

**Otimização da eficiência energética de projetos arquitetônicos via  
Algoritmo Evolutivo combinado ao ENERGYPLUS**

*Optimization of energy efficiency of architectural projects via Evolutionary Algorithm  
combined with ENERGYPLUS*

*Optimización de la eficiencia energética de proyectos arquitectónicos mediante  
Algoritmo Evolutivo combinado con ENERGYPLUS*

**Giulia Piazza Fernandes Soares**

Aluna mestrado, Unicamp, Brasil  
giuliapiazzafernandes@gmail.com

**Pedro Jose Perez Martinez**

Professor Doutor, Unicamp, Brasil  
pjperez@unicamp.br

## RESUMO

O objetivo do artigo é formular um problema de otimização que ajusta parâmetros físicos de uma habitação social a fim de minimizar consumo de energia elétrica e desconforto térmico. As variáveis de otimização utilizadas são ajuste de posição cardinal; espessuras de materiais que compõem paredes externas, cobertura e piso; absorvâncias das paredes externas e cobertura; altura piso-teto e tamanho das janelas. Diferentemente de outros trabalhos, ao invés de se otimizar as transmitâncias térmicas das paredes, cobertura e piso, optou-se por diretamente atuar nas espessuras destes materiais, além de otimizar tamanho das janelas e altura piso-teto. O problema de otimização é resolvido via Algoritmos Genéticos. A habitação analisada é de interesse social e atende condições mínimas conforme as normas brasileiras NBR 15575 e 15220 e do Programa Casa Verde Amarela do Governo Federal. As avaliações das soluções obtidas utilizam o programa Energy Plus e a plataforma computacional Python. Os resultados foram avaliados segundo diferentes configurações de variáveis físicas de projeto: posições cardinais da habitação, espessuras de materiais que compõem paredes externas, cobertura e piso, absorvância das paredes externas e cobertura, altura piso-teto e tamanho das janelas. Esse conjunto de variáveis se mostraram coerentes a partir da exploração adequada de suas variáveis a fim de obter um projeto que universaliza o uso de técnicas simples de eficiência energética de modo sistêmico e que pode ser aplicada para qualquer tipo de habitação. Também conseguiu-se obter automação de soluções, fornecimento de uma solução ótima factível contribuindo para o aumento de eficiência energética, assim como a diminuição de consumo de energia, contribuindo assim para um projeto mais sustentável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Algoritmos Genéticos. Eficiência Energética. EnergyPlus.

## SUMMARY

*The objective of this article is to formulate an optimization problem that adjusts physical parameters of a social housing to minimize electrical energy consumption and thermal discomfort. The optimization variables used are cardinal tweaking; thickness of materials that make up external walls, roof, and floor; external wall and roof absorbances; floor-to-ceiling height and window size. Unlike other works, instead of optimizing the thermal transmittances of the walls, roof, and floor, it was decided to act directly on the thickness of these materials, in addition to optimizing the size of the windows and the floor-to-ceiling height. The optimization problem is solved via Genetic Algorithms. The analyzed housing is of social interest and meets minimum conditions according to Brazilian standards NBR 15575 and 15220 and the Casa Verde Amarela Program of the Federal Government. The evaluations of the solutions obtained use the EnergyPlus program and the Python computational platform. The results were evaluated according to different configurations of physical design variables: cardinal positions of the house, thickness of materials that make up the external walls, roof and floor, absorbance of the external walls and roof, floor-to-ceiling height and window size. This set of variables proved to be coherent from the proper exploration of its variables in order to obtain a project that universalizes the use of simple energy efficiency techniques in a systemic way and that can be applied to any type of housing. It was also possible to obtain automation of solutions, providing an optimal feasible solution, contributing to an increase in energy efficiency, as well as a decrease in energy consumption, thus contributing to a more sustainable project.*

**KEYWORDS:** Genetic Algorithms. Energy Efficiency. EnergyPlus.

## RESUMEN

*El objetivo de este artículo es formular un problema de optimización que ajuste los parámetros físicos de una vivienda social para minimizar el consumo de energía eléctrica y el malestar térmico. Las variables de optimización utilizadas son ajustes cardinales; espesor de los materiales que componen las paredes exteriores, el techo y el piso; absorvancias de paredes y techos externos; altura del piso al techo y tamaño de la ventana. A diferencia de otras obras, en lugar de optimizar las transmitancias térmicas de las paredes, cubierta y suelo, se optó por actuar directamente sobre los espesores de estos materiales, además de optimizar el tamaño de las ventanas y la altura del suelo al techo. El problema de optimización se resuelve mediante Algoritmos Genéticos. La vivienda analizada es de interés social y reúne condiciones mínimas según las normas brasileñas NBR 15575 y 15220 y el Programa Casa Verde Amarela del Gobierno Federal. Las evaluaciones de las soluciones obtenidas utilizan el programa EnergyPlus y la plataforma computacional Python. Los resultados se evaluaron de acuerdo a diferentes configuraciones de las variables físicas de diseño: posiciones cardinales de la casa, espesor de los materiales que componen las paredes externas, techo y piso, absorvancia de las paredes externas y techo, altura de piso a techo y tamaño de ventana. Este conjunto de variables demostró ser coherente a partir de la adecuada exploración de sus variables con el fin de obtener un proyecto que universalice el uso de técnicas sencillas de eficiencia energética de forma sistémica y que pueda aplicarse a cualquier tipo de vivienda. También se logró la automatización de soluciones, brindando una óptima solución factible, contribuyendo al aumento de la eficiencia energética, así como a la disminución del consumo de energía, contribuyendo así a un proyecto más sustentable.*

**PALABRAS CLAVE:** Algoritmos Genéticos. Eficiencia energética. Energía Plus.

## 1 INTRODUÇÃO

O setor de edifícios comerciais e residenciais é responsável pela maior parcela de consumo de energia elétrica, cujo uso continua crescente assim como seu custo (EPE, 2020). Assim, é importante desenvolver estratégias de conservação de energia e sustentabilidade ambiental já na fase de projeto.

Em termos de cenário brasileiro, observa-se que o setor que mais sofre com a eficiência energética é o setor de habitações de interesse social (HIS) (Bavaresco et al., 2021), o qual se popularizou com a criação do Banco Nacional da Habitação em 1964, do Programa “Minha Casa, Minha Vida” em 2009 e do Programa “Casa Verde e Amarela” em 2019.

Mas, Bavaresco et al. (2021) apontam pouca evolução quanto a aspectos de eficiência energética no HIS ao se avaliar o período de 2009 a 2019. Por isto, eles propuseram um protocolo para que os projetistas avaliem as características das habitações a modo de incentivar que os conhecimentos sobre eficiência energética em edificações se tornem mais difundidos.

Além disto, existe uma falta de ferramentas e simulações computacionais que insiram características de projeto, envoltória e localização, dentre outros, a fim de obter projetos eficientes no quesito energético.

