



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EVANDRO JOSÉ GOMES QUINTINO NEVES

**OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES: Análise da aplicação de
materiais através do Design Computacional**

Recife
2025

EVANDRO JOSÉ GOMES QUINTINO NEVES

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES: Análise da aplicação de materiais através do Design Computacional

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientadora: Profa. Dra. Rachel Perez Palha

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Neves, Evandro José Gomes Quintino.

Otimização energética de edificações: análise da aplicação de materiais através do Design Computacional / Evandro José Gomes Quintino Neves. - Recife, 2025.

96f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: Rachel Perez Palha.

Inclui referências.

1. Eficiência Energética; 2. Design Computacional; 3. Simulação Energética; 4. Design Paramétrico; 5. BIM (Building Information Modeling); 6. Otimização. I. Palha, Rachel Perez. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

EVANDRO JOSÉ GOMES QUINTINO NEVES

**OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES:
Análise da aplicação de materiais através do Design Computacional**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Estruturas.

Aprovada em 26/02/2025

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Rachel Perez Palha – UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Maurício Oliveira de Andrade (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Vanessa Ribeiro Campos (examinadora externa)
Universidade Federal do Ceará

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Marcele Elisa Fontana (examinadora externa)
Universidade Federal de Pernambuco

À Dona Bia (*In Memoriam*), que tanto batalhou para que eu tivesse as oportunidades que não teve, principalmente nos estudos. Mas que o universo não permitiu presenciar a conclusão dessa importante e sonhada etapa. Obrigado por tudo mãe!

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Camila, pelo suporte nesse processo, por todo o incentivo desde a graduação, por me ouvir e por, mesmo não sendo dessa área, tantas vezes me ajudar a entender minhas ideias, inclusive auxiliando na revisão dos artigos. Obrigado pela paciência, carinho e apoio, te amo querida!

À minha filhinha Flora, companheirinha dos momentos de leitura e escrita noturna, dormindo claro.

Aos meus pais Beatriz (*In Memoriam*) e João, pelos sacrifícios e pelo incentivo ao estudo descrevendo como a única forma de melhoria de vida.

Aos meus sogros, Ângela e Renilson, que sempre foram suporte, com quem sempre posso contar, sobretudo nos cuidados com Florinha.

À Professora Rachel, pela orientação e condução neste processo da escrita da dissertação e desenvolvimento dos artigos.

Aos amigos (Fernanda, Jéssica, Josivan, Juan e Nakita) feitos no processo, regado a “Lágrimas e Desespero”, pelo suporte e trocas.

Aos Colegas da SPO-UFPE, pela disponibilização do projeto para desenvolvimento do estudo.

“E o sol faz seu papel... Como sempre fez!”. (DEAD FISH, 2009).

RESUMO

A crescente demanda por edificações eficientes reflete a preocupação global com o impacto das construções no consumo energético mundial e no cumprimento de metas de desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, é essencial considerar o desempenho energético no processo projetual, especialmente na fase de operação das edificações. Este estudo propõe uma metodologia para análise e otimização do consumo energético de edificações, considerando a variação de materiais de construção e a aplicação de painéis perfurados em sistemas de sombreamento passivo. Estes, reconhecidos como estratégias eficazes para melhoria do desempenho das edificações. Especialmente em regiões de clima tropical, onde podem reduzir significativamente a necessidade de resfriamento. A abordagem metodológica incluiu o uso de design computacional e ferramentas de simulação validadas. Além disso, a otimização foi conduzida com algoritmos genéticos e de modelo substituto, incluindo o premiado RBFMOpt, considerando as condições ambientais locais. Diferentemente de estudos semelhantes, este trabalho realizou uma análise multizona, abordando individualmente as características de cada ambiente. Essa abordagem integrada constitui uma de suas principais contribuições. O estudo foi desenvolvido em duas etapas. Na primeira, avaliou-se o impacto de diferentes materiais aplicados em paredes, lajes, cobertas e janelas sobre o desempenho energético. Na segunda etapa, foram analisados os efeitos da aplicação de painéis perfurados, partindo do modelo otimizado na primeira etapa. Os resultados destacaram contribuições significativas: na primeira etapa, a escolha otimizada de materiais permitiu uma redução de 29,31% no Índice de Uso de Energia (EUI) estimado. Na segunda etapa, o uso de painéis perfurados resultou em uma redução de 278 kWh/m² anuais, com impacto financeiro positivo, reduzindo em 36% os custos anuais com energia. Embora as melhorias nos indicadores de iluminação útil (UDI) e ofuscamento (GA) tenham sido modestas, a intervenção geral reforça a relevância de uma abordagem integrada. Este estudo ressalta a importância de abordagens integradas na avaliação do desempenho energético de edificações, contribuindo para o desenvolvimento de ambientes construídos mais sustentáveis e eficientes.

Palavras-chave: Eficiência Energética; Design Computacional; Simulação Energética; Design Paramétrico; BIM (Building Information Modeling); Otimização.

ABSTRACT

The growing demand for energy-efficient buildings reflects global concerns about the impact of construction on worldwide energy consumption and achieving sustainable development goals. In this context, it is essential to consider energy performance during the design process, particularly in the operational phase of buildings. This study proposes a methodology for analyzing and optimizing the energy consumption of buildings by varying construction materials and applying perforated panels in passive shading systems. These systems are recognized as effective strategies for enhancing energy performance, especially in tropical climates, where they can significantly reduce cooling needs. The methodological approach involved computational design and validated simulation tools. Furthermore, optimization was conducted using genetic algorithms and surrogate models, including the award-winning RBFMOpt, accounting for local environmental conditions. Unlike similar studies, this research performed a multizone analysis, addressing the individual characteristics of each space. This integrated approach represents one of its key contributions. The study was developed in two stages. First, the impact of different materials applied to walls, slabs, roofs, and windows on energy performance was evaluated. In the second stage, the effects of perforated panels were analyzed, starting from the optimized model from the first stage. The results highlighted significant contributions: in the first stage, optimized material selection led to a 29.31% reduction in the estimated Energy Use Intensity (EUI). In the second stage, the use of perforated panels resulted in an annual reduction of 278 kWh/m², with a positive financial impact, reducing annual energy costs by 36%. Although improvements in Useful Daylight Illuminance (UDI) and Glare Autonomy (GA) indicators were modest, the overall intervention underscores the importance of an integrated approach. This study highlights the importance of integrated methodologies in evaluating the energy performance of buildings, contributing to the development of more sustainable and efficient built environments.

Keywords: Energy Efficiency; Computational Design; Energy Simulation; Parametric Design; BIM (Building Information Modeling); Optimization

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AAD - *Algorithm Aided Design* - Desenho Auxiliado por Algoritmo
- ANDIFES - Associação Nacional dos Dirigentes das Instituições Federais de Ensino Superior
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
- ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*
- BIM - *Building Information Modelling (or Model)* - Modelagem de Informação da Construção
- BREP - