visando a melhor representação das análises, esses algoritmos surgiram com o foco de maximização ou minimização de duas ou mais funções/objetivo que sejam conflitantes para um mesmo problema (COELLO; LAMONT; VAN VELDHUIZEN, 2007). Estudos que utilizam esse tipo de estratégia são recentes e, atualmente, a otimização com o algoritmo NSGA-II (DEB *et al.*, 2002) é a mais recorrente devido à sua aptidão na otimização do desempenho de edificações (EVINS, 2013; BRE; FACHINOTTI, 2017).

Segundo Chen e Yang (2017) os parâmetros de distribuição, configuração da envoltória, infiltração, estanqueidade e geometria estão entre as principais considerações passivas para caracterização de sustentabilidade de um edifício. Trabalhos como os de Yu *et al.*, (2015), Pal *et al.*, (2017), Gou *et al.*, (2018) e Salata *et al.*, (2020), discutem o aprimoramento do desempenho de edificações residenciais pela aplicação de técnicas computacionais de otimização multiobjetivo.

De acordo com Nguyen, Reiter e Rigo (2014), em um contexto internacional, a otimização combinada entre um *software* de simulação e um motor de otimização foi publicada pela primeira vez no final dos anos 2000. Na área científica, esse cenário ganhou força a partir do ano de 2005, em que começaram a surgir inúmeras frentes de otimização. No contexto brasileiro essas publicações são ainda mais recentes.

Figueiredo, Kampf e Vicente (2016) utilizaram um algoritmo evolutivo multiobjetivo híbrido (CMA-ES, *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy* e HDE, *Hybrid Differential Evolution*) para otimização de um edifício residencial com alto nível de isolamento térmico. Pelas simulações termoenergéticas com o *software* EP, foi possível investigar a caracterização de parâmetros capazes de possibilitar a redução de climatização artificial dentro da edificação.

Santana (2016) realizou a otimização multiobjetivo para melhoria do desempenho energético de edificações residenciais. Para isso, variou parâmetros relacionados à geometria da edificação e utilizou algoritmos genéticos como motor de otimização. A integração de simulações termoenergéticas foi realizada com o EP associado ao *Archsim* e as ferramentas de modelagem utilizadas foram *Rhino+Grasshopper*. Do mesmo modo, com a utilização das mesmas ferramentas e algoritmos evolucionários, Fonseca *et al.*, (2017) associaram o conceito de otimização multiobjetivo à parametrização com a integração de um *software* de simulação. O objetivo dos autores era a otimização das dimensões dos ambientes de permanência prolongada de uma edificação residencial.

Dalbem (2018) analisou a aplicação do conceito *standard Passive House* em uma habitação de interesse social no Sul do Brasil. O procedimento foi realizado através de uma abordagem de otimização multiobjetivo, com o EP associado ao mesmo algoritmo utilizado no estudo de Figueiredo *et al.*, (2016).

Recentemente, mediante a utilização do algoritmo NSGA-II, Linczuk e Bastos (2020) apresentaram o potencial de uma otimização multiobjetivo para melhoria das condições de conforto térmico e redução do consumo de energia elétrica para edificações residenciais. O método de avaliação por evolução possibilita identificar estratégias com rápida convergência dos dados, utilizando por vezes o conceito de elitismo

(direcionamento dos resultados para uma determinada região-ótima) para que a preferência seja dada para os indivíduos mais aptos, principalmente quando se busca avaliar parâmetros que podem se contrapor (SOUSA, 2012).

Ao analisar as estratégias de otimização presentes na literatura, observa-se um grande número de trabalhos com aplicação em edificações residenciais. De acordo com Evins (2013), a limitação de análises em modelos residenciais proporciona que sejam realizadas investigações em um maior número de parâmetros. No entanto, todos estes trabalhos referem-se à otimização de edificações que apresentam condições adequadas de moradia, com uma gama maior de técnicas de simulações que integram diferentes variáveis para além das estratégias passivas de conforto.

A complexidade do objeto deste estudo faz com que a busca por estratégias projetuais e o emprego de componentes simples e aplicáveis sejam os parâmetros determinantes para as simulações e para a compreensão do comportamento térmico da moradia. Algumas pesquisas relacionadas às habitações provisórias em países da América Latina, por exemplo, analisam dentro dos aspectos sociais e culturais com programas de atendimento à moradia adequada, por meio de políticas públicas de transformação do espaço urbano, que vão além do âmbito da construção, mas distante de alternativas construtivas que possibilitem alguma melhoria de forma imediata (ONU-HABITAT, 2015; MAKACHIA, 2011). O trabalho desenvolvido por Amado (2018) por exemplo, apresentou estratégias de transformação de áreas urbanas por meio da regeneração do espaço ocupado, mas também desenvolveu um modelo de construção de moradia adequada, incluindo a integração e a capacitação da própria comunidade no processo de construção de suas casas com o uso de materiais locais, transformando áreas informais em propriedades legalmente reconhecidas. Com base nessas abordagens, o trabalho a seguir possui caráter experimental e serve como estudo inicial sobre a análise do desempenho térmico de moradias emergenciais, com otimização evolutiva multiobjetivo e análise com o método Frente de Pareto pelo algoritmo Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II) (DEB *et al.*, 2002). Esta estratégia de simulação permite analisar e classificar um conjunto de parâmetros do espectro, com base em critérios semelhantes aos da Biologia no que se refere à evolução das espécies. Desta forma, as estratégias que apresentam as melhores soluções são selecionadas dentro do conjunto de avaliação em detrimento das soluções menos aptas, cujas características são descartadas em dado momento da execução. A revisão bibliográfica aponta para um processo de avaliação no âmbito do conforto térmico através das técnicas de otimização na simulação de edifícios regulares. Contudo, as edificações de caráter provisório não aparecem como objeto de estudo destas produções, particularmente nas zonas bioclimáticas frias do território nacional.

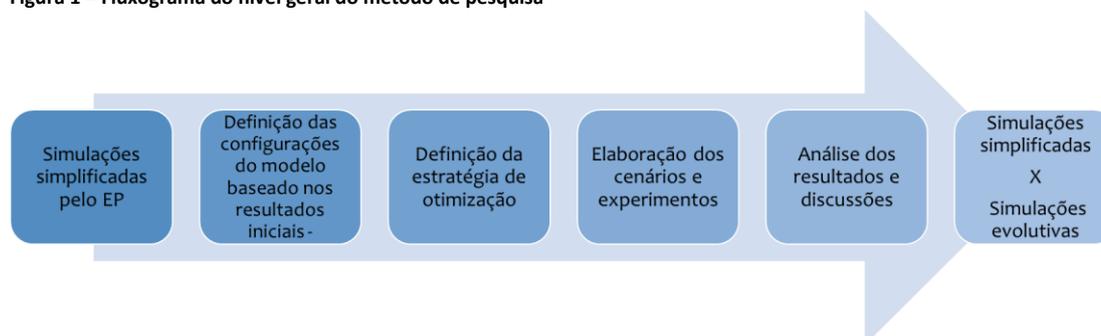
## **Método**

O presente trabalho foi desenvolvido em cinco etapas, considerando o uso do método experimental como estratégia de avaliação dos cenários (Figura 1). Primeiramente, realizou-se as simulações computacionais simplificadas pelo *software Energy Plus*, consideradas simulações preliminares para a habitação objeto de estudo. Nessa análise, identificou-se que o maior problema relacionado ao desconforto térmico da edificação ocorre em decorrência do frio, de acordo com os parâmetros estabelecidos pela normativa ASHRAE (2017).

Em seguida, na segunda etapa, foi elaborada a volumetria da edificação na interface gráfica *Sketchup 2017* e configurações e simulações do modelo no *Energy Plus v.9.0.1*. Para a terceira etapa foram recortadas as tecnologias e estratégias de avaliação/otimização da moradia, considerando o uso de algoritmos evolutivos

combinados com a simulação termoenergética de edifícios a partir da literatura estudada. A quarta etapa foi caracterizada pela definição do experimento, considerando a identificação das variáveis em análise pelo estudo, limites de variação destes dados e estratégia de seleção dos melhores cenários. Por fim, na quinta e última etapa, foram apresentados e discutidos os resultados identificados no processo de avaliação evolutiva. A Figura 1 apresenta um fluxo do nível geral da pesquisa.

Figura 1 – Fluxograma do nível geral do método de pesquisa



Fonte: os autores.

### *Caracterização do clima e do objeto de estudo*

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2010), o clima na região Sul do Brasil é considerado como Clima Temperado do tipo Subtropical, com temperatura média anual de 17,7 °C, com chuvas fartas e bem distribuídas e inverno rigoroso. As características bioclimáticas da região, de acordo com a Norma de Desempenho Térmico de Edificações Parte:3 NBR 15220/3 (ABNT, 2005b) considera Passo Fundo pertencente a Zona Bioclimática 2, estabelecendo algumas diretrizes construtivas como estratégias de condicionamento térmico passivo para as edificações que estejam em fase de projeto. O arquivo climático utilizado nas simulações foi da série das normais climatológicas - período de 1981 a 2010 - disponibilizados pelo INMET (2010).

Nesse contexto climático, desenvolveu-se a pesquisa e as simulações computacionais do objeto de estudo. A habitação está situada em um assentamento urbano irregular no município de Passo Fundo –RS, circundado por uma área de Proteção de Recursos Hídricos. Neste assentamento denominado ocupação Bela Vista, estão instaladas cerca de 150 famílias, sob condições de vulnerabilidade e precariedade habitacional, desprovidas de infraestrutura básica como o abastecimento de água, tratamento e despejo de esgoto e instalações elétricas regulares.

Conforme levantamento dos dados no local, a moradia possui uma área de aproximadamente 28 m<sup>2</sup>, com dimensões de 5,30x5,30 m, pé direito de 2,50 m (altura média) e com 0,30 m de afastamento entre o piso de madeira interno e o solo natural. A Figura 2 mostra a vista da edificação pela sua fachada com a janela principal voltada à orientação Norte.

Os materiais construtivos empregados são a madeira de reaproveitamento para paredes externas, possuindo uma única divisão interna que delimita o banheiro, com espessura de uma polegada (0,0254 m). Na cobertura são utilizadas telhas metálicas e as esquadrias são de ferro e vidro simples 3 mm.

A Figura 3 mostra o interior da edificação com a aplicação do revestimento cartonado sobre painéis pré-montados pelo Projeto BSF, aplicados nas paredes e abaixo da telha. Ainda se percebe a estrutura do piso executado também com madeira não aparelhada.

Figura 2 – Foto externa da habitação – Fachada Norte



Fonte: Sebben, Silva e Cunha (2020).

A técnica dos painéis desenvolvido pelo Projeto consiste em produzir chapas com ripas de madeira de 0,015 m de espessura, com largura de 0,30 m e altura de 0,90 m, onde são costuradas as embalagens cartonadas já higienizadas e cortadas, visando facilitar as instalações tanto em paredes como no forro.

Figura 3 – Foto interna da habitação



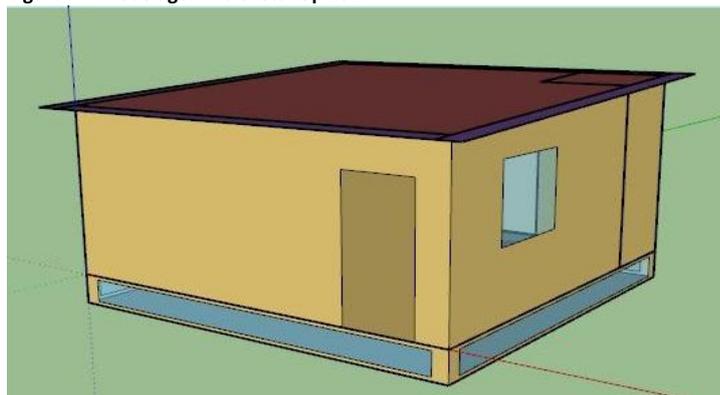
Fonte: Sebben, Silva e Cunha (2020)

É possível notar também as frestas existentes no encontro das tábuas do piso, a precariedade das instalações elétricas aparentes e a cortina que delimita a área íntima, já que a habitação possui uma única divisória interna delimitando o banheiro.

#### *Caracterização do modelo da edificação para simulação computacional*

As configurações do modelo foram realizadas no programa *Energy Plus v.9.0.1*, após a modelagem do volume no programa *SketchUp 2017*, de acordo com as dimensões reais, aberturas e controle de ventilação e orientação solar, como ilustra a Figura 4. As esquadrias foram determinadas com um *setpoint* de abertura e controle da ventilação a uma temperatura interna de 25 °C. Na base da modelagem, foram simuladas aberturas para ventilação constante, já que a casa está a 0,30 m de afastamento do solo e não possui um sólido alicerce e isolamento.

Figura 4 – Modelagem no SketchUp 2017



Fonte: Sebben, Silva e Cunha (2020)

O modelo foi configurado em uma única zona térmica, considerado como sala e cozinha, com ganho interno de ocupação para um número de quatro moradores. Para os ganhos de cargas internas nas simulações, foram considerados dados de densidade de potência de iluminação de 6 W/m<sup>2</sup> e ganho interno de equipamentos elétricos com densidade de potência de 1,5 W/m<sup>2</sup>, conforme estabelece o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) para ambientes de permanência prolongada naturalmente ventilados elaborado pelo Instituto Nacional De Metrologia, Normalização E Qualidade Industrial (INMETRO, 2012). O RTQ-R (INMETRO, 2012) também foi a referência para a configuração das agendas de uso e utilização de sistema de iluminação e equipamentos.

Os dados referentes aos materiais construtivos foram extraídos da NBR 15220 - Parte 2 (ABNT, 2005a), de acordo com o Tabela 1.

Tabela 1 – Características das principais propriedades da envoltória configuradas no Energy Plus v.9.0.1

Elemento	Composição	$\lambda$ (W/m.K)	$c$ (kJ/kg.K)	$\alpha$	R (m <sup>2</sup> .K/W)	
Paredes	Madeira Pinus (1 pol)	0,23	1,340	0,5	0,29 (Para camada de ar de 0,02 m não ventilada e com baixa emissividade)	
	Tetra Pak	Alumínio	200			0,896
		Papelão	0,20			1,885
		Polietileno	0,38			1,900
Piso	Madeira Pinus (1 pol)	0,23	1,340	0,5	0,29 (Para camada de ar de 0,02 m não ventilada e com baixa emissividade)	
	Tetra Pak	Alumínio	0,38			0,896
		Papelão	0,20			1,885
		Polietileno	0,38			1,900
Cobertura	Telha metálica	0,95	0,840	0,7	0,29 (Para camada de ar de 0,02 m não ventilada e com baixa emissividade)	
	Tetra Pak	Alumínio	0,38			0,896
		Papelão	0,20			1,885
		Polietileno	0,38			1,900

Nota:  $\lambda$ = Condutividade térmica;  $c$ = Calor específico;  $\alpha$ = Absortância solar; R= Resistência térmica. Fonte: Fonte: Sebben, Silva e Cunha (2020).

Nota-se que os valores referentes à resistência térmica da cobertura são iguais aos valores aplicados para as paredes, visto que a instalação das embalagens cartonadas abaixo da cobertura possui o mesmo espaçamento da camada de ar não ventilada, de acordo com a modulação das placas pré-montadas com ripas de madeira e as embalagens Tetra Pak®, já mencionadas anteriormente.

### Caracterização do modelo para simulação computacional

#### Definição do algoritmo evolutivo

O algoritmo utilizado como meio de investigação deste estudo de caso foi o NSGA-II (DEB *et al.*, 2002), que se utiliza do conceito de Dominância para avaliar cada indivíduo da sua população, de modo que, sendo  $p$  e  $q$  dois indivíduos da população  $P$ ,  $p$  domina

q se p for melhor do que q em pelo menos um dos seus objetivos, sendo também o restante dos objetivos de p não piores do que os de q. Essa estratégia permite que o algoritmo faça uma classificação dos indivíduos mais aptos e determine a distância de cada um deles do ponto ótimo (os autores sugerem que o centro da curva de Pareto seja utilizado como ponto ótimo). Assim, quanto maior o número de indivíduos dominados por p e menor a sua distância para o ponto ótimo, melhor será a sua classificação. Como mencionado, a implementação do NSGA-II sugere a utilização da curva de Pareto-ótimo como elemento de estabelecimento da região com os melhores resultados, tanto na maximização quanto na minimização das funções-objetivo.

### Definição das tecnologias utilizadas para a análise

Para a simulação do modelo edificado, utilizou-se o software *EnergyPlus* v. 9.0.1, integrado à plataforma BESOS (FAURE *et al.*, 2019) para linguagem de programação *Python*. Esta plataforma foi desenvolvida em 2019 pelo laboratório *Energy Incities* da Universidade de Victoria (Canadá), possibilitando a integração de elementos evolutivos às simulações pelo *EnergyPlus*. Desta forma, foram consideradas para este estudo o uso das bibliotecas de programação *platypus* (para análise evolutiva com o NSGA-II), *matplotlib* (para a representação gráfica dos resultados), *plotly* (para análise de padrão das soluções obtidas), *eppy* (para variação dos elementos de configuração do *EnergyPlus*) e o ambiente *Jupyter Notebook* (interface para programação e visualização das saídas).

### Caracterização do experimento a partir da avaliação evolutiva

Considerando a variação do Percentual de Abertura na Fachada (PAF) e a espessura da câmara de ar na composição da cobertura, foram definidos seis experimentos, conforme Tabela 2. Para os modelos A, B e C, foram avaliados seus respectivos desempenhos considerando a aplicação de lâmina de isopor de 0,01 m, dentro de uma câmara de ar não ventilada com espessura de 0,02 m, tanto para a cobertura como nas paredes externas. Para a variação de 1, 2 e 3 vezes, respectivamente para o PAF, aplicou-se a estratégia de aquecimento solar passivo através da ampliação de aberturas transparentes voltadas à fachada com maior incidência de radiação solar (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Tabela 2 - Caracterização dos experimentos

Modelo	Percentual de Abertura das Janelas (PAF)	Espessura da câmara de ar na composição da cobertura (m)
A	Original	0,02
B	2x Original	
C	3x Original	
D	Original	0,05
E	2x Original	
F	3x Original	

Fonte: os autores.

Para os modelos D, E e F houve o aumento no PAF para 0,05 m de câmara de ar não ventilada na composição da cobertura, aliado as mesmas soluções anteriores. Após a simulação inicial dos seis modelos, cada um dos experimentos acima apresentados sofreu alguma variação quanto às características construtivas adequadas ao contexto social, realizados por meio das análises evolutivas. Considerando a possibilidade de variação de tons claros até tons mais escuros foram analisadas as absortâncias solares das paredes externas e da cobertura, e também a espessura da placa de isopor como isolante térmico das paredes externas e cobertura, divididas em dois intervalos limites, conforme apresenta a Tabela 3.

Os testes realizados consideraram uma população inicial de 500 indivíduos, com 100 gerações. Desta forma, foram estabelecidas fronteiras de Pareto para cada avaliação realizada através do modelo evolutivo do NSGA-II.

**Tabela 3 - Variáveis de otimização**

Variável		Limites
Absortância solar das paredes externas		0,25 – 0,90
Absortância solar da cobertura		0,25 – 0,90
Espessura do isolamento térmico – paredes externas e cobertura (m)	A, B, C	0 – 0,02
Espessura do isolamento térmico – paredes externas e cobertura (m)	D, E, F	0 – 0,05

Fonte: os autores.

### Análise de conforto térmico

A referência de análise desta pesquisa foi determinada de acordo com os parâmetros normativos descritos na ASHRAE (2017), critérios estes que podem ser aplicados em ambientes naturalmente ventilados.

Estes valores são calculados a partir das equações abaixo, somado às médias das temperaturas externas mensais do local, que podem ser extraídos do arquivo climático de cada localidade. O resultado das temperaturas são referência para identificar o percentual de 80% dos indivíduos que consideram como zona de conforto térmico, conforme descrito nas Equações abaixo. A Eq.1 determina a média limite para condições de calor e a Eq. 2 para condições de frio (ASHRAE, 2017):

$$0,31 \times \text{temperatura média externa} + 21,3 \quad \text{Eq. 1}$$

$$0,31 \times \text{temperatura média externa} + 14,3 \quad \text{Eq. 2}$$

O mesmo ocorre para avaliar um percentual de aceitabilidade para 90% dos indivíduos, porém com alteração nas equações, conforme as Equações 03 (média limite para o calor) e 04 (média limite para o frio), de acordo com a ASHRAE (2017):

$$0,31 \times \text{temperatura média externa} + 20,3 \quad \text{Eq. 3}$$

$$0,31 \times \text{temperatura média externa} + 15,3 \quad \text{Eq. 4}$$

Desse modo, é possível relacionar os valores das temperaturas neutras apontadas pela normativa como limite para uma zona de conforto e os resultados das temperaturas operativas obtidas nas simulações computacionais, e comparar o percentual de horas em conforto e desconforto térmico no ano, baseada na ausência de relatórios de saída sazonais (avaliação do desconforto em períodos de calor ou frio), bem como na premissa de maximização do conforto térmico da edificação nos dois eixos de avaliação.

### Resultados e discussões

#### *Avaliação das condições iniciais de conforto térmico através da simulação preliminar*

Visando obter um parâmetro comparativo e identificar a influência das embalagens Tetra Pak® no desempenho da edificação, foi realizada uma simulação preliminar pelo software *EnergyPlus*, sem a aplicação do revestimento cartonado. Os resultados iniciais indicaram que em apenas 16% das horas do ano os usuários permaneceriam em situação de conforto e, além disso, evidenciou que o problema do desconforto para o frio seria significativo, próximo a 61% das horas do ano, equivalente a 221 dias em desconforto térmico, havendo também 23% das horas do ano em desconforto por calor.

Em seguida, realizou-se a simulação do caso real pelo mesmo software (com a aplicação das embalagens no ambiente), identificando que os moradores passam cerca de 54% das horas do ano – algo em torno de 200 dias - sob desconforto térmico pelo frio, 24% das

horas do ano em desconforto por calor e pouco menos de 22% dos dias do ano em conforto térmico. Logo, estes resultados mostram que, mesmo com a utilização das embalagens Tetra Pak® como barreira isolante, ainda assim o material não minimiza o problema do resfriamento da edificação. Ainda, os resultados da simulação do caso real indicam um aumento de 1% no desconforto por calor em relação aos resultados iniciais. Os dados acima encontrados têm como referência a normativa internacional ASHRAE 2017), que considera um ambiente termicamente confortável para um percentual de 80% dos indivíduos. Nestes resultados, estão sendo considerados uma tolerância de 3,5 °C acima e abaixo da temperatura neutra de cada período.

Ao analisar detalhadamente a problemática do desconforto para o frio no período mais quente do ano, por exemplo, pode-se verificar que a grande variabilidade das temperaturas que geram essas oscilações se dá no período noturno. A fase mais crítica está concentrada no período do inverno, quando as temperaturas ficam abaixo de 10°C em grande parte dos dias, e apenas nos horários da tarde, quando há maior incidência da radiação solar, puderam proporcionar horas em conforto no ambiente interno pelo aquecimento das superfícies.

Nas simulações multiobjetivas, considerando aplicação da folha de isopor de 1 cm, os modelos A, B e C, apresentaram uma variação em um sentido de diminuição do percentual de conforto térmico, à medida que houve o aumento do percentual de abertura de janelas, indicando que o baixo desempenho está relacionado principalmente com a precariedade da estrutura e seus componentes construtivos de baixa inércia térmica, que favorecem a perda de calor para o meio externo.

Em contrapartida, obtiveram-se melhores resultados para os modelos D, E e F (com a aplicação da folha de isopor de 1 cm), e o aumento no PAF aliado a soluções visando aumentar a resistência térmica da superfície com maior incidência de radiação solar, considerando 0,05 m de câmara de ar não ventilada na composição da cobertura. A estratégia no uso da energia solar como aquecimento passivo pelas vedações verticais e o aumento da resistência térmica da estrutura da cobertura representaram um aumento no percentual do nível de conforto térmico conforme a Tabela 4, apresentando os dados conforme o que estabelece a ASHRAE 55/2017 para 80 e 90% de aceitabilidade.

Tabela 4 - Condições de conforto dos modelos iniciais

Modelos	Conforto com 80% de aceitabilidade (%)	Conforto com 90% de aceitabilidade (%)
A - PAF Original e 0,02 m de espessura da câmara de ar	41,76	29,5
B - PAF 2x e 0,02 m de espessura da câmara de ar	41,55	29,11
C - PAF 3x e 0,02 m de espessura da câmara de ar	41,36	28,98
D - PAF Original e 0,05 m de espessura da câmara de ar	41,01	28,71
E - PAF 2x e 0,05 m de espessura da câmara de ar	42,7	30,19
F - PAF 3x e 0,05 m de espessura da câmara de ar	44,5	31,86

Fonte: os autores.

A partir das informações apresentadas na Tabela 4, observa-se a solução F como a melhor condição de conforto térmico, que considerou um maior percentual de abertura envidraçada na fachada Norte, ao mesmo tempo em que se aumentou a câmara de ar não ventilada da cobertura para que a edificação tenha uma maior capacidade de armazenar o calor retido, compensando as trocas térmicas e o desconforto térmico para o frio.

Quando avaliadas as soluções iniciais D, E e F, diferenças de 3,49% para 80% de aceitabilidade e de 3,15% para 90% de aceitabilidade foram encontradas entre as melhores e piores condições de conforto térmico comparado com os modelos iniciais A, B e C. Percebe-se, portanto, que as estratégias propostas inicialmente para os modelos

não representaram uma melhora significativa no percentual de conforto dos usuários, dada a vulnerabilidade da edificação, mesmo considerando as embalagens cartonadas como isolante interno.

### Resultado das simulações evolutivas

#### Modelo A

Iniciando pelo modelo com as características mais próximas ao contexto real, a avaliação evolutiva do modelo A apresentou as características do indivíduo ótimo próximas a 50% de conforto térmico para 80% dos indivíduos (Tabela 5), em detrimento do aumento da lâmina de isopor dentro da câmara de ar (0,0196 m), considerando os valores de absorvância da parede de 0,26 (para paredes claras) e absorvância da cobertura de 0,40 (para tonalidades de intensidade mediana), demonstrado, pelas simulações evolutivas, que a combinação de cores dos revestimentos externos apresentou-se como uma composição construtiva adequada junto às demais variáveis testadas.

Tabela 5 – Resultados da Simulação Evolutiva do Modelo A em relação ao Modelo A Inicial

	Conforto com 80% de aceitabilidade (%)	Conforto com 90% de aceitabilidade (%)
Modelo Inicial	41,76%	29,50%
Simulação Evolutiva	49,29%	36,11%

Fonte: os autores.

Estes resultados representam uma melhora de 7,53% para 80% e 6,61% para 90% de aceitabilidade, quando comparados com o modelo A inicial, com a estrutura composta com isopor de 0,01 m.

#### Modelo B

Para o modelo B, duplicou-se o tamanho da abertura transparente do modelo B otimizado, o que representou uma elevação nos percentuais de conforto, comparando-os com o modelo B inicial. Na Tabela 6 é possível observar o acréscimo de 7,41% do percentual de conforto térmico para 80% de aceitabilidade, e 6,44% para 90% de aceitabilidade, considerando o isopor próximo a 0,02 m de espessura. A absorvância da parede ficou de 0,27, similares ao modelo A e cobertura com 0,25 de absorvância - índices relativos às superfícies de cores claras em conjunto com às demais variáveis.

Tabela 6 – Resultados da Simulação Evolutiva do Modelo B em relação ao Modelo B Inicial

	Conforto com 80% de aceitabilidade (%)	Conforto com 90% de aceitabilidade (%)
Modelo Inicial	41,55%	29,11%
Simulação Evolutiva	48,96%	35,55%

Fonte: os autores.

#### Modelo C

No modelo C ampliou-se em três vezes o tamanho da abertura transparente, mantendo a mesma espessura do isopor dos casos anteriores (Tabela 7). Nessa simulação, houve um acréscimo no percentual de conforto térmico comparado com o modelo C inicial, em concomitância com o aumento da absorvância da parede, passando de 0,27 (modelo B inicial) para 0,32 (modelo B otimizado). A absorvância da cobertura foi de 0,37.

Tabela 7 – Resultados da Simulação Evolutiva do Modelo C em relação ao Modelo C Inicial

	Conforto com 80% de aceitabilidade (%)	Conforto com 90% de aceitabilidade (%)
Modelo Inicial	41,36%	29,98%
Simulação Evolutiva	48,35%	34,97%

Fonte: os autores.

Os percentuais de conforto térmico de 48,35% para 80% de aceitabilidade e 34,97% para 90% de aceitabilidade, representam uma diferença de 6,99% para 80% de aceitabilidade e 5,99% para 90% de aceitabilidade, se comparados com o modelo inicial C. Isso se deve ao aumento da dimensão das aberturas e ao aumento da resistência térmica das paredes pela aplicação de isopor de 0,02 m, face à maior incidência de calor nestas superfícies, proporcionando um maior isolamento da vedação.

### Modelo D

No modelo D, a simulação multiobjetivo considera o tamanho original da janela, porém com o aumento da espessura do isopor na câmara de ar não ventilada, atingindo a espessura de 0,0343 m. Nessa configuração, a absorvância da parede externa passou para 0,61 e da cobertura para 0,55, devido à maior área com fechamentos opacos, além da adição da espessura do isopor. Os resultados percentuais do Modelo D mostram que houve um aumento no nível de conforto térmico de 16,85% para 80% de aceitabilidade e 14,23% para 90% de aceitabilidade, se comparados com o modelo inicial D, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da Simulação Evolutiva do Modelo D em relação ao Modelo Inicial

	Conforto com 80% de aceitabilidade (%)	Conforto com 90% de aceitabilidade (%)
Modelo Inicial	41,01%	28,71%
Simulação Evolutiva	57,86%	42,94%

Fonte: os autores.

### Modelo E

Para o modelo E, a simulação considerou a ampliação da abertura de janela em duas vezes o tamanho original, acrescido do aumento da espessura do isopor a 0,0491 m. Neste caso, a absorvância da parede baixou para 0,33 em relação a 0,61 do modelo D. Ainda assim, os níveis de conforto térmico foram maiores, atingindo 14,38% no percentual para 80% e 12,24% para 90% de aceitabilidade, se comparado ao modelo inicial E, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados da Simulação Evolutiva do Modelo E em relação ao Modelo E Inicial

	Conforto com 80% de aceitabilidade (%)	Conforto com 90% de aceitabilidade (%)
Modelo Inicial	42,70%	30,19%
Simulação Evolutiva	57,08%	42,43%

Fonte: os autores.

### Modelo F

O modelo F representa os melhores índices de conforto térmico atingidos pela análise multiobjetivo, que estabelece uma área de abertura transparente três vezes maior que o tamanho original, em paralelo ao aumento da resistência térmica de paredes e cobertura pelo aumento da espessura de isopor.

Conforme os dados do Tabela 10, os resultados obtidos mostram percentuais de conforto térmico de 58,91%, 58,85% e 58,88% para 80% de aceitabilidade e 43,16%, 43,33% e 43,17% para 90% de aceitabilidade, o que representa uma melhora de 14,45% para 80% e 11,47% para 90%, quando comparado ao modelo inicial F.

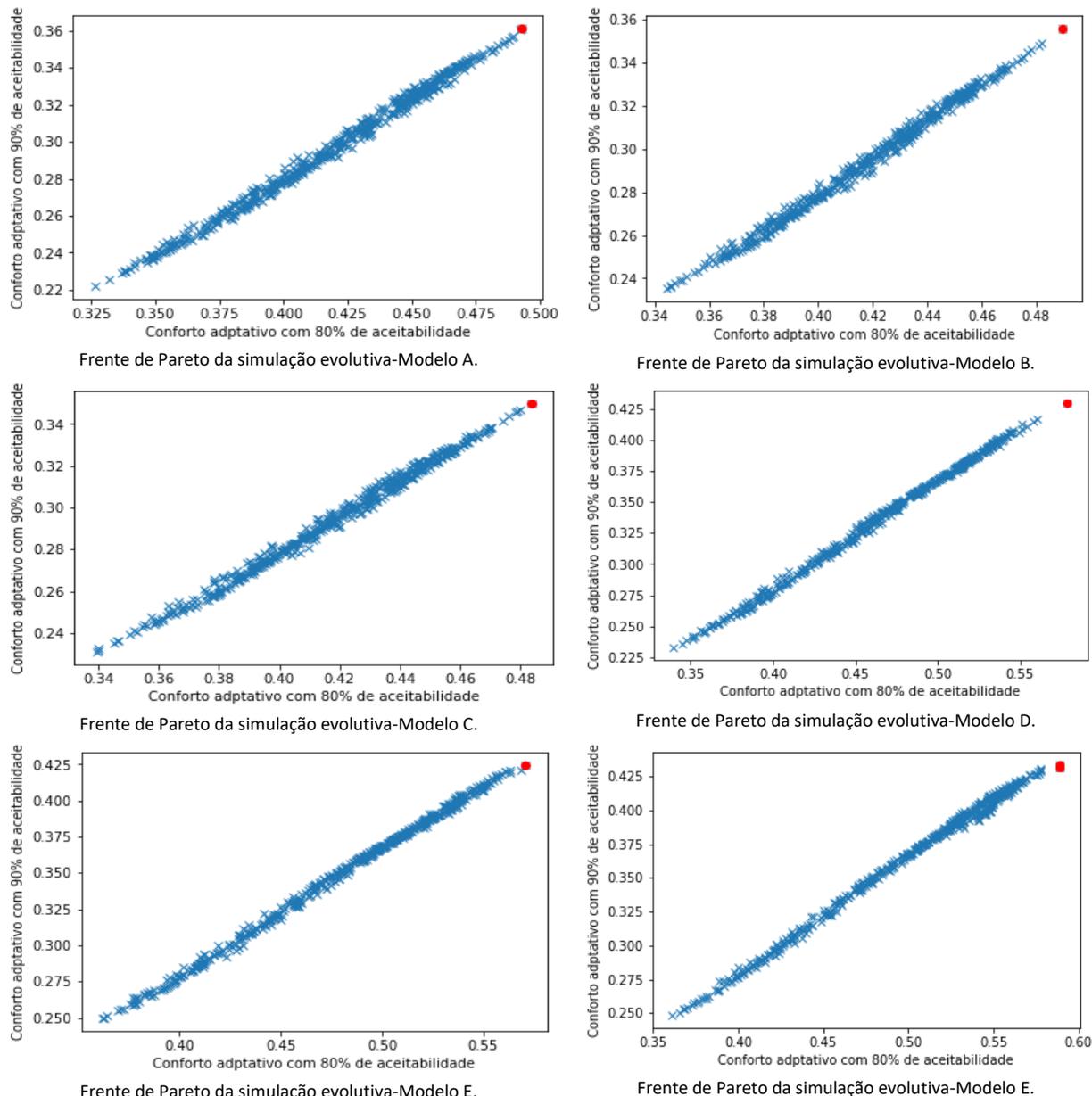
Na Figura 5, os pontos em vermelho mostram a frente ótima de Pareto identificadas pela avaliação evolutiva, com o modelo F atingindo as melhores condições de projeto para o modelo simulado.

Tabela 10 – Resultados da Simulação Evolutiva do Modelo F em relação ao Modelo F Inicial

	Conforto com 80% de aceitabilidade (%)	Conforto com 90% de aceitabilidade (%)	Espessura do isolamento (m)	$\alpha$ Parede externa	$\alpha$ Cobertura
Modelo Inicial	44,50%	31,86%	-	0,5	0,7
Simulação Evolutiva	58,91%	43,16%	0,0467	0,30	0,29
	58,85%	43,33%	0,0469	0,36	0,27
	58,88%	43,17%	0,0450	0,31	0,25

Fonte: os autores.

Figura 5 – Distribuição multiobjetivo considerando percentuais de 80% a 90% de aceitabilidade, de acordo com a ASHRAE 55/2017



Fonte: os autores.

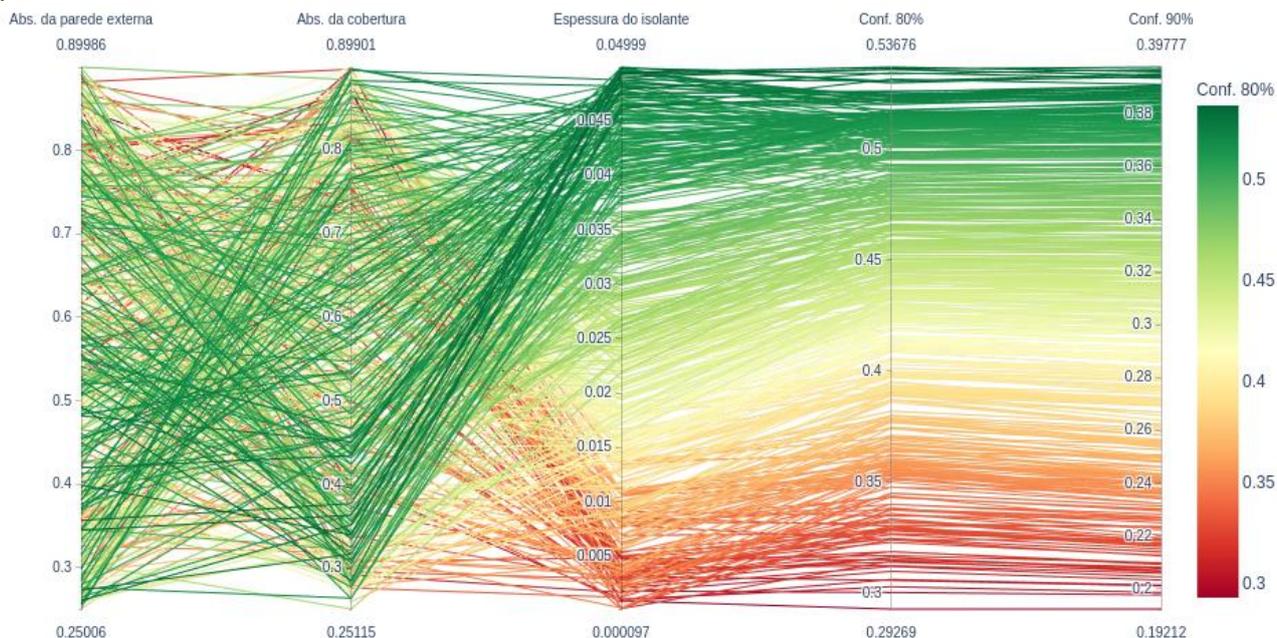
Na Figura 5, o ponto em vermelho (Frente de Pareto) indica o aumento gradativo dos melhores resultados de acordo com as soluções implementadas nos modelos iniciais, de modo que a condição da análise evolutiva proposta focou na maximização das funções-objetivo, comparando os resultados de desempenho térmico entre si. A distribuição multiobjetivo realizada neste trabalho considerou os percentuais de conforto para 80% e 90% de aceitabilidade da ASHRAE 55/2017 como funções-objetivo nos eixos de avaliação.

As soluções apresentadas acima mostram um cenário de melhora no percentual de conforto térmico da edificação, sobretudo nos modelos D, E e F quando passam a considerar o aumento da espessura do material isolante (isopor), concomitantemente à ampliação da área de aberturas transparentes pelas janelas voltadas à fachada Norte. Essa estratégia busca aproveitar o ganho de calor pela radiação solar, ao mesmo tempo que promove o aumento da capacidade térmica da estrutura em manter o ambiente aquecido por mais tempo, aliado ao uso de material cartonado como isolante térmico, diminuindo a troca com o meio externo e o desconforto com as baixas temperaturas como consequência. Destaca-se que as propostas de isolamento e ganho térmico por radiação solar também podem contribuir com o desconforto para o calor, visto a ausência de sombreamento e de aberturas adequadas que permitam formar correntes de ventilação cruzada para o resfriamento da edificação, indicando um potencial cenário de desconforto térmico nos períodos quentes.

### Caracterização da variação entre os elementos testados

Na Figura 6, o gráfico de malhas mostra o comportamento das variáveis evolutivas para o modelo F pelo seu melhor desempenho atingido.

Figura 6 – Gráfico de coordenadas paralelas das variáveis da otimização para o percentual de horas em conforto com 80% e 90% de aceitabilidade para o modelo F



melhores soluções foram aquelas com a maior espessura do isolante, enquanto as piores soluções apresentaram os menores valores neste mesmo elemento. Desta forma, entende-se que o nível de isolamento dos fechamentos opacos é a principal característica para melhora nos indicadores de conforto dos modelos de habitações precárias revestidas em Tetrapak®, de acordo com o zoneamento bioclimático da NBR 15220/3 (ABNT, 2005b) para Passo Fundo –RS, localizada na Zona Bioclimática 2.

### **Considerações finais**

De acordo com a precariedade construtiva da habitação que utiliza as embalagens cartonadas como medida paliativa para isolamento térmico, o trabalho encontrou algumas estratégias de projeto com o uso de materiais simples e técnicas aplicáveis a um novo modelo de projeto baseado em uma edificação existente, no intuito de melhorar os níveis de conforto térmico para uma moradia emergencial de caráter provisório. Através das simulações computacionais simplificadas no EP para o caso real, verificou-se que em cerca de 22% dos dias do ano é possível estar em conforto térmico, considerando um percentual de aceitabilidade de 80% dos indivíduos. Sendo assim, buscou-se, pela otimização dos algoritmos evolutivos, empregar estratégias passivas de aquecimento, visto que o maior problema vivido pelos moradores do local é o desconforto por frio.

Dos resultados iniciais, as seleções dos valores ótimos pela solução de Pareto atingiram cerca de 49% de conforto térmico para 80% de aceitabilidade, quando utilizado isopor de 0,02 m em paredes e cobertura, ampliando a abertura das janelas em até três vezes o tamanho original. Quando aplicada uma camada de quase 0,05 m de isopor para as mesmas superfícies, os índices de conforto térmico chegaram a 58,88% para 80% de aceitabilidade, ou seja, uma melhora de mais de 36%, se comparado com a condição da moradia sem qualquer intervenção.

Dada a complexidade do caso e à limitação de técnicas e materiais acessíveis, a utilização de algoritmos por meio de simulação evolutiva demonstra ser uma ferramenta capaz de avaliar algumas estratégias de projeto passíveis de implementação de forma clara e objetiva, a fim de encontrar as melhores soluções para o objeto de estudo. Neste caso, as análises apresentaram melhorias dos resultados quando houve intervenções na estrutura física da habitação, buscando atender um maior número de indivíduos sob condições de conforto térmico mais próximas do ideal, já que a precariedade construtiva e as limitações econômicas dos moradores inviabilizam a implementação de sistemas de climatização artificial para solucionar o problema. Este trabalho de abrangência social está delimitado à problemática do conforto térmico, contudo, evidencia as condições da vulnerabilidade habitacional que muitas famílias com baixa renda vivem, sem perspectivas, muitas vezes, de adquirirem uma moradia regular adequada e sem o atendimento do poder público.

Estas análises servem de base para o aprofundamento das pesquisas conseguintes envolvendo a construção de habitações emergenciais e o uso de embalagens Tetra Pak® como material isolante, como medida paliativa de isolamento. Vale ressaltar que grande parte dessa população não tem ao seu alcance a oportunidade de consultorias técnicas de projeto, tampouco para o suprimento de materiais na construção. Neste sentido, as técnicas e estratégias de projeto simuladas podem estar ao alcance da comunidade e podem ser empregadas durante o processo de autoconstrução, assim como possibilita a criação de novos procedimentos construtivos a serem aplicados pelo Projeto Brasil Sem Frestas com o material cartonado já utilizado, orientado, neste caso, sob análises e estudos científicos, que podem melhorar o desempenho térmico e as condições de habitabilidade de quem depende de uma moradia emergencial.

## Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho Térmico de Edificações/ Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro. 2005a.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho Térmico de Edificações/ Zoneamento Bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro. 2005b.

AMADO, M. Wall-up: Method for the regeneration of settlements and housing in the Developing World. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdã, v. 41, p. 22-34, Aug. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.024>

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR- CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55-2017**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ASRAE 2017.

BRASIL Sem Frestas (Projeto). Curitiba, 2018. Disponível em: Acesso em: <http://brasilemfrestas.com.br/>. Acesso em: 15 jul. 2020.

BRE, F.; FACHINOTTI, V. D. A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings. **Energy and Buildings**, v. 154, p. 283–294, nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.002>

CARLUCCI, S.; CATTARIN, G.; CAUSONE, F.; PAGLIANO, L. Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). **Energy and Buildings**, v. 104, p. 378–394, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.064>.

CHEN, X.; YANG, H. Sensitivity analysis and optimization of a typical passively designed residential building with hybrid ventilation in hot and humid climates. **Energy Procedia**, v. 142, p. 1781–1786, Dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.563>.

COELLO, C. C.; LAMONT, G.B.; VAN VELDHUIZEN, D.A. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. 2. ed. Boston: Springer, 2007. (Genetic algorithms and evolutionary computation. Series, 5).

DALBEM, R. **Desempenho de edificação residencial no Sul do Brasil sob a ótica energética e econômica**: da NBR 15575 à *Passive House*. 2018. 122 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018. Disponível em: [https://wp.ufpel.edu.br/prograu/files/2021/04/dissertacao\\_renata\\_dalbem\\_UFPEL.pdf](https://wp.ufpel.edu.br/prograu/files/2021/04/dissertacao_renata_dalbem_UFPEL.pdf). Acesso em: 8 abr. 2021.

DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE transactions on evolutionary computation**, v.6, n.2, p.182–197, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente Construído**, v.10, n.4, p. 139–154, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000400010>.

EVINS, R. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. **Renewable and sustainable energy reviews**, v.22, p. 230–245, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004>.

FAURE, G.; CHRISTIAANSE, T.; EVINS, R.; BAASCH, G.M. BESOS: A Collaborative Building and Energy Simulation Platform. In: ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS FOR ENERGY-EFFICIENT BUILDINGS, CITIES, AND TRANSPORTATION, 6, New York. **Proceedings [...]**. New York: ACM, 2019. p. 350-351. DOI: <https://doi.org/10.1145/3360322.3360995>.

FIGUEIREDO, A.; KAMPF, J.; VICENTE, R. Passive House Optimization for Portugal: overheating evaluation and energy performance. **Energy and Buildings**, v. 118, p. 181-196, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.034>.

FONSECA, L. P. G.; NUNES, V. D. L.; SANTANA, L. O.; CARLO, J. C.; Cesar Junior, K. M. L. Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 267-288, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100135>.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit habitacional no Brasil 2015**. Belo Horizonte: FJP/ Diretoria de Estatística e Informações, 2018. 78 p. (Estatística & Informações, n. 6). Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.mg.gov.br/consulta/consultaDetalheDocumento.php?iCodDocumento=76871>. Acesso em: 8 abr. 2021.