A eficiência da edificação pode ser alcançada através da análise de diversos parâmetros como forma, orientação da construção, materiais adotados, escolha das técnicas construtivas das envoltórias, sombreamento, tamanhos de janela, características do sistema de aquecimento ou resfriamento, ventilação, arborização, custos, economia de energia e ciclo de vida do edifício, desempenho de isolamento usando elementos construtivos que barrem o calor a fim de aumentar conforto térmico, sistemas de envidraçamento de isolamento térmico mais eficazes para baixa exposição solar, ventilação natural, dentre outros (LEITZKE et al., 2021).

Esses parâmetros estão interligados, portanto, quando o projetista toma decisões de forma empírica e manual, os resultados podem ser ineficientes quando comparados com os obtidos através de técnicas de otimização. E é importante frisar que projetos energeticamente mais eficientes trazem mais qualidade de vida, conforto e sustentabilidade em comparação a projetos convencionais (Nguyena, Reitera e Rigob, 2014).

Um estudo automatizado de configurações físicas simples pode não implicar em altos investimentos em materiais e podem proporcionar conforto térmico na maior parte do ano de projetos residenciais, onde há maior tolerância a temperaturas internas e carga interna menos intensiva.

Assim, ferramentas adequadas para este fim podem avaliar as variáveis de um projeto e dessa forma, remanejar decisões de projeto a fim de atingir melhores metas de desempenho energéticos estabelecidos por diversos certificados e regulamentos (KAPSALAKI, LEAL e SANTAMOURIS, 2012).

Seguindo esta estratégia de estudo, este trabalho apresenta uma ferramenta que utiliza um algoritmo evolutivo para resolver um problema que visa minimizar o consumo de energia elétrica e o desconforto térmico de habitações na fase de projeto, ajustando as seguintes variáveis físicas de projeto: posições cardeais da habitação, espessuras de materiais que compõem paredes externas, cobertura e piso, absorvâncias das paredes externas e cobertura, altura piso-teto e tamanho das janelas.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Existe no mercado disponibilidade de ferramentas de análise computacional para a avaliação de resultados das escolhas construtivas antes da concepção do projeto.

Uma destas ferramentas é o *EnergyPlus*, que analisa os níveis de eficiência energética e de conforto térmico dos edifícios. O *Energy Plus* é uma das ferramentas mais difundida em trabalhos com esta finalidade no mundo (SOUSA, 2012) e será utilizada neste trabalho.

Segundo Didonè e Pereira (2010), a tarefa de avaliar o desempenho energético de edificações é complexa pois envolve uma grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares, o que abriu um ramo no setor da arquitetura e da construção voltada à análise projetual antes da sua concepção utilizando simulações computacionais.

Uma vez que um projeto ideal depende de inúmeras variáveis e de diferentes parâmetros de avaliação, é humanamente impossível obter uma boa composição realizando parametrizações empíricas, as quais podem levar a perdas por ser um processo repetitivo, demorado e pouco confiável (DELGARM et al., 2016).

A fim de substituir este processo repetitivo, tem se usado algoritmos evolucionários, para se buscar melhores soluções para um problema que depende de ajuste de parâmetros.

Basicamente, os algoritmos evolucionários são baseados na ideia de sobrevivência do mais apto. Eles buscam encontrar uma solução melhor numa população de soluções. Eles mudam iterativamente e combinam soluções para criar soluções, que são avaliadas em relação à função objetivo. As soluções que são melhores para cumprir a função objetivo são selecionadas para sobreviver e se reproduzir. O processo é então repetido com uma nova geração de soluções.

Há vários tipos de algoritmos evolucionários tais como o Algoritmos Genéticos (AG) - que se inspiram na seleção natural a Evolução Diferencial (ED) - que é um algoritmo de otimização estocástico cujas soluções operam através de passos Otimização por Enxame de Partículas - baseado no conceito de enxames, como cardumes de peixes e bandos de pássaros - e outros mais.

Os artigos apresentados na Quadro 1 apresentam alguns exemplos de estudos que utilizam Algoritmos Evolucionários para solucionar funções multiobjetivos relacionadas à arquitetura.

Todos estes estudos mostram que a análise da eficiência energética dos modelos construtivos se torna mais eficiente quando se combina mais de uma variante, a qual se tornou uma tendência no uso de algoritmos evolutivos para otimizar a eficiência energética ajustando vários parâmetros físicos de projetos arquitetônicos na fase de projeto.

No entanto, uma das limitações para uso do *EnergyPlus* é quanto à configuração do grande número de simulações com variações de componentes de interesse, pois ele não apresenta funcionalidades que permitam a geração de múltiplos cenários com parametrização automática de componentes (LEITZKE et al., 2021).

Considerar múltiplas combinações de soluções técnicas de construção para um estudo específico envolvendo o uso da ferramenta não é uma tarefa simples, pois ela não apresenta uma interface capaz de mudar as informações inseridas no programa, fazendo com que cada simulação execute individualmente um objeto de estudo.

Quadro 1- Trabalhos relacionados a algoritmos evolucionários para solucionar funções multiobjetivos

Auto(es)	Resumo Geral	Ferramenta de Otimização	Ferramenta de Simulação	Objetivo
Nguyena, A-T, Reitera, S., & Rigob, P. (2014)	Aponta a importância de se trabalhar na seleção de algoritmos de otimização multiobjetivo para que se alcance melhores técnicas de busca, a fim de que se reduza tempo e esforço na obtenção de projetos arquitetônicos com melhores desempenhos construtivos.	Análise bibliográfica sobre Métodos de análise Multiobjetivo		
Delgarm, N.; Sajadi, B. & Delgram, S. (2016).	Otimiza as variáveis: orientação do edifício, especificações de projeção para sombreamento, tamanho de janela e propriedades do material de parede.	Enxame de Partículas (MOPSO)	EnergyPlus, MATLAB® e jEPlus	Demanda energética
Santana, Laila Oliveira (2016).	Otimiza desempenho energético da geometria de edificações residenciais levando em consideração: dimensão dos ambientes, pé direito, área das janelas e inclinação do telhado.	Octopus: SPEA-212 e HypE	Grasshopper, EnergyPlus e Radiance	Conforto térmico
Ferdyn-Grygierek, J. & Grygierek, K. (2017)	Otimiza as variáveis: janelas, orientação do edifício, isolamento da parede externa, do telhado e piso térreo, além do impacto do ciclo de vida (LCC) de cada elemento.	Algoritmo genético auto-adaptativo baseado em aritmética nebulosa	TRNSYS	Conforto térmico
Bre, F.; Fachinotti, V. D. A. (2017)	Otimiza composições construtivas a partir das variáveis: orientação, nível de sombreamento das janelas, a absorvância solar das esquadrias externas, o nível de infiltração de ar pelas esquadrias e portas, o percentual de abertura para ventilação das esquadrias, o tamanho e o tipo das esquadrias, e a composição das paredes externas, internas, do piso e da cobertura.	NSGA-II	EnergyPlus e Python	Demanda energética e Conforto térmico
Grygierek, K. & Ferdyn-Grygierek, J. (2019)	Otimiza composições construtivas a partir das variáveis: tipos de janelas e seus respectivos tamanhos, orientação do edifício, isolamento de paredes externas, teto para sótão sem aquecimento e térreo em condições climáticas polonesas.	Algoritmos Genéticos e Enxame de Partículas	EnergyPlus, MATLAB®	Demanda energética e ciclo de vida
Leitzke et al. (2021)	Otimiza as seguintes variáveis: transmitâncias térmicas das paredes, cobertura e piso, orientação cardinal e absorvância solar da parede e cobertura.	Métodos evolutivos multiobjetivo elitista	EnergyPlus e Python	Conforto térmico

