OTIMIZAÇÃO DE EDIFÍCIO ENVIDRAÇADO ATRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO PARA A REDUÇÃO DA DEMANDA ENERGÉTICA

Amanda Rosa de Carvalho (1); Maurício Carvalho Ayres Torres (2); Betina Tschiedel Martau (3)
(1) Doutoranda em Arquitetura, Arquiteta e Urbanista, amandarosadc@gmail.com
(2) Doutor em Engenharia, Arquiteto e Urbanista, mauricio.torres@ufrgs.br
(3) Doutora em Engenharia, Arquiteta e Urbanista, betina.martau@ufrgs.br
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura, Avenida Sarmento Leite, 320 – Bairro Centro, Porto Alegre - RS

RESUMO
Para evitar o aumento na demanda energética de climatização é necessário considerar as melhores combinações entre diferentes variáveis de projeto. Adotar a otimização multiobjetivo nas simulações computacionais pode acelerar a seleção dessas combinações. O objetivo deste estudo piloto foi apresentar um método de otimização multiobjetivo para redução da demanda energética de climatização artificial de um edifício, com fachadas predominantemente envidraçadas e inserido na Zona Bioclimática 3 do Brasil. A modelagem tridimensional desse edifício foi realizada através do *software Rhinoceros 7,* enquanto sua parametrização e simulação foram executadas através do *plugin Ladybug Tools*. Já a otimização multiobjetivo foi executada através do *plugin Octopus*, utilizando o algoritmo *SPEA-2*. Para obter a menor demanda energética de climatização, as funções-objetivo analisadas foram menor demanda energética de aquecimento e resfriamento. As variáveis modificadas foram transmitância térmica do vidro, e profundidade e distância dos brises. As variáveis modificadas foram transmitância térmica do vidro, e profundidade e distância dos brises. A melhor solução reduziu em 8,9% a demanda energética de resfriamento, aumentou em 97,9% na demanda energética de aquecimento, e reduziu em 8,8% na demanda energética total. Das 500 combinações que tardaram quatro dias até finalizarem, 20 foram consideradas ótimas. Esses resultados indicam que aplicar otimização multiobjetivo em análise de desempenho termo energético em edificações com fachadas predominantemente envidraçadas, é extremamente eficiente, pelo potencial de combinar automaticamente diferentes variáveis e identificar melhores combinações para parâmetros que se influenciam negativamente.
Palavras-chave: otimização multiobjetivo, demanda de energia, fachadas envidraçadas.

ABSTRACT
To avoid an increase in air conditioning energy demand, it is necessary to consider the best combinations between different design variables. Adopting multi-objective optimization in computer simulations can speed up the selection of these combinations. The objective of this pilot study was to present a multi-objective optimization method to reduce the energy demand of artificial air conditioning of a building, with predominantly glazed facades and inserted in the Bioclimatic Zone 3 of Brazil. The three-dimensional modeling of this building was carried out using the Rhinoceros 7 software, while its parameterization and simulation were performed using the Ladybug Tools plugin. The multi-objective optimization was performed through the Octopus plugin, using the SPEA-2 algorithm. To obtain the lowest energy demand for air conditioning, the objective functions analyzed were the lowest energy demand for heating and cooling. The modified variables were thermal transmittance of the glass, and depth and distance of the brises. The modified variables were thermal transmittance of the glass, and depth and distance of the brises. The best solution reduced the cooling energy demand by 8.9%, increased the heating energy demand by 97.9%, and reduced the total energy demand by 8.8%. Of the 500 combinations that took four days to complete, 20 were considered optimal. These results indicate that applying multi-objective optimization in thermal energy performance analysis in buildings with predominantly glazed facades is extremely efficient, due to the potential to automatically combine different variables and identify better combinations for parameters that negatively influence each other.
Keywords: multi-objective optimization, energy demand, glazed facades.

1. INTRODUÇÃO

Dados fornecidos pelo Sexto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (2021) mostraram que as mudanças climáticas elevaram significativamente a temperatura global do planeta. Esse aumento de temperatura ampliou o uso de sistemas de climatização artificial para melhorar o conforto térmico nos edifícios (CABEZA *et al.*, 2022). Consequentemente, a demanda energética de resfriamento das edificações intensificou, contribuindo com o aumento da demanda energética global. Com esse cenário, o IPCC (2021) alerta da possibilidade das crises energéticas se tornarem mais frequentes no futuro e, para impedir isso, é necessário que as edificações sejam mais adaptadas ao clima no qual estão inseridas.

Segundo Maciel (2021) para adaptar as edificações ao clima local é necessário considerar as melhores combinações entre diferentes variáveis de projeto, como absortância solar, fator solar do vidro, percentual de abertura das janelas, e transmitância e capacidade térmica dos materiais. Ou seja, as escolhas de materiais com propriedades físicas adequadas devem ser realizadas considerando as melhores combinações de soluções para o clima e a localização das edificações. Todavia, encontrar uma solução é um desafio, pois são diversas combinações possíveis entre as variáveis de projeto.

A parametrização das alternativas por *software* de simulação possibilita combinar variáveis de forma mais precisa e eficiente, mas ainda apresenta limitações em relação à escolha de soluções compatíveis para a redução da demanda energética das edificações. O processo humano de selecionar os materiais e componentes a serem parametrizados individualmente limita as possibilidades de combinações e resultados para análises. Uma possível solução para esse problema é transferir a função humana para a máquina, automatizando esse processo complexo de análise multivariável. Nesse sentido, a otimização multiobjetivo nas simulações computacionais tem o potencial de agilizar o processo de combinação para encontrar a melhor solução para um edifício específico.