GOU, S.; NIK, V.M.; SCARTEZZINI, J. L.; ZHAO, Q.; LI, Z. Passive design optimization of newly-built residential buildings in Shanghai for improving indoor thermal comfort while reducing building energy demand. **Energy and Buildings**, v. 169, p. 484–506, June 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.095>.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Aglomerados Subnormais 2019**: Classificação preliminar e informações de saúde para o enfrentamento à COVID-19. Notas Técnicas. Rio de Janeiro: IBGE, 2020a. 13 p. Disponível em: [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101717\\_notas\\_tecnicas.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101717_notas_tecnicas.pdf). Acesso em: 8 abr. 2021.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Síntese de indicadores sociais**: Uma análise das condições de vida da população brasileira: 2020. Rio de Janeiro: IBGE, 2020b. (Estudos e Pesquisas Informação Demográfica e Socioeconômica, n. 43). 153 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101760.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2021.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas**: período 1981-2010. Brasília: INMET, 2010. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 8 abr. 2021.

INMETRO. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R**. INMETRO, 2012. 136 p. (Anexo da Portaria INMETRO nº 018/2012). Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2021.

JAHNKE, Karin A. **Análise do desempenho térmico de painéis de vedação e mantas para subcobertura com a reutilização de embalagem LV**. 2006. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/88997>. Acesso em: 8 abr. 2021.

LAMBERTS, R; DUARTE, V.C.P. **Desempenho Térmico de Edificações**: Disciplina: ECV 5161. Florianópolis: UFSC: Departamento de Engenharia Civil: LabEEE, 2016. 238 p. Disponível em: [https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161\\_v2016.pdf](https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161_v2016.pdf). Acesso em: 8 abr. 2021.

LINCZUK, V. C. C.; BASTOS, L. E. G. Otimização multiobjetivo orientada ao desempenho térmico para o projeto de edificações de baixo consumo de energia na Região Sul do Brasil. **Ambiente Construído**, v.20, n.4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400485>.

MAGNIER, L. **Multiobjective optimization of building design using artificial neural network and multiobjective evolutionary algorithms**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas = Degree of Master of Applied Science- Building Engineering) - The Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, Montréal/ Québec, 2008. Disponível em: <https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/976218/1/MR63229.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2021.

MAKACHIA, Peter A. Evolution of urban housing strategies and dweller-initiated transformations in Nairobi. **City, Culture and Society**. v. 2, n. 4, p. 219-234, Dec. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2011.11.001>.

NGUYEN, A. T.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043-1058, Jan. 2014. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>.

NICOL, Fergus. The limits to accepted indoor temperatures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMFORT AT THE EXTREMES: Energy, Economy and Climate, 1., 2019, Dubai. **Proceedings** [...]. Dubai: Heriot Watt University, 2019. P. 23-31. Disponível em: [https://windsorconference.com/wp-content/uploads/2019/04/CATE2019\\_Proceedings-compressed.pdf](https://windsorconference.com/wp-content/uploads/2019/04/CATE2019_Proceedings-compressed.pdf). Acesso em: 8 abr. 2021.

ONU-HABITAT. **Déficit Habitacional em América Latina Y El Caribe**: Una herramienta para el diagnóstico y el desarrollo de políticas efectivas em vivienda y hábitat. Nairobi; ONU-HABITAT, 2015. 82 p. Disponível em: <https://unhabitat.org/deficit-habitacional-en-america-latina-y-el-caribe>. Acesso em: 8 abr. 2021.

PAL, S. K.; TAKANO, A.; ALANNE, K.; SIREN, K. A life cycle approach to optimizing carbon footprint and costs of a residential building. **Building and Environment**, v. 123, p.146–162, 2017. DOI: [10.1016/j.buildenv.2017.06.051](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.051).

SALATA, F.; CIANCIO, V.; DELL'OLMO, J.; GOLASI, I.; PALUSCI, O.; COPPI, M. Effects of local conditions on the multi-variable and multi-objective energy optimization of residential buildings using genetic algorithms. **Applied Energy**, v. 260, 114289, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114289> .

SANTANA, L. O. **Otimização multiobjetivo da geometria de edificações residenciais energeticamente eficientes por meio de algoritmos genéticos**. Viçosa, 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/11536>. Acesso em: 8 abr. 2021.

SANTOS, Alyne R. C. **Avaliação da emissividade de embalagens cartonadas por termografia e modelagem computacional**. 2019. 67 f. Dissertação (Mestre em Ciências Ambientais) - Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu Mestrado em Ciências Ambientais, Universidade de Cuiabá, Cuiabá, 2019. Disponível em: <https://repositorio.pgsskroton.com/handle/123456789/23094>. Acesso em: 8 abr. 2021.

SEBBEN, T.; SILVA, T. L.; CUNHA, E. G. Análise do nível de conforto térmico em habitação vulnerável revestida com embalagens Tetra Pak® e proposições de projeto. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1-8. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/896/553>. Acesso em: 8 abr. 2021.

SOUSA, J. Energy simulation software for buildings: review and comparison. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INFORMATION TECHNOLOGY FOR ENERGY APPLICATIONS, 1., 2012, Lisboa. **Proceedings** [...]. Lisboa: Ordem dos Engenheiros, 2012. Disponível em: <http://ceur-ws.org/Vol-923/papero8.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2020.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Who housing and health guidelines**. Genebra: WHO Press, 2018. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241550376>. Acesso em: 8 abr. 2021.

YU, W.; LI, B.; JIA, H.; ZHANG, M.; WANG, D. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. **Energy and Buildings**, v. 88, p.135–143, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.063>.

ZHOU, Y.; CAO, S.; KOSONEN, R.; HAMDY, M. Multi-objective optimization of an interactive building sharing network with high energy flexibility using the Pareto archive NSGAI algorithm. **Energy Conversion and Management**, v. 218, 113017, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113017>.

---

### 1 Thaíse Sebben

Arquiteta-Urbanista. Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Faculdade Meridional. Endereço postal: Rua Senador Pinheiro, 304, Passo Fundo, RS - Brasil. CEP 99070-220.

**2 Rodrigo Karini Lietzki**

Bacharel em Ciência da Computação. Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Pelotas.

Endereço postal: Rua Benjamin Constant, nº 1359, Pelotas, RS - Brasil. CEP 96010-020.

**3 Thalita dos Santos Maciel**

Arquiteta-Urbanista. Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Pelotas. Endereço postal:

Rua Benjamin Constant, nº 1359, Pelotas, RS - Brasil. CEP 96010-020.

**4 Thaisa Leal Da Silva**

Bacharel em Ciência da Computação. Doutora em Engenharia Eletrotécnica e Computadores pela Universidade de

Coimbra. Professora da Faculdade Meridional. Endereço postal: Rua Senador Pinheiro, 304, Passo Fundo, RS - Brasil.

CEP 99070-220.

**5 Eduardo Grala da Cunha**

Arquiteto-Urbanista. Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Professor da

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas. Endereço postal: Rua Benjamin

Constant, nº 1359, Pelotas, RS - Brasil. CEP 96010-020.

**6 Lauro André Ribeiro**

Bacharel em Administração. Doutor em Sistemas Sustentáveis de Energia pela Universidade de Coimbra. Professor

da Faculdade Meridional. Endereço postal: Rua Senador Pinheiro, 304, Passo Fundo, RS - Brasil. CEP 99070-220.