Fonte: Autores

Philip e Tanjuatco (2011) avançaram neste sentido com o desenvolvimento em linguagem de programação Python (*Open Source*) de um programa chamado EPPY (*Energy Plus Python*) que permite a comunicação de dados com o *software* EnergyPlus. Como resultado, é possível navegar, pesquisar e modificar arquivos do EP, tais como o arquivo do modelo geométrico salvo no formato “*EnergyPlus Input Data File*” (.idf) e arquivo climático “*EnergyPlus Weather Format*” (.epw). O EPPY abriu as possibilidades seguintes (PHILIP e TANJUATCO, 2011):

- alterações em um arquivo .idf do EP através de poucas linhas de código. Ou seja, o trabalho manual dentro do *software* EP pode ser substituído por algumas linhas codificadas no Python;
- alterações sistêmicas em vários arquivos .idf;
- geração de diferentes arquivos de entrada para o EP, simulando a construção em diferentes posições cardeais, alteração da composição das janelas, iluminação, eficiência, potência de equipamentos eletrônicos, compilação do consumo de energia, desconforto térmico, dentro do outras funcionalidades.

Um exemplo de aplicação do EPPY ao EP é o trabalho de LEITZKE et al. (2020) que apresenta uma ferramenta computacional chamada “IDFModifier”, capaz de realizar a parametrização de transmitâncias térmicas de paredes externas; a ferramenta redefine e facilita a parametrização de simulações computacionais realizadas pelo EP.

As referências apresentadas embasaram importantes decisões referentes à formulação e implementação computacional de um algoritmo evolutivo aplicado a um problema de otimização que tem objetivos a minimização de consumo de energia elétrica e do desconforto térmico de habitações na fase de projeto.

- Assim, as premissas estabelecidas neste trabalho se relacionam aos seguintes pontos:
- escolha das variáveis de otimização, tais como: diferentes posições cardeais da habitação, espessuras de materiais que compõem paredes externas, cobertura e piso, absorvâncias das paredes externas e cobertura, altura piso-teto e tamanho das janelas. Diferentemente do trabalho de Leitzke et al. (2021), ao invés de se otimizar as transmitâncias térmicas das paredes, cobertura e piso, optou-se por diretamente atuar nas espessuras destes materiais, além de otimizar tamanho das janelas e altura piso-teto;
  - uso do *software* EnergyPlus, o qual é muito difundido para análises de eficiência energética;
  - escolha da linguagem de programação Python, devido ao aplicativo EPPY, que permite comunicação de dados entre o Python e o EP;
  - uso dos Algoritmos Genéticos para solução do problema de otimização pois ele é muito citado na literatura;
  - aplicação da ferramenta proposta em 3 cidades do Brasil com diferentes zonas bioclimáticas: Caxias do Sul, Picos e Brasília.

### **3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO PARA MINIMIZAÇÃO DE CONSUMO E DESCONFORTO**

Esta seção tem como objetivo descrever a formulação matemática do problema de otimização que tem como critérios a minimização do consumo de energia (kWh/m<sup>2</sup> ano) e do desconforto térmico (%) de uma dada habitação social.

A formulação foi inspirada inicialmente em Leitzke et al. (2021), que otimiza as variáveis seguintes: transmitância térmica da parede (W/m<sup>2</sup> K), transmitância térmica da cobertura (W/m<sup>2</sup> K), transmitância térmica do piso (W/m<sup>2</sup> K), absorvância da parede externa, absorvância da cobertura e orientação cardinal (°).

Este trabalho propõe substituir a otimização das transmitâncias térmicas pelas espessuras da parede, cobertura e piso e inserir mais variáveis de otimização, relacionadas à altura do piso ao teto e à altura das janelas (mantendo as larguras fixas).

O problema a ser descrito é resolvido de maneira híbrida pois concilia o uso do Energy Plus (EP) e Algoritmos Genéticos (via função “ga\_instance” do Python). O processo de solução

do problema excursiona pelo campo de busca delimitado pelas restrições, e cada solução obtida pelo AG é avaliada pelo software EP, que fornece valores de consumo e desconforto.

Para poder se parametrizar os dados simulados pelo EP é utilizada a biblioteca desenvolvida na linguagem de programação Python chamada EPPY (PHILIP e TANJUATCO, 2011).

### 3.1 Função multiobjetivo

A função objetivo ( $FO$ ) a ser minimizada durante o processo de otimização das variáveis citadas nas seções anteriores contempla os seguintes critérios:

$$FO = \min[f_c + f_d] \quad (1)$$

onde

$FO$  – função objetivo a ser minimizada;

$f_c$  – consumo de energia (kWh/(m<sup>2</sup>.ano));

$f_d$  – nível de desconforto (por unidade, pu).

Cada um dos critérios de otimização é obtido por meio de relatórios de saída da simulação computacional do *Energy Plus*.

Em problemas com um único objetivo, a solução ótima é obtida através da simples maximização (ou minimização) de uma função objetivo de variáveis de decisão sujeitas a uma série de restrições. Diferentemente, a análise multiobjetivo seleciona a solução de melhor compromisso em um cenário em que existem múltiplos critérios.

A equação (1) busca a otimização de duas funções objetivo que consiste em determinar um conjunto de variáveis de decisão, que otimiza a função vetorial, cujos elementos representam os índices de desempenho a serem otimizados.

No problema de otimização multiobjetivo cabe colocar que não existe somente uma solução ótima e sim um conjunto de possíveis soluções denominadas eficientes ou Pareto-ótimo. E, como não se conhece a importância de cada um dos objetivos, todas as soluções Pareto-ótimo são igualmente importantes (COELLO, 2000).

Existe uma variedade de métodos para resolver um problema de otimização multiobjetivo (COELLO, 2000), tais como o método do critério global, método das ponderações e método da penalização, dentre outros.

Um exemplo de fácil implementação é a do Método do Critério Global, que combina diversas funções objetivo dentro de uma única função, obtendo como resultado da otimização uma solução única.

Este Método do Critério Global será utilizado para formar uma função objetivo única, cujo conjunto de soluções ótimas é obtido via AG.

O Método do Critério Global utiliza o valor ótimo como base de cálculo para definir o grau de aptidão de um indivíduo. Esse método converte a função multiobjetivo em um único objetivo sendo expressa matematicamente pela seguinte função (COELLO, 2000):

$$FO = \min\left[\frac{f_c - f_c^0}{f_{\max c} - f_c^0} + \frac{f_d - f_d^0}{f_{\max d} - f_d^0}\right] \quad (2)$$

onde

$f_c$  - consumo de energia;

$f_d$  - nível de desconforto;

$f_c^0$  - valor ideal de consumo, assumido como zero;

$f_d^0$  - valor ideal de desconforto, assumido como zero;

$fmax_c$  - pior caso de consumo. Ele é obtido após simulações em que se alteram os valores das variáveis de modo aleatório, selecionando-se o maior valor de consumo obtido;

$fmax_d$  - pior caso de desconforto. Como o valor de desconforto é percentual, considera-se 100% ou 1 por unidade (pu), como sendo a pior situação.