A otimização multiobjetivo encontra os melhores conjuntos de soluções para duas ou mais funções-objetivo, através de Algoritmos Evolutivos (AEs) ou Algoritmos Genéticos (AGs), inseridos nos princípios de Inteligência Artificial (IA) (LEITZKE, 2021). Dessa maneira, um maior número de combinações entre variáveis é proporcionado e analisado em um único processo automático. Essa otimização reduz o tempo de análises combinatórias, pois utiliza ou AEs ou AGs baseados na seleção natural e evolução das espécies (GOSSARD; LARTIGUE; THELLIER, 2013). Nesse processo é incluso a variabilidade genética resultante de mutação, cruzamento e herança genética. Através disso, é possível descobrir os indivíduos mais adaptados a determinados objetivos (NAJI; AYE; NOGUCHI, 2021).

A adoção do conceito da Fronteira de Pareto pode auxiliar no descobrimento de soluções combinadas mais eficientes. Pilechiha *et al.* (2020) explicam que a Fronteira de Pareto se inicia com uma população mãe não dominada. Essa população é sujeita a cruzamento e seus descendentes sofrem recombinações e mutações genéticas. Em seguida, os melhores descendentes são selecionados para substituir a população original. Esse processo é repetido nas gerações seguintes até se chegar a um conjunto de soluções satisfatórias aos objetivos propostos. A Figura 1 mostra exemplos de simulações que utilizaram AEs para definir as melhores combinações de parâmetros através da Fronteira de Pareto.

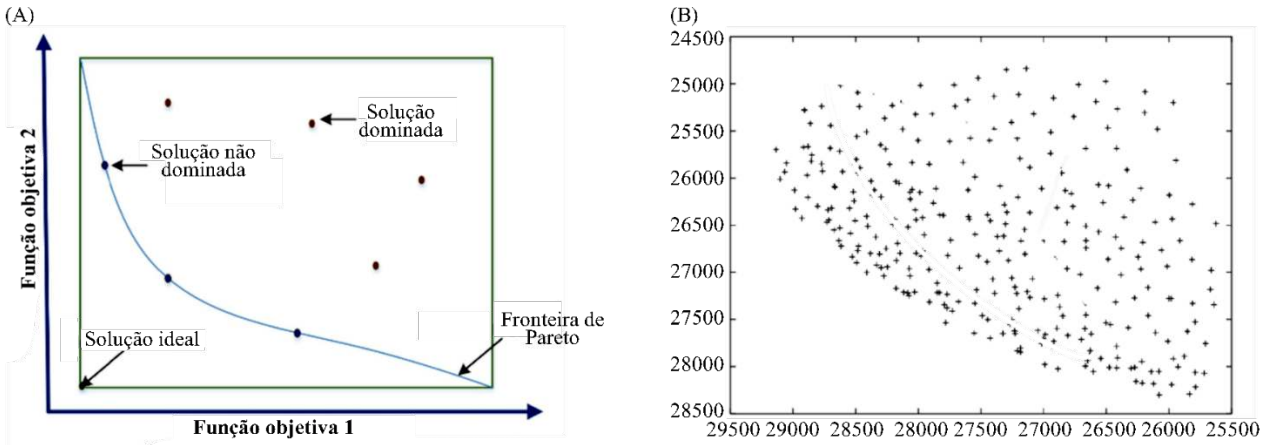


Figura 1 – Fronteira de Pareto: (A) Explicação (PILECHIHA *et al.*, 2020); (B) Exemplo (ZITZLER *et al.*, 2001).

Alguns pesquisadores aplicaram a otimização multiobjetivo em simulações de desempenho termo energético da edificação, como Vukadinović *et al.* (2021), que procuraram melhorar o desempenho termo energético de edifícios em Naissus, na Sérvia. Nesse processo, o *software DesignBuilder* permitiu usar o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) no fluxo de otimização (Figura 2). As variáveis analisadas

foram sistemas de vedação vertical externos, relação de área janela-parede, tipo de vidro e sistemas de sombreamento de aberturas. Ao término das 4.000 simulações, identificou-se 88 combinações adequadas aos cenários estipulados. Ao comparar as soluções, os autores identificaram que a melhor combinação de parâmetros reduziu em 27% a demanda energética da edificação. Ademais, a melhor solução também reduziu em 10% a demanda energética para aquecimento, minimizando o número de horas em desconforto térmico.

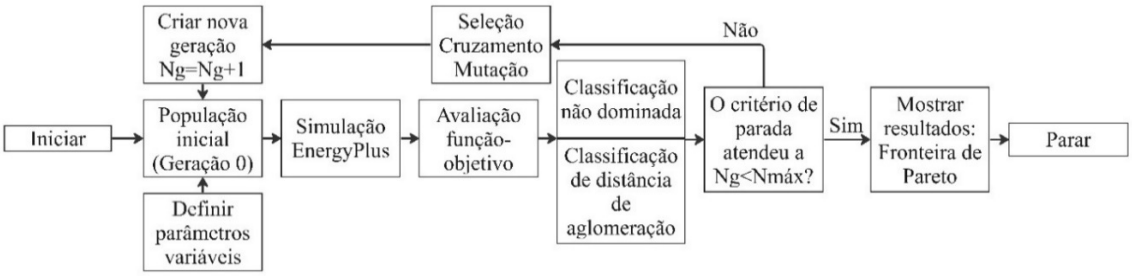


Figura 2 – Fluxograma da otimização NSGA-II adaptado (VUKADINOVIĆ *et al.*, 2021).

Pilechiha *et al.* (2020) procuraram maximizar o desempenho energético, a iluminação natural e a qualidade de visão de um escritório, considerando diferentes sistemas de janelas, através de uma otimização multiobjetivo por simulação computacional. Eles usaram o *Hypervolume Algorithm for Multiobjective Optimization (HypE)* para a otimização, presente no *plugin Octopus (Grasshopper)*. As variáveis modificadas foram acesso de visão, ângulo de visão, profundidade de visão e fator de visualização, totalizando 1.400 modelos analisados. A melhor combinação encontrada aumentou em 2,16% a carga de aquecimento e em 4% a iluminação artificial. Entretanto, essa solução reduziu a carga de resfriamento em 6,62%. O consumo de energia total da edificação foi de 79,52kWh/m², representando 14,4% a menos se comparado com o modelo com maior consumo.

Um dos poucos estudos que utilizou a otimização multiobjetivo para determinar formas da edificação considerando possíveis mudanças climáticas foi realizado por Javanroodi, Nik e Adl-Zarrabi (2020). As funções-objetivo definidas foram demandas anuais de resfriamento e aquecimento, tendo como variáveis otimizadas a forma urbana, a orientação solar e a transparência da edificação. Para realizar essa pesquisa, os autores definiram um algoritmo próprio de otimização, usando dados meteorológicos que representavam a cidade de Atenas, na Grécia, no período de 2010 a 2099. Ao término das simulações, foram obtidos 67 modelos considerados resilientes às mudanças climáticas futuras, pois reduziram a demanda de energia em torno de 33%.

Wu e Zhang (2022) utilizaram a otimização multiobjetivo para avaliar um sistema de compensação (*trade-off)* entre consumo de energia, iluminação natural interna e conforto térmico de uma sala de escritórios, na China. Nesse processo, foi utilizado o *plugin Octopus (Grasshopper/Rhinoceros*), que permitiu fazer a otimização através do *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (*SPEA-2*). As variáveis modificadas foram espessuras de paredes, relação janela-parede, coeficiente de ganho de calor solar e profundidade de persiana. Através das 5.000 simulações realizadas, a melhor solução apresentou 70 kWh/m²/ano de Intensidade de Uso de Energia (EUI) e redução de 1,72% de Densidade de Iluminação de luz do dia (UDI).

Wu, Wei e Wang (2022) procuraram estratégias para melhorar a qualidade de iluminação natural e diminuir o consumo de energia em casas localizadas na província de Guangdong, na China. A otimização multiobjetivo foi baseada em um algoritmo genético não especificado pelos autores. As variáveis modificadas foram tipo de vidro, relação janela-parede, conjunto de sombreamento, espessura de isolamento do telhado, camada de isolamento e espessura da parede externa, tipo de parede interna e camada estrutural. Os resultados demostraram que a escolha de materiais mais adequados otimizou o desempenho energético da edificação. A melhor relação janela-parede otimizou a iluminação natural interna, sendo possível reduzir em 38,4% a demanda de energia e aumentar em 17,2% a iluminação natural.

Uma visão geral de estudos anteriores sobre otimização multiobjetivo em projetos e construções de edificações foi apresentada por Vukadinović *et al.* (2021) e Wu e Zhang (2022). Essas análises, juntamente com os autores anteriormente citados, permitiram identificar convergências e lacunas de conhecimento na utilização da otimização multiobjetivo no desempenho termo energético das edificações.

Em relação as convergências, as funções-objetivo mais analisadas eram mínimas EUI, máximas UDI e mínimos desconfortos térmicos. Já as variáveis mais otimizadas englobavam elementos de sistemas de fachadas, como isolamentos, tipos de materiais, espessuras, porcentagens de aberturas de áreas transparentes, tipos de vidros e sombreamentos. Também foi possível identificar que alguns autores, como Javanroodi, Nik e Adl-Zarrabi (2020), We e Zhang (2022), Wu, Wei e Wang (2022) e Pilechiha *et al.* (2020), usaram a mesma ferramenta nas otimizações multiobjetivo, sendo ela o *plugin Octopus* (*Grasshopper/Rhinoceros*).

Normalmente esse *plugin* foi utilizado juntamente com outros *plugins* e *softwares* de modelagem e parametrização, como *Ladybug Tools, EnergyPlus e Radiance*, todos possíveis de serem utilizados no *Grasshopper (Rhinoceros)*.

Em relação as lacunas de conhecimento, nota-se a inexistência de um método consolidado e amplamente aceito para aplicar a otimização multiobjetivo nas análises de desempenho das edificações. Isso ocorre por diferentes fatores, como falta de consenso em relação ao algoritmo a ser adotado na otimização, homogeneidade das tipologias construtivas analisadas, simplificação dos estudos e localização das edificações estudadas.

Apesar de os algoritmos *NSGA-II, HypE* e *SPEA-2* serem os mais recorrentes nessas otimizações, ainda não se chegou a um consenso sobre qual algoritmo seria o mais eficiente para realizar as análises de desempenho termo energético das edificações. Isso ocorre devido à variação da utilização do algoritmo conforme a ferramenta de otimização, o aprofundamento teórico da linguagem computacional adotada e os objetivos de pesquisa.

A homogeneidade das tipologias construtivas analisadas é outro fator na lacuna de conhecimento. Analisando os autores citados e seus trabalhos, constatou-se que a maioria dos estudos, até o momento, avaliaram construções tradicionais. Essas, por sua vez, eram majoritariamente opacas e compostas por materiais tradicionais, como tijolo cerâmico e concreto armado. Isso indica que edificações com técnicas construtivas mais modernas e fachadas predominantemente envidraçadas ainda não foram estudadas.

A falta de um processo de simplificação das zonas térmicas das edificações também contribuiu com a lacuna do conhecimento. Maciel (2021) e Leitzke (2021) demonstraram que simplificar a edificação é essencial no processo de otimização, pois quanto mais complexo o modelo, mais horas de processamento serão necessárias nas simulações. Esses autores simplificaram as zonas térmicas de suas edificações conforme as zonas de funções. Todavia, Javanroodi, Nik e Adl-Zarrabi (2020), Pilechiha *et al.* (2020) e Wu e Zhang (2022) simplificaram seus estudos em uma única zona térmica representativa, com variações de localização em relação à envoltória da edificação.

Além disso, os estudos de otimização multiobjetivo aplicados às edificações citadas foram realizados predominantemente no hemisfério norte do planeta, mais especificadamente nos continentes europeu e asiático, indicando uma carência de estudos em outros continentes, principalmente em áreas localizadas no hemisfério sul.

Há estudos de otimização multiobjetivo aplicados ao desempenho da edificação no Brasil, como os de Leitzke *et al.* (2018), Leitzke (2021), Maciel (2021) e Maciel *et al.* (2021). Entretanto, eles ainda são iniciais, focados em construções mais tradicionais e em poucas zonas bioclimáticas brasileiras. Até 2022, não foram encontradas pesquisas que adotassem a otimização multiobjetivo para análise de desempenho termo energético em edificações com fachadas predominantemente envidraçadas, principalmente na Zona Bioclimática 3 (ABNT, 2005).

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo piloto foi testar um método de otimização multiobjetivo para redução da demanda energética de climatização artificial de um edifício de escritórios, com fachadas predominantemente envidraçadas e inserido na Zona Bioclimática 3, conforme o zoneamento bioclimático da NBR 15.220 (ABNT, 2005).

3. MÉTODO

O estudo foi dividido em cinco etapas, sendo elas: definição e caracterização do objeto de estudo; definição das funções-objetivo; delimitação das variáveis de otimização; configuração da simulação com otimização multiobjetivo; simulações e definições dos critérios de análise de resultados. A Figura 3 representa o fluxograma dessas etapas, detalhadas posteriormente.

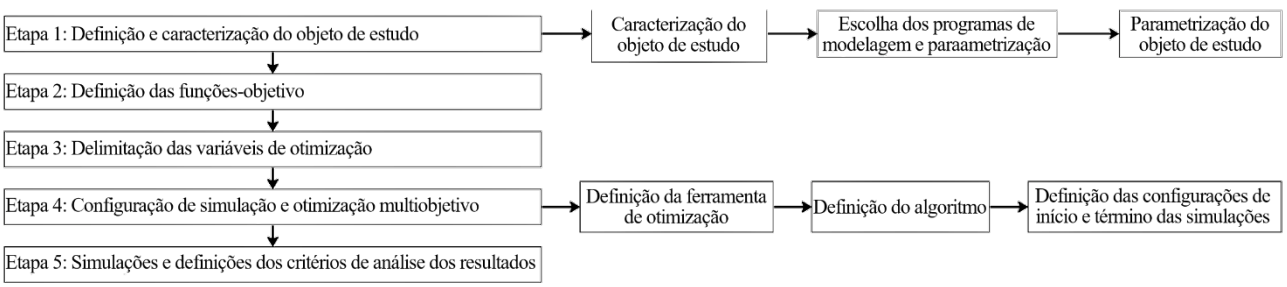


Figura 3 – Fluxograma da otimização multiobjetivo (Autores).

3.1. Definição e caracterização do objeto de estudo

Primeiramente, um objeto de estudo foi definido para atender aos objetivos propostos. Estabeleceu-se um modelo de projeto hipotético de um edifício de escritórios com três pavimentos, com todas as fachadas predominantemente envidraçadas, climatizado artificialmente e localizado em Porto Alegre (RS/Brasil), na Zona Bioclimática 3. Ele possui planta baixa quadrada, com 45 m de lado, 4 m de pé-direito no primeiro pavimento e 3 m de pé-direito nos segundo e terceiro pavimentos, totalizando 10 m de altura. Foram definidas cinco zonas térmicas por andar, sendo 4 zonas periféricas (escritórios) e uma zona central (circulação) (Figura 4). Ao todo, quinze zonas térmicas foram modeladas através do *software Rhinoceros 7*, que foi adotado por permitir o manuseio da ferramenta *Grasshopper.* Essa última é um editor de algoritmo gráfico integrado a modelagem que utiliza linguagem computacional *Python* para edição de parâmetros, além de possibilitar a conexão de outros *plugins* de parametrização e simulação.

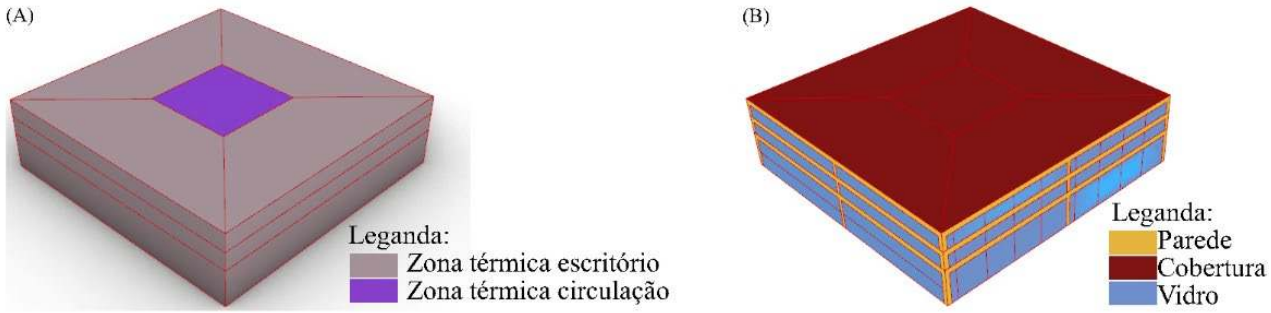


Figura 4 – Representação tridimensional da edificação: (A) zonas térmicas e; (B) elementos construtivos (Autores).

A caracterização do modelo foi feita através do *plugin Ladybug Tools* versão 1.6.0., pois, além de ser a versão mais atualizada do *plugin* usado por alguns autores citados anteriormente, também apresenta conectividade com os *softwares Rhinoceros 7,* para modelagem, e o *OpenStudio,* para simulação energética. As fachadas, por serem predominantemente envidraçadas e atenderem as normas de segurança brasileira, possuem 80% de área transparente e vidro temperado com 5,7(W/m².K) de transmitância térmica, 0,5 de fator solar e 0,4 de transmissão de luz visível. Os sistemas de vedação opacos e estruturais foram constituídos conforme as técnicas tradicionais brasileiras, ou seja, blocos cerâmicos rebocados nos dois lados, piso e entrepiso em laje de concreto e piso cerâmico, sendo que a cobertura é constituída de laje de concreto, câmera de ar ventilada e telha de fibrocimento. A Tabela 1 mostra as características dos elementos construtivos adotados no modelo.

Tabela 1 – Características dos elementos construtivos adotados no objeto de estudo características adaptado (INMETRO, 2022)

Parede externa							
Elementos construtivos	**e (cm)**	**λ (W/(m.K))**	**ρ (kg/m³)**	**c (kJ/(kg.K))**	**Rt ((m².K)/W)**	**Ut (W/(m².K))**	**CTt (kJ/(m².K))**
Argamassa externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,39	150
Bloco cerâmico	1,34	0,90	1600	0,92	0,015		
Câmara de ar	6,32	0,364	-	-	0,175		
Bloco cerâmico	1,34	0,90	1600	0,92	0,015		
Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
Cobertura							
Elementos construtivos	**e (cm)**	**λ (W/(m.K))**	**ρ (kg/m³)**	**c (kJ/(kg.K))**	**Rt ((m².K)/W)**	**Ut (W/(m².K))**	**CTt (kJ/(m².K))**
Telha de fibrocimento	0,800	0,950	1900	0,84	0,0084	2,06	233
Câmara de ar (>5cm)	25,0	1,190	-	-	0,2100		
Laje de concreto (10cm)	10,0	1,75	2200	1,00	0,0571		

Legenda:
e: espessura (cm); λ: condutividade térmica (W/(m.K)); p: peso específico aparente (kg/m³);
c: calor específico (kJ/kg.K); Rt: resistência térmica total ((m².K)/W); Ut: transmitância térmica total (W/(m².k));
CTt: Capacidade térmica total (kJ/(m².K))

Para garantir conformidade com as recomendações nacionais de cargas internas de referência, as cargas térmicas internas foram determinadas conforme os valores recomendados pela Instrução Normativa Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) (INMETRO, 2022) para edifícios de escritórios (Tabela 2).

Tabela 2 – Valores de referência para cargas internas de escritório adaptado (INMETRO, 2022)

DPI (W/m²)	DPE (W/m²)	Ocup. (m²/pessoa)	HO (horas)	DO (Nano)	COP (W/W)	Temp. Set. (°C)
14,1	15	10	8	260	2,6	24

Legenda:
DPI: Densidade de Potência de Iluminação (W/m²); DPE: Densidade de Potência de Equipamento (W/m²);
Ocup.: Ocupação (m²/pessoa); HO: Horas de Ocupação (horas); DO: Dias de Ocupação;
COP: Coeficiente de performance (W/W); Temp. Set.: Temperatura setpoint (°C)

3.2. Definição das funções-objetivo

Uma vez que o objetivo deste estudo foi apresentar um método de otimização multiobjetivo para a redução da demanda energética de climatização, as funções-objetivo definidas foram menor demanda energética de aquecimento e menor demanda energética de resfriamento. Considerando o eixo cartesiano da Fronteira de Pareto e sua função representada pela Equação 1, a solução que mais se aproximasse ao resultado zero foi considerada a melhor solução, enquanto as outras foram consideradas soluções ótimas.

$$\mathrm{DTEC} = \mathrm{DTEA} + \mathrm{DTER} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:
DTEC é a demanda total de energia de climatização [Kwh/m².ano];
DTEA é a demanda total de energia de aquecimento [Kwh/m².ano];
DTER é a demanda total de energia de resfriamento [Kwh/m².ano];

3.3. Delimitação das variáveis de otimização

Como descrito no item 1 deste estudo, as variáveis de maior impacto no desempenho termo energético da edificação englobaram sua envoltória. Considerando os autores citados e o objetivo deste estudo, determinou-se as variáveis modificadas em tipo de vidro e seu sombreamento. Outro motivo da escolha dessas variáveis ocorreu por serem consideradas as mais impactantes nos ganhos térmicos de edificações envidraçadas.

Logo, delimitou-se as transmitâncias térmicas como variáveis para os tipos de vidro. Já para o sombreamento, delimitou-se como variáveis a profundidade dos brises e a distância entre eles. Foram implementados brises fixos horizontais nas fachadas Norte e Sul, e verticais nas fachadas Leste e Oeste. Todavia, no processo de otimização, como o sombreamento muda conforme fachada e horário do dia, essas variáveis foram subdivididas segundo orientação solar, considerando similaridade e diferença entre si. Ou seja, na latitude de Porto Alegre, pode-se definir três orientações distintas, Norte, Sul e Leste/Oeste. Ao todo, sete variáveis foram analisadas e seus intervalos limítrofes foram representados na Tabela 3, sendo esses limites baseados nos autores citados anteriormente.

Tabela 3 – Variáveis de otimização e seus respectivos intervalos limítrofes.

N°	Variável	Limite mínimo	Limite máximo	Intervalo
X1	Transmitância térmica do vidro na fachada (W/(m².K))	2,2	5,7	0,5
X2	Profundidade do brise horizontal na fachada norte (m)	0	1,0	0,5
X3	Profundidade do brise horizontal na fachada sul (m)	0	1,0	0,5
X4	Profundidade do brise vertical na fachada leste/oeste (m)	0	1,0	0,5
X5	Distância entre brises na fachada norte (m)	0,5	1,5	0,5
X6	Distância entre brises na fachada sul (m)	0,5	1,5	0,5
X7	Distância entre brises na fachada leste/oeste (m)	0,5	2,0	0,5

3.4. Configuração da simulação com otimização multiobjetivo

Com a definição das funções-objetivo e variáveis de otimização, o próximo passo foi configurar os padrões para realizar a otimização multiobjetivo. Para isso, foi necessário subdividir essa etapa em: seleção da ferramenta de otimização; seleção do algoritmo e; definições das configurações de início e término das simulações.

Inicialmente, selecionou-se o *plugin Octopus* versão 0.4 como ferramenta para realizar a otimização multiobjetivo. Além de ser o *plugin* mais utilizado pelos autores citados anteriormente, esse *plugin* possui compatibilidade com o *software Rhinoceros 7* e com os *plugins* do *Ladybug Tools*. Assim, há integração entre ferramentas diferentes no mesmo *software*, permitindo que a modelagem, simulação e otimização sejam realizados no mesmo local.

Segundo o manual do *Octopus*, ele possui duas possibilidades de algoritmos para otimização, o *HypE* e *SPEA-2*. Como o *SPEA-2* foi utilizado na otimização de Wu e Zhang (2022), e, segundo Zitzler (2001), possibilita simulações mais rápidas e eficientes, esse algoritmo foi escolhido para ser utilizado nas simulações.

Em relação às definições das configurações de início e término das simulações, optou-se por acelerar o tempo de otimização, simplificando seu processo evolutivo. Dessa maneira, as variáveis de otimização do item 3.2 foram aplicadas em uma população inicial com 10 indivíduos que passaram por processos evolutivos durante 50 gerações até as simulações serem encerradas. Essa quantidade populacional e geracional significa uma evolução de 500 combinações de projeto, número considerado representativo para um estudo piloto. Nesse processo, os indivíduos foram submetidos a 50% de elitismo, 20% de probabilidade de mutação, 90% de mutação e 80% de *crossover*, conforme a configuração pré-definida do *plugin Octopus* e os autores citados neste estudo. A Figura 5 mostra as configurações realizadas no *Octopus*.

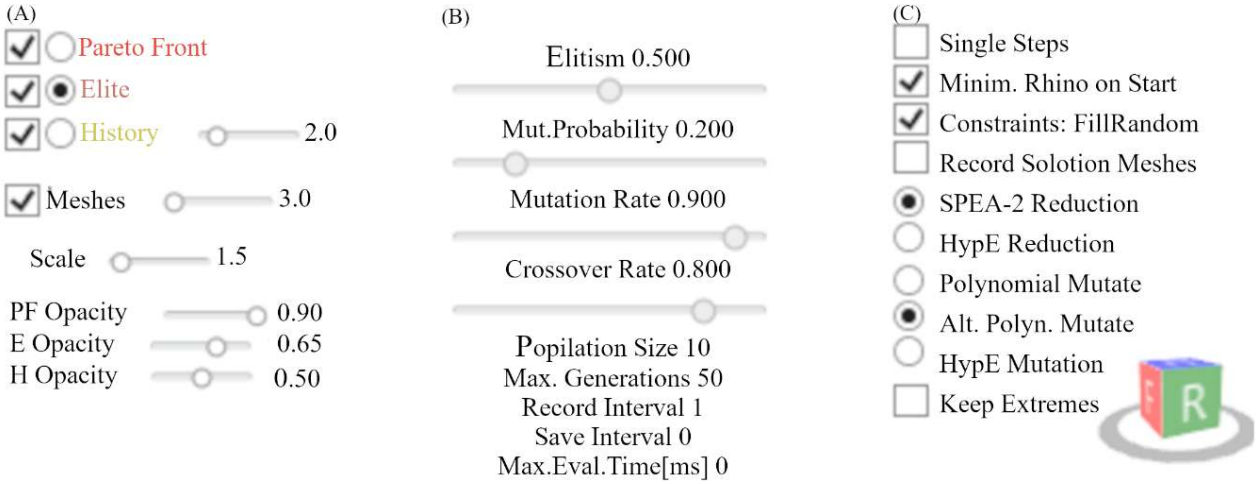


Figura 5 – Configurações adotadas no Octopus: (A) Fronteira de Pareto; (B) Configurações; e (C) Algoritmo (Autores).

3.5. Simulações e definições dos critérios de análise dos resultados

Com todos os critérios definidos, uma primeira simulação foi realizada com a edificação descrita no item 3.1, obtendo-se um modelo de referência para posterior análise comparativa.

Em seguida, esse modelo foi submetido às configurações de simulação com otimização multiobjetivo, descritas no item 3.4. Dos modelos gerados, somente aqueles que formassem a Fronteira de Pareto foram considerados ótimos. O melhor dos modelos foi definido como aquele que mais se aproximasse ao zero de DTEC (Equação 1), conforme descrito no item 3.2. As análises também consideraram a influência das demandas energéticas de aquecimento e resfriamento entre si e perante a DTEC.

4. RESULTADOS

Os resultados das simulações mostraram que a edificação de referência apresentou 497,7kWh/m².ano de demanda energética total, sendo 384kWh/m².ano de resfriamento e 0,3kWh/m².ano de aquecimento. Ao submeter essa edificação ao processo de otimização multiobjetivo, 500 combinações foram geradas, sendo 20 dessas pertencentes a Fronteira de Pareto (Figura 6-A). Nesse processo de otimização, as simulações tardaram aproximadamente quatro dias até finalizarem. Ao término, foi possível estabelecer limites de demanda energética de climatização conforme os resultados energéticos criados a partir das combinações de diferentes variáveis (Figura 6-B). As demandas energéticas de aquecimento ficaram entre 0,3 kWh/m².ano e 1,6 kWh/m².ano, representando um intervalo de 1,3 kWh/m².ano. Já as demandas energéticas de resfriamento ficaram entre 379,4kWh/m².ano e 384kWh/m².ano, representando um intervalo de 4,7 kWh/m².ano. Com esses intervalos, foi possível relacionar as combinações de variáveis com seus impactos nos diferentes consumos energéticos.