Como os valores ideais ( $f_c^0$  e  $f_d^0$ ) são assumidos como zero e  $fmax_d$  tem valor unitário, a eq. (2) passa a ser

$$FO = \min\left[\frac{f_c}{fmax_c} + f_d\right] \quad (3)$$

### 3.2 Variáveis de otimização e seus limites

As espessuras das paredes externas, cobertura e piso serão otimizadas de modo a se obter novos valores de transmitâncias térmicas da parede externa, cobertura, as quais satisfazem as normas NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

Os materiais cujas espessuras serão otimizadas são blocos cerâmicos das paredes externas, placas EPS (de poliestireno expandido) e concreto do piso, conforme equacionamento contido na NBR 15220.

As composições das paredes, cobertura e piso, armazenados na aba “Material” do EP, são modeladas segundo o trabalho de Leitzke et al. (2021). As composições e limites físicos das variáveis são apresentados a continuação.

#### 3.2.1 Composição das paredes externas formadas por argamassa, bloco cerâmico equivalente e argamassa

O valor da espessura  $e_{cer}$  (m) do bloco cerâmico é otimizada a fim de obter melhores níveis de consumo e de desconforto térmico. Para cada nova espessura  $e_{cer}$  um novo valor de resistência térmica da cerâmica ( $RT_{cer}$ ) é obtido segundo (NBR 15220):

$$RT_{cer} = \frac{e_{cer}}{\lambda_{cer}} \quad (4)$$

onde

$e_{cer}$  – espessura do bloco cerâmico (m);

$\lambda_{cer}$  – condutividade térmica do bloco cerâmico (W/m K);

$RT_{cer}$  – resistência térmica do bloco cerâmico (m<sup>2</sup> K/W).

A resistência térmica total da parede  $RT_{parede}$  é formada pela soma das resistências térmicas de cada componente da parede (NBR 15220):

$$RT_{parede} = 2 * RT_{arg} + RT_{cer} + RT_{ar} \quad (5)$$

onde

$RT_{arg}$  – resistência térmica da argamassa (m<sup>2</sup> K/W);

$RT_{cer}$  – resistência térmica do bloco cerâmico (m<sup>2</sup> K/W);

$RT_{ar}$  – resistência térmica do ar (m<sup>2</sup> K/W), valor adotado igual a 0,16 (m<sup>2</sup> K/W).

O novo valor da Transmitância Térmica total da parede externa ( $TTP$ ) é calculado pelo inverso do novo valor de  $RT_{parede}$  (NBR 15220).

#### 3.2.2 Composição da cobertura formada por telha de fibrocimento, forro de madeira e EPS

O valor da espessura  $e_{EPS}$  (m) do bloco das placas EPS é otimizada a fim de obter melhores níveis de consumo e de desconforto térmico.

O novo valor de resistência térmica da cerâmica ( $RT_{cer}$ ) é recalculado para cada novo valor de espessura da cerâmica  $e_{cer}$  (NBR 15220):

$$RT_{EPS} = \frac{e_{EPS}}{\lambda_{EPS}} \quad (6)$$



onde

$e_{EPS}$  – espessura da placa EPS (m);

$\lambda_{EPS}$  - condutividade térmica da placa EPS (W/m K);

$RT_{EPS}$  – resistência térmica da placa EPS ( $m^2$  K/W).

A resistência térmica total da cobertura ( $RT_{cobertura}$ ) é formada pela soma das resistências térmicas de cada componente da cobertura (NBR 15220):

$$RT_{cobertura} = RT_{EPS} + RT_{forromaderia} + RT_{telhafibrocimento} + RT_{ar} \quad (7)$$

onde

$RT_{EPS}$  – resistência térmica da placa EPS ( $m^2$  K/W);

$RT_{telhafibrocimento}$  – resistência térmica da telha de fibrocimento ( $m^2$  K/W);

$RT_{forromaderia}$  – resistência térmica da forro madeira ( $m^2$  K/W);

$RT_{ar}$  – resistência térmica do ar ( $m^2$  K/W), valor adotado igual a 0.21  $m^2$  K/W.

O novo valor da transmitância térmica total da cobertura ( $TTC$ ) é recalculado pelo inverso do novo valor de  $RT_{cobertura}$  (NBR 15220).

### 3.2.3 Composição da laje de piso formada por laje de concreto, argamassa de assentamento e revestimento cerâmico

O valor da espessura  $e_{conc}$  (m) do concreto é otimizada a fim se obter melhores níveis de consumo e de desconforto térmico.

O novo valor de resistência térmica da cerâmica,  $RT_{cer}$ , é recalculado para cada novo valor de espessura da cerâmica,  $e_{conc}$  (NBR 15220):

$$RT_{conc} = \frac{e_{conc}}{\lambda_{conc}} \quad (8)$$

onde

$e_{conc}$  – espessura do concreto (m);

$\lambda_{conc}$  - condutividade térmica do concreto (W/m K);

$RT_{conc}$  – resistência térmica do concreto ( $m^2$  K/W).

A resistência térmica total do piso ( $RT_{piso}$ ) é formada pela soma das resistências térmicas de cada componente da cobertura (NBR 15220):

$$RT_{piso} = RT_{conc} + RT_{arg} + RT_{cer} \quad (9)$$

onde

$RT_{conc}$  – resistência térmica do concreto ( $m^2$  K/W);

$RT_{arg}$  – resistência térmica da argamassa ( $m^2$  K/W);

$RT_{cer}$  – resistência térmica da cerâmica ( $m^2$  K/W).

### 3.2.4 Limites das variáveis

A seguir, descrevem-se os limites físicos utilizados para cada uma das variáveis de otimização do problema.

Os limites máximo e mínimo de espessura do bloco cerâmico da parede externa ( $e_{cer}$ ) e absorvância da parede (AP) são os seguintes:

$$e_{cer}^{min} \leq e_{cer} \leq e_{cer}^{max} \quad (10)$$

$$AP^{min} \leq AP \leq AP^{max} \quad (11)$$

onde

$e_{cer}$  - espessura do bloco cerâmico (m);

$e_{cer}^{min}$  - limite mínimo de espessura do bloco cerâmico (m);

$e_{cer}^{max}$  - limite máximo de espessura do bloco cerâmico (m);

$AP$  - absorptância solar da parede externa;

$AP^{min}$  - limite mínimo de absorptância Solar da parede externa;

$AP^{max}$  - limite máximo de absorptância Solar da parede externa.

Os limites máximo e mínimo utilizados para espessura da placa ( $e_{EPS}$ ) e absorptância da cobertura (AC) são os seguintes:

$$e_{EPS}^{min} \leq e_{EPS} \leq e_{EPS}^{max} \quad (12)$$

$$AC^{min} \leq AC \leq AC^{max} \quad (13)$$

onde

$e_{EPS}$  – espessura da placa EPS (m);

$e_{EPS}^{min}$  - limite mínimo de espessura da placa EPS (m);

$e_{EPS}^{max}$  - limite máximo de espessura da placa EPS (m);

$AC$  - absorptância solar da cobertura;

$AC^{min}$  - limite mínimo de absorptância solar da cobertura;

$AC^{max}$  - limite máximo de absorptância solar da cobertura.

Os limites máximo e mínimo para espessura do concreto do piso ( $e_{conc}$ ) são os seguintes:

$$e_{conc}^{min} \leq e_{conc} \leq e_{conc}^{max} \quad (14)$$

onde

$e_{conc}$  – espessura do concreto (m);

$e_{conc}^{min}$  - limite mínimo de espessura concreto(m);

$e_{conc}^{max}$  - limite máximo de espessura concreto (m).

Os novos valores de espessura da parede externa  $e_{cer}$  (m), espessura da cobertura  $e_{EPS}$  (m), espessura do piso ( $e_{conc}$ ) e absorptâncias são atualizados na aba “Material” do EP (via EPPY).

Os limites máximo e mínimo para orientação (Or) são os seguintes:

$$Or^{min} \leq Or \leq Or^{max} \quad (15)$$

onde

$Or$  - orientação (°).

$Or^{min}$  - limite mínimo de orientação;

$Or^{max}$  - limite máximo de orientação.

Este novo valor de orientação é atualizado na aba “Building[0].North\_Axis” do EP (via EPPY).

Os limites máximo e mínimo para altura do piso ao teto (h) são:

$$h^{min} \leq h \leq h^{max} \quad (16)$$

onde

$h$  - altura do piso ao teto (m);

$h^{min}$  - limite mínimo de altura do piso ao teto (m);

$h^{max}$  - limite máximo de altura do piso ao teto (m).

Os novos valores de altura gerados pelos AG são armazenados na aba “BuildingSurface:Detailed” do EnergyPlus para cada cômodo da habitação (via EPPY).

Os limites máximo e mínimo para altura (hj) da parte superior da janela até o teto são:

$$h_j^{min} \leq h_j \leq h_j^{max} - 0.15 \quad i=1, \dots, n_j \quad (17)$$

onde

$h_j$  - altura da parte superior de cada janela  $i$  até o teto (m);

$h_j^{min}$  - limite mínimo de altura da janela (m);

$h_j^{max}$  - limite máximo de altura da janela (m);

$n_j$  - número de janelas da habitação.

O valor mínimo compreende a altura da parte inferior da janela (mantida fixa); o valor máximo é dinâmico pois depende da altura otimizada obtida na equação (16), considerando 15 cm abaixo do teto e para garantir que não coincida com a altura do teto.

Os novos valores de altura gerados pelos AG são armazenados na aba "FenestrationSurface:Detailed" do Energy Plus para cada janela da habitação (via EPPY).

Assim, o problema de otimização completo, composto pelas equações (3) e (10 -17), é resolvido por Algoritmos Genéticos, utilizando a função "ga\_instance" do Python.

### 3.3 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos são algoritmos evolucionários que se baseiam em mecanismos de seleção natural e genética a fim de resolver problemas de otimização. Eles empregam estratégias de buscas aleatórias que almejam obter pontos que minimizam ou maximizam a função objetivo sendo analisada.

Esta técnica requer que indivíduos sejam codificados para solucionar o problema. Neste estudo, os indivíduos são do tipo decimal e o Quadro 2 apresenta o que cada gene representa no código.

Quadro 2 - Codificação do Indivíduo

Gene 1	Gene 2	Gene 3	Gene 4	Gene 5	Gene 6	Gene 7	...	Gene 6+ $n_j$
$e_{cer}$	$e_{EPS}$	$e_{conc}$	AP	AC	h	$h_{j_1}$	...	$h_{j_{n_j}}$

Fonte: Autores.

O primeiro gene do indivíduo informa o valor de espessura do bloco cerâmico da parede externa ( $e_{cer}$ ), o segundo gene do indivíduo informa o valor de espessura da placa EPS da cobertura ( $e_{EPS}$ ). O terceiro gene informa a espessura do concreto do piso ( $e_{conc}$ ), o quarto gene do indivíduo informa o valor de absorvância solar da parede (AP), o quinto gene do indivíduo informa o valor de absorvância solar da cobertura, o sexto gene informa a altura piso-teto e os  $n_j$  últimos genes informam as alturas das partes superiores de cada janela da habitação.

Após a criação dos indivíduos a cada geração, eles são decodificados, ou seja, encontram-se as variáveis de otimização, atualizadas no banco de dados do EP, e são fornecidos os valores de consumo e desconforto da função de avaliação.

A fim de encontrar as melhores soluções para o problema, aplica-se sobre cada geração um mecanismo de reprodução, baseado no processo evolutivo, que se baseia em operadores genéticos de mutação e cruzamento, entre outros, atuando sobre o material genético do cromossomo (RABELO e OCHI, 1996). Os operadores utilizados pelo AG neste trabalho juntamente com a configuração dos seus parâmetros estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 1- Configuração dos parâmetros do AG

Característica	Parâmetro	Configurado
Indivíduo	Codificação	Decimal
	Número de genes	6+ número janelas
População	Tamanho	10 Indivíduos
	Inicial	Aleatória
Seleção	Elitismo	2 Indivíduos
	Método	Roleta
Cruzamento	Tipo	Um ponto
Mutação	Tipo	Uniforme
	Taxa	20%
Parada	Critério	100 Gerações

Fonte: Autores.

A seguir, descrevem-se os passos principais necessários para resolver o problema de otimização em pauta:

**Passo 1** - Definição de número máximo de gerações e habilitação das funções de consumo e desconforto;

**Passo 2** - Definição do modelo habitacional;

**Passo 3** - Preparação dos arquivos de entrada de dados dos parâmetros da habitação no formato do EP (.idf);

**Passo 4** - Escolha da cidade onde se localiza a habitação e carregamento dos dados climáticos da Zona Bioclimática onde se localiza a habitação;

**Passo 5** - Leitura dos limites físicos das variáveis de otimização;

**Passo 6** - Execução do AG, via função *"ga\_instance"* do Python.

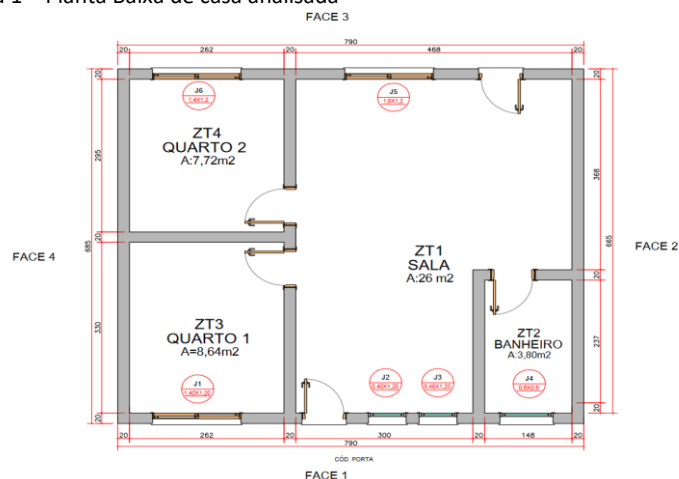
Após atualização da entrada de dados do EP de cada indivíduo decodificado, executa-se o EP e se obtém valores de consumo e desconforto, utilizados para cálculo da função objetivo (eq.3):