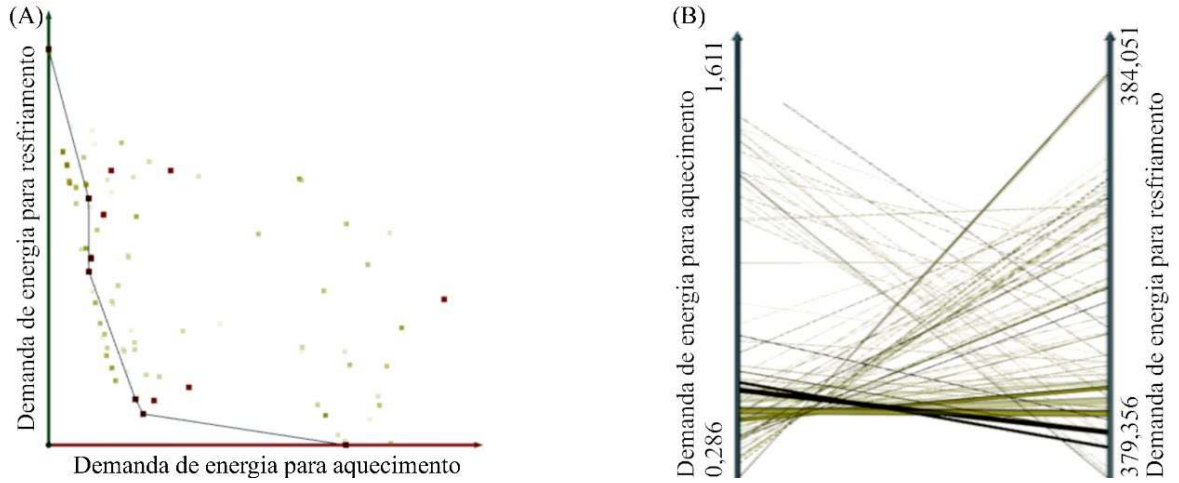


Figura 6 – Resultado as otimizações multiobjetivos: (A) Fronteira de Pareto e; (B) Limites na demanda energética (Autores).

O modelo cujo resultado mais se aproximou a zero e, consequentemente, foi considerado o melhor, possuía 2,2 W/m².k de transmitância térmica do vidro, brises horizontais na fachada Norte com 0,5 m de profundidade e 0,5 m de distância entre si, brises verticais Leste/Oeste com 0,5 m de profundidade e 0,5 m de distância, e nenhum brise na fachada Sul. Esse modelo apresentou demanda energética de 379,9 kWh/m².ano de resfriamento e 0,6 kWh/m².ano de aquecimento. Os resultados indicaram redução de 8,9% na demanda energética de resfriamento, aumento de 97,9% na demanda energética de aquecimento, e redução de 8,8% na demanda energética total. Isso mostra que a demanda energética de resfriamento foi mais impactante na demanda total do que a demanda de aquecimento.

As simulações resultantes da otimização também comprovaram que, para um edifício com fachada predominantemente envidraçada, são necessárias estratégias de sombreamento adequadas para prevenir a entrada de calor direto na edificação proveniente da radiação solar. Dentre as estratégias, as mais eficientes foram sombrear as fachadas considerando suas orientações solares e latitude da edificação. Como Porto Alegre se localiza na latitude aproximada de 30° S, a altura do sol está mais baixa na maior parte do ano, o que faz a quantidade de radiação direta incidente na fachada Sul ser mínima. Isso torna dispensável seu sombreamento com brises, o que foi confirmado com os resultados da otimização multiobjetivo. Os melhores resultados apresentaram fachadas mais sombreadas nas orientações Norte, Leste e Oeste, além de nenhum sombreamento na fachada Sul.

Além disso, os resultados mostram a versatilidade de utilizar a otimização multiobjetivo em parâmetros de análise que se influenciam negativamente. Normalmente, quando se utiliza estratégias para resfriar a edificação, a demanda energética de aquecimento acaba aumentando em algum período do ano. A afirmativa inversa também é válida. Porém, ao aplicar otimização multiobjetivo na simulação computacional, foi possível identificar as combinações que reduzissem a influência negativa entre ambas as demandas e escolher aquela que mais atendia aos objetivos determinados.

Outra contribuição da otimização multiobjetivo foi automatizar o processo de combinações entre variáveis. Nesse processo, o papel humano envolveu definir as variáveis a serem combinadas, os seus intervalos limítrofes, os parâmetros populacionais, iniciar a primeira simulação e interpretar os resultados. Por outro lado, o processo de dar continuidade às 500 simulações que representaram diferentes combinações com seus respectivos resultados de demanda energética de aquecimento e resfriamento foi automatizado.

Cada modelo analisado precisou em média de 20 minutos de processamento de máquina para gerar os resultados, o que mostra a importância de definir coerentemente as variáveis e os limites limítrofes para tornar o tempo de processamento eficiente. Variáveis com poucas influências nos objetivos estipulados não gerariam grandes contribuições para análises em virtude dos resultados pouco variados. No caso deste estudo, variáveis de elementos opacos, como isolamento de paredes, seriam irrelevantes, pois o edifício analisado possui poucos elementos opacos em virtude de suas fachadas serem predominantemente envidraçadas. Por isso as variáveis analisadas foram as de maior impacto em elementos transparentes, sendo elas transmitância térmica dos vidros e seus sombreamentos.

Os modelos considerados ótimos neste estudo possuíram similaridade do sombreamento nas fachadas Norte, Leste e Oeste e da inexistência de brises na fachada sul. A recomendação de não sombrear a fachada Sul em regiões mais ao sul do Brasil, como Porto Alegre, já foi amplamente difundida. Isso indica que as variáveis profundidade e distanciamento dos brises horizontais na fachada Sul poderiam ser substituídas por

outras duas variáveis, como fator solar e transmitância de luz visível. Essas, por sua vez, poderiam gerar resultados mais diversos no mesmo tempo de processamento das simulações.

Já nos intervalos limítrofes, identificou-se a relevância de utilizar intervalos coerentes conforme variável e realidade da região. A transmitância térmica do vidro apresentou 7 intervalos, indo de transmitâncias mais comumente utilizadas no mercado, às consideradas mais eficientes. Assim, foi possível identificar a transmitância de vidro mais adequada a diferentes profundidades e distâncias de brises, para ser implementada em um modelo real e condizente com o mercado local. Um intervalo menor corresponderia a mais possibilidades de análises, mas não significaria resultados mais eficientes. Isso também representaria analisar possibilidades não condizentes com a realidade local, tornando as combinações inviáveis de serem aplicadas.

Em relação aos desafios encontrados no método utilizado neste estudo, destaca-se dificuldade em manter a continuidade das simulações, principalmente em virtude de questões técnicas. Durante o processamento das simulações houve diversas quedas de energia por causa de condições climáticas. Todas as vezes que isso aconteceu as simulações eram reiniciadas a partir do modelo original, aumentando drasticamente o tempo total de trabalho. Isso indica que quatro dias de processo de simulação é um tempo longo de trabalho, sujeito a interrupções externas.