**Passo 7** - Convergência do processo após se executar o número de gerações especificado no **Passo 1**; FIM.

#### 4. RESULTADOS

O modelo arquitetônico utilizado para testar a ferramenta de otimização proposta utiliza o projeto modelado em Oliveira (2012). Para atender melhor alguns requisitos do Programa "Casa Verde e Amarela" foram feitas algumas mudanças de projeto, cuja planta baixa está apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Planta Baixa de casa analisada



Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

A casa em questão possui 54,11 m<sup>2</sup> com pé direito de 2,6 m. A casa é composta por dois dormitórios, um banheiro e uma sala com cozinha integrada. Cada ambiente foi categorizado como um nome e como uma zona térmica, sendo sala/cozinha a Zona térmica 1 (ZT 1), banheiro a Zona térmica 2 (ZT 2), quarto 1 a Zona térmica 3 (ZT 3) e quarto 2 a Zona térmica 4 (ZT 4).

Para que a ferramenta de otimização pudesse ser testada em diferentes condições climáticas, foram utilizados dados (.epw) climáticos e temperaturas do solo médias mensais das cidades Caxias do Sul (Zona bioclimática 1), Brasília (Zona bioclimática 4) e Picos (Zona bioclimática 7).

A escolha dessas cidades se deu pelo fato da grande diferença bioclimática entre elas, fazendo com que os resultados obtidos pela ferramenta de otimização pudessem ser analisados e comparados entre si pois, esperam-se resultados bem distintos uns dos outros.

Além das diferentes cidades utilizadas, realizaram-se testes para avaliar a influência de se introduzir nos estudos a altura piso-teto e altura das janelas da habitação.

Os valores de consumo máximo utilizado para normalizar a função consumo é igual a 1500 kWh/(m<sup>2</sup> ano) para Brasília e 3000 kWh/(m<sup>2</sup> ano) para Caxias do Sul e Picos. Foram escolhidos os maiores valores de consumo após a realização de várias simulações da ferramenta. Os valores de desconforto máximo utilizado para normalizar a função desconforto é igual a 100%.

Os casos estudados são os seguintes:

- Caso 0, avaliar a melhor composição da função multiobjetivo através das seguintes simulações: Min Consumo (minimização apenas de consumo), Min Desconforto (minimização apenas de desconforto), e Min Consumo e desconforto (minimização simultânea de consumo e desconforto).

- Caso 1, simulação utilizando a cidade de Brasília, problema de otimização composto pelas restrições de desigualdades (10 a 15), mantendo altura piso-teto fixada em 2,6 m.

- Caso 2, simulação utilizando a cidade de Brasília, problema de otimização composto pelas equações (10 a 15) e com inserção da otimização da altura piso-teto (eq. 16).

- Caso 3, simulação utilizando a cidade de Brasília, problema de otimização composto pelas equações (10 a 16) e com inserção da otimização da altura das janelas (eq. 17).

- Caso 4, simulação utilizando a cidade de Caxias do Sul, problema de otimização composto pelas equações (10 a 17).

- Caso 5, simulação utilizando a cidade de Picos, problema de otimização composto pelas equações (10 a 17).

Os limites máximos e mínimos de transmitância térmica para cada cidade analisada conforme NBR 15220 estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites máximos e mínimos de transmitância térmica conforme NBR 15220

	Caxias do Sul ZB1	Picos ZB7	Brasília ZB4
Transmitância térmica parede	≤ 2,5	≤ 1,85	≤ 1,85
Transmitância térmica cobertura	≤ 0,7	≤ 2	≤ 2

Fonte: Autores

A partir dos limites de transmitâncias máximas, calcularam-se os valores de espessuras mínimas necessárias para satisfazer a norma NBR 15220 para cada cidade considerada. Todos os limites utilizados nos estudos para cada cidade estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites máximos e mínimos de todas as variáveis de otimização para cada cidade

Limites	Caxias do Sul ZB1	Picos ZB7	Brasília ZB4
$e_{cer}^{min}$	0.14	0.24	0.24
$e_{cer}^{max}$	0.40	0.40	0.40
$AP^{min}$	0.2	0.2	0.2
$AP^{max}$	0.9	0.9	0.9
$e_{EPS}^{min}$	0.045	0.015	0.015
$e_{EPS}^{max}$	0.15	0.15	0.15
$AC^{min}$	0.2	0.2	0.2
$AC^{max}$	0.9	0.9	0.9
$e_{conc}^{min}$	0.1	0.1	0.1
$e_{conc}^{max}$	0.25	0.25	0.25
$Or^{min}$	00	00	00
$Or^{max}$	3150	3150	3150
$h^{min}$	2.6	2.6	2.6
$h^{max}$	3.3	3.3	3.3
$h_j^{min}$	2.1	2.1	2.1
$h_j^{max}$	3.2	3.2	3.2

Fonte: Autores

A Tabela 3 apresenta os resultados dos valores da função objetivo (FO) composta pelo consumo e/ou desconforto; das espessuras e transmitâncias da parede, cobertura e piso; das absortâncias e orientação cardeal. Para este Caso 0, foi utilizada a cidade de Brasília e o problema de otimização utilizado é composto pelas restrições de desigualdade apresentadas nas eq. (10 a 15), mantendo a altura piso-teto fixada em 2,6 m.

Tabela 3 - Caso 0 - Avaliação da composição da função multiobjetivo.

Caso	FO	Consumo (kWh/m <sup>2</sup> ano)	Desc. (%)	TTP (W/m <sup>2</sup> K)	$e_{cer}$ (m)	TTC (W/m <sup>2</sup> K)	$e_{EPS}$ (m)	$e_{conc}$ (m)	AP	AC	Or. (°)
Cons.	0,671	1007,83	91,61	1,3072	0,40	0,2416	0,150	0,25	0,9	0,6	0
Desc.	0,477	1180,78	47,75	1,8625	0,24	1,3089	0,015	0,10	0,2	0,2	225
Cons. e Desc.	1,367	1103,38	63,15	1,3072	0,40	1,3089	0,015	0,25	0,2	0,2	225

Fonte: Autores

Segundo a Tabela 3, percebe-se o seguinte:

- quando se minimizou apenas o consumo, obteve-se o menor valor de consumo de energia elétrica (1007,83 kWh/m<sup>2</sup> ano), mas em contrapartida, o maior valor de desconforto (91,61%);

- quando se minimizou apenas o desconforto, obteve-se o menor valor de desconforto (47,75%), mas em contrapartida, o maior valor de consumo (1180,78 kWh/m<sup>2</sup> ano);

- quando se minimizou o consumo e o desconforto conjuntamente, houve um compromisso entre minimizar desconforto e consumo, com obtenção de valores de desconforto 68,93% menor que o pior caso e um consumo 9,48% menor que o pior caso. Assim, com o uso dos 2 critérios simultaneamente, conseguiu-se obter valores com um melhor comprometimento entre eles, sendo esta combinação a utilizada para as simulações seguintes.

Basicamente, a solução que minimiza consumo e desconforto, optou por uma combinação (em relação ao caso que só minimiza consumo, por exemplo) que diminuiu o uso para apenas 1 placa de EPS para a cobertura (ao invés de 10 placas) e diminuiu as absorvâncias da parede e da cobertura de 0.9 para 0.2.

A Tabela 4 apresenta os resultados dos valores da função objetivo (FO), consumo e desconforto e das espessuras da parede, cobertura e piso, absorvâncias e orientação, mantendo a altura piso-teto fixa em 2,6 m (Caso 1) e adicionando o ajuste da altura piso-teto (Caso 2).

Tabela 4 - Caso 1 e 2 - Desempenho para cidade de Brasília com ajuste de espessuras da parede, cobertura e piso, absorvâncias e orientação com e sem controle da altura piso-teto.

Caso	FO	Consumo (kWh/m <sup>2</sup> ano)	Desc. (%)	TTP (W/m <sup>2</sup> K)	<i>e<sub>cer</sub></i> (m)	TTC (W/m <sup>2</sup> K)	<i>e<sub>EPS</sub></i> (m)	<i>e<sub>conc</sub></i> (m)	AP	AC	Or. (°)	h (m)
1	1,36713	1103,38	63,15	1,3072	0,40	1,3089	0,015	0,25	0,2	0,2	225	2,60
2	1,2189	1108,81	47,97	1,8353	0,25	1,3089	0,015	0,25	0,2	0,2	225	3,25

Fonte: Autores

Segundo a Tabela 4, ao se minimizar a altura piso-teto, obteve-se um pequeno aumento de 0,48% no consumo anual da casa (de 1103,38 para 1108,81 kWh/m<sup>2</sup>.ano) e uma diminuição de 31.6% no desconforto térmico (de 63.15 para 47.97%) ao inserir a otimização da altura piso-teto, que foi alterada de 2,6 m para 3,25 m; além da diminuição da espessura da parede (de 0,4 para 0,25 m).

A Tabela 5 apresenta os resultados dos valores da função objetivo (FO), consumo e desconforto; das espessuras da parede, cobertura e piso, absorvâncias, orientação, altura piso-teto (Caso 2) e adição das alturas das janelas (Caso 3).

Tabela 5 - Caso 2 e 3 - Desempenho para cidade de Brasília com ajuste de espessuras da parede, cobertura e piso, absorvâncias e orientação, altura piso-teto, com e sem controle da altura das janelas.

Caso	FO	Consumo (kWh/m <sup>2</sup> ano)	Desc. (%)	TTP (W/m <sup>2</sup> K)	<i>e<sub>cer</sub></i> (m)	TTC (W/m <sup>2</sup> K)	<i>e<sub>EPS</sub></i> (m)	<i>e<sub>conc</sub></i> (m)	AP	AC	Or. (°)	h (m)
2	1,2189	1108,81	47,97	1,8353	0,25	1,3089	0,015	0,25	0,2	0,2	225	3,25
3	1,1957	1134,54	43,93	1,3072	0,40	1,3089	0,015	0,10	0,2	0,2	135	3,30

Fonte: Autores

Segundo a Tabela 5, ao se minimizar a altura piso-teto juntamente com o tamanho das janelas, obtiveram-se um pequeno aumento no consumo na ordem de 2,6% (de 1108,81 para 1134,54 kWh/m<sup>2</sup> ano) e uma diminuição no desconforto térmico na ordem de 9,1%. Uma série de ajustes sistêmicos foram feitos para se melhorar a FO, tais como o aumento na espessura da parede (de 0,25 para 0,4 m), a diminuição na espessura do piso (de 0,25 para 0,10 m) e a orientação (de 225 para 135°).

A Tabela 6 apresenta as dimensões originais e otimizadas das janelas. Para todas as janelas, as áreas aumentaram para que houvesse diminuição de desconforto térmico.

Tabela 6 - Casos 3 – Dimensões originais e otimizadas das janelas - Brasília

Janelas	Altura Original (m)	Área Original (m <sup>2</sup> )	Altura Otimizada (m)	Área Otimizada (m <sup>2</sup> )
Janela 1	2,1	1,68	2,2897	1,9456
Janela 2	2,1	1,68	3,0697	3,0376
Janela 3	2,1	2,16	2,8404	3,4927
Janela 4	2,1	0,48	2,9111	0,8044
Janela 5	2,1	0,48	2,8542	0,7817

Fonte: Autores

A escolha da melhor solução depende de uma análise de custos e da prioridade do projetista quanto a escolher a solução com o menor consumo ou menor desconforto.

As próximas análises se concentram em comparar diferentes resultados obtidos para 3 cidades localizadas em zonas climáticas bem diferentes, Brasília, Caxias do Sul e Picos.

A Tabela 7 apresenta os valores de consumo e desconforto para as cidades de Brasília, Caxias do Sul e Picos considerando todas as possíveis variáveis de otimização.

Tabela 7 - Casos 3, 4 e 5 - Desempenho para as cidades de Brasília, Picos e Caxias do Sul com ajuste de espessuras da parede, cobertura e piso, absorvâncias e orientação, altura piso-teto e altura de janelas

Caso	FO	Consumo (kWh/m <sup>2</sup> ano)	Desc. (%)	TTP (W/m <sup>2</sup> K)	$e_{cer}$ (m)	TTC (W/m <sup>2</sup> K)	$e_{EPS}$ (m)	$e_{conc}$ (m)	AP	AC	Or. (°)	h (m)
Brasília	1,1957	1134,54	43,93	1,3072	0,40	1,3089	0,015	0,10	0,2	0,2	135	3,3
Caxias	1,100	2200,67	36,66	1,3072	0,40	0,2416	0,150	0,25	0,2	0,2	0	2,6
Picos	1,7005	3053,29	68,27	1,8625	0,24	1,3089	0,015	0,25	0,9	0,9	0	2,6

Fonte: Autores

A Tabela 8 apresenta as dimensões otimizadas das janelas quando a habitação está localizada nas cidades de Brasília, Caxias do Sul e Picos, considerando todas as possíveis variáveis de otimização.

Tabela 8 - Casos 3, 4 e 5 – Dimensão das janelas considerando todas as variáveis de otimização – Brasília, Caxias do Sul e Picos

Janelas	Altura (m)			Área (m <sup>2</sup> )		
	Brasília	Caxias	Picos	Brasília	Caxias	Picos
Janela 1	2,2897	2,6568	2,2334	1,9456	2,4596	1,8668
Janela 2	3,0697	3,0579	2,4850	3,0376	3,0211	2,2190
Janela 3	2,8404	2,3302	2,4545	3,4927	2,5744	2,7982
Janela 4	2,9111	3,0365	2,4867	0,8044	0,8546	0,6346
Janela 5	2,8542	2,7792	2,1026	0,7817	0,7517	0,4810

Fonte: Autores

Segundo a Tabela 8, observa-se que a cidade de Picos, localizada na zona bioclimática ZB7, apresenta piores condições de consumo e desconforto, o que exigiu menores dimensões de espessuras de parede e cobertura; maiores valores de absorvância solar (0,9), menores valores de altura piso-teto (2,6 m) e menores dimensões de janelas.