Além disso, enquanto o processo de simulação ocorreu, o equipamento utilizado ficou incapacitado para outros usos. Ou seja, durante aproximadamente quatro dias um equipamento foi inutilizado para demais atividades. A maneira de resolver esse problema seria reduzir o tempo de processamento através de modelos mais simples e aplicar variáveis com limites mais precisos aos objetivos estabelecidos.

5. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo evidenciaram que aplicar otimização multiobjetivo em análise de desempenho termo energético, principalmente em edificações com fachadas predominantemente envidraçadas, é extremamente eficiente, pelo potencial de combinar automaticamente diferentes variáveis, e possibilitar a seleção adequada da transmitância térmica do vidro de acordo com os sombreamentos das aberturas.

Este estudo também demonstrou a potencialidade e limitações de um método de otimização multiobjetivo para análise de desempenho termo energético, para uma edificação com fachada predominantemente envidraça e localizada na Zona Bioclimática 3 do Brasil. Isso abre oportunidade para novos estudos sobre otimização multiobjetivo, principalmente ao utilizar ferramentas auxiliares no processo, como o *Rhinoceros* 7, o *Ladybug Tools,* o *Octopus* e o *SPEA-2*. Ademais, essas duas últimas ferramentas podem apoiar a avaliação de melhores soluções projetuais, mesmo em parâmetros de projeto que se influenciam negativamente, como mínima demanda energética de aquecimento e resfriamento.

Apesar disso, é importante ressaltar que o tempo de processamento das simulações foi um grande desafio encontrado ao utilizar otimização multiobjetivo em análise de desempenho de edificações com fachadas predominantemente envidraçadas. Quanto maior o tempo de simulação, maior a probabilidade de empecilhos técnicos exteriores interferirem no processo de simulação. Para evitar isso, é de suma importâncias que o projetista ou programador tenha conhecimento profundo dos objetivos a serem alcançados e dos métodos para isso.

Conclui-se que esse estudo pode contribuir para apresentar um novo método de otimização multiobjetivo, sua eficiência e seus desafios para edificações com fachadas predominantemente envidraçadas. É necessário que outros estudos com essa temática sejam realizados para que se possa estabelecer um padrão de aplicação. Em virtude disso, essa pesquisa continuará, e seus próximos passos serão testar outros algoritmos, como o *HypE*, e outras combinações de variáveis de projeto, como Fator Solar e Transmissão de Luz Visível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 15220-3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. **ABNT**, Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005. Disponível em: www.abnt.org.br.

CABEZA, L. F. *et al.* Buildings. *Em*: CABEZA, L. l; BAI, Q. (org.). **Climate Change 2022: Mitigation of climate change**. WGIIIed. Cambridge: IPCC, 2022.

GOSSARD, D.; LARTIGUE, B.; THELLIER, F. Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network. **Energy and Buildings**, [*s. l.*], v. 67, p. 253–260, 2013.

INMETRO. **Instrução normativa INMETRO para a eficiência energética das edificações comerciais, de**

serviços e públicas. Brasil, 2022.

IPCC. **Summary for Policymakers**. Cambridge: IPCC AR6 WGI, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM. Acesso em: 19 ago. 2021.

JAVANROODI, K.; NIK, V. M.; ADL-ZARRABI, B. A multi-objective optimization framework for designing climate-resilient building forms in urban areas. *Em*: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. [*S. l.*]: IOP Publishing Ltd, 2020.

LEITZKE, R. K. **Avaliação de materiais de mudança de fase em uma habitação com fechamentos leves nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3 com base em algoritmos evolutivos multiobjetivo**. 2021. Dissertação - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021. Disponível em: https://wp.ufpel.edu.br/prograu/dissertacoes-conforto-e-sustentabilidade-do-ambiente-construido/. Acesso em: 10 out. 2022.

LEITZKE, R. K. *et al.* Optimization of the Traditional Method for Creating a Weather Simulation File: The Pelotas.epw Case. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, [*s. l.*], v. 12, n. 10, p. 741–756, 2018.

MACIEL, T. dos S. **Otimização multiobjetivo na análise de desempenho energético de uma edificação escolar**. 2021. Dissertação - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021. Disponível em: https://wp.ufpel.edu.br/prograu/dissertacoes-conforto-e-sustentabilidade-do-ambiente-construido/. Acesso em: 10 out. 2022.

MACIEL, T. dos S. *et al.* Otimização termoenergética de uma edificação escolar: discussão sobre o desempenho de quatro algoritmos evolutivos multiobjetivo. **Ambiente Construído**, [*s. l.*], v. 21, n. 4, p. 221–246, 2021.

NAJI, S.; AYE, L.; NOGUCHI, M. Multi-objective optimisations of envelope components for a prefabricated house in six climate zones. **Applied Energy**, [*s. l.*], v. 282, 2021.

PILECHIHA, P. *et al.* Multi-objective optimisation framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency. **Applied Energy**, [*s. l.*], v. 261, 2020.

VUKADINOVIĆ, A. *et al.* Multi-objective optimization of energy performance for a detached residential building with a sunspace using the NSGA-II genetic algorithm. **Solar Energy**, [*s. l.*], v. 224, p. 1426–1444, 2021.

WU, C.; WEI, H.; WANG, G. Multi-objective optimization of energy and daylighting performance of township street house in western Guangdong, China. *Em*: 2022. **Proceedings - 2022 International Conference on Big Data, Information and Computer Network, BDICN 2022**. [*S. l.*]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. p. 575–580.

WU, H.; ZHANG, T. Multi-objective optimization of energy, visual, and thermal performance for building envelopes in China's hot summer and cold winter climate zone. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], v. 59, 2022.

ZITZLER, E. *et al.* SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm. **TIK Report**, [*s. l.*], v. 103, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.3929/ethz-a-004284029. Acesso em: 1 jun. 2023.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES/CNPq pelos recursos financeiros aplicados no projeto, através da concessão de bolsa CAPES de doutorado.