Ao se simular o problema de otimização com diferentes combinações de critérios de otimização, verificou-se que caso se otimize apenas o consumo elétrico, obteve-se níveis de conforto térmico muito altos, ou se for otimizado apenas o conforto térmico, obteve-se valores muito altos de consumo elétrico. Assim, a combinação de consumo e desconforto buscou equalizar os benefícios de ambos critérios de eficiência energética.

Quanto aos resultados obtidos, verificou-se que à medida que se vai incrementando novos ajustes (como altura piso-teto e dimensão das janelas) o desempenho final do projeto vai



umentando, materializado pelo valor da função objetivo (FO), proporcionando gradativamente menor consumo ou menor desconforto a partir de decisões de projeto simples.

Ao se avaliar o impacto do nível de eficiência para diferentes zonas bioclimáticas, pode-se validar os resultados, pois para condições climáticas mais extremas, a ferramenta computacional desenvolvida optou por menores dimensões de espessuras de parede e cobertura; maiores valores de absorvância solar, menores valores de altura piso-teto e menores dimensões de janelas, como o esperado.

## 5. CONCLUSÃO

Este artigo formulou um problema de otimização capaz de ajustar parâmetros físicos de uma habitação de interesse. Os critérios de avaliação foram minimização de consumo de energia elétrica e do desconforto térmico, que foram tratados como um problema de critério global, o qual permitiu apresentar uma solução única que contemplasse um melhor compromisso entre os dois critérios de otimização.

As variáveis de otimização utilizadas foram posição cardinal da habitação, espessuras de materiais que compõem paredes externas, cobertura e piso, absorvância das paredes externas e cobertura, altura piso-teto e tamanho das janelas.

Diferentemente de outros trabalhos, optou-se por ajustar diretamente as espessuras das paredes, cobertura e piso ao invés de otimizar suas transmitâncias térmicas (como em LEITZKE et al., 2021), para já se obter valores de espessuras factíveis, cujos limites físicos foram calculados de modo a satisfazer os limites de transmitâncias térmicas por zona climática (Tabelas 3 e 4). Além disto, incluiu-se a otimização da altura piso-teto e das janelas, como mais um instrumento para se aumentar a eficiência energética do projeto.

Para avaliação da eficiência energética foi utilizado o *software* EnergyPlus, o qual é muito difundido para realização deste tipo de análise.

A linguagem de programação escolhida foi o Python devido ao aplicativo EPPY (ambos gratuitos), que permite comunicação de dados entre o Python e o *software* EnergyPlus.

A técnica dos Algoritmos Genéticos (AG) para solução do problema de otimização foi escolhida pois ela é a mais citada na literatura, mas qualquer outra técnica poderia ter sido utilizada, pois o interesse maior é quanto à formulação do problema e não como ele é resolvido. Por exemplo, outra técnica como Evolução Diferencial poderia ter sido utilizada obtendo-se resultados similares.

Conforme discussão dos resultados, conclui-se que a ferramenta computacional desenvolvida supre necessidades para universalização de uso de técnicas simples de eficiência energética de modo sistêmico que pode ser aplicada para qualquer tipo de habitação, de maneira automática (sem falhas na obtenção de soluções realizadas manualmente), fornece uma solução ótima factível (além das soluções Pareto-Ótimo, também contidas ao final da última geração) e facilita a tomada de decisão nas fases iniciais de um projeto de construção, a fim de aumentar sua eficiência energética e assim a sustentabilidade ambiental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). AÇÕES PARA PROMOÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS EDIFICAÇÕES BRASILEIRAS: NO CAMINHO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. Nota Técnica, 2020.

BAVARESCO, M. V.; CUCHIVAGHE, H. Y. O.; SCHINAZI, A.; GHISI, E. Aspectos impactantes no desempenho energético de habitações de interesse social brasileiras: revisão de literatura. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, 2021, p. 263-292. doi.org/10.1590/s1678-86212021000100505.

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, 2017, p. 283-294. doi. org/10.1016/j.enbuild.2017.08.002.

COELLO, C.A.C. An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques. **ACM Computing Surveys**, Vol 32, no 2, 2000, p. 109-143. doi.org/10.1145/358923.358929.

DELGRAM, N.; SAJADI, B.; DELGRAM, S. Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony (ABC). **Energy and Buildings**, v. 131, 2016, p. 42-53. doi:10.1016/j.enbuild.2016.09.003.

DIDONÈ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações, **Ambient. constr.** 10 (4), 2010. doi.org/10.1590/S1678-86212010000400010.

ENERGYPLUS, Disponível em: <https://energyplus.net/downloads>.

FERDYN-GRYGIUREK, J.; GRYGIUREK, K. Optimization of window size design for detached house using TRNSYS simulations and Genetic Algorithm. **Architecture, Civil Engineering, Environment**, vol.10, no.4, 2017, p. 133-140. doi.org/10.21307/acee-2017-057.

GRYGIUREK, K.; FERDYN-GRYGIUREK, J. Multi-variable optimization models for building envelope design EnergyPlus simulation and metaheuristic algorithms. *Architecture Civil Engineering Environment*, no. 2/2019. doi: 10.21307/ACEE-2019-0.

KAPSALAKI, M.; LEAL, V.; SANTAMOURIS, M. A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings. **Energy and Buildings** Volume 55, 2012, p. 765-778, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.022>.

LEITZKE, R. K.; CUNHA, E. G.; MACIELI, T. S.; DEMBINSKI, F. M. D.; PRESTES, I. B. Algoritmo para análise evolutiva multiobjetivo em simulações termo energéticas. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.16, n.1, 2021, p.24-42. doi.org/10.116/gtp.v16i1.164048.

LEITZE, R. K.; CUNHA, E. G.; SCHRAMM, F. K.; CORREA, C. M. B.; FERRUGEM, A. P. Idmofidier: Aplicação para parametrização das propriedades de configuração do EnergyPlus, **XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Por Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020.

NGUYENA, A.T.; REITERA, S.; RIGOB, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy** 113, 2014, p. 1043–1058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>.

OLIVEIRA, L. S. Avaliação dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos da NBR 15220-3, para habitações de interesse social, da Zona Bioclimática 2.168f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas. 2012.

PHILIP, S.; TANJUATCO, L. Eppy: scripting language for E+. EnergyPlus (version 0.46). Disponível em: <https://pypi.org/project/eppy/>, v.0.5.63.

RABELO, P. G.; OCHI, L. S. Um Novo Algoritmo Genético Híbrido para o Problema do Caixeiro Viajante com Grupamento. **Anais do Simpósio Brasileiro de Redes Neurais**, Vol. 1, 1996, p. 83–90.

SOUZA, J. **Energy simulation software for buildings: review and comparison**. Engineering, Computer Science, Porto, Portugal, 2012.

YUAN, X.; KARBASFOROUUSAHHA; M. A., SYAH, R. B. Y.; KHAJEZHADDEH, M.; KEAWSAWASVONG, S.; MONCEF, L. N. An Effective Metaheuristic Approach for Building Energy Optimization Problems Buildings, 2023, 13(1), 80; doi.org/10.3390/buildings13010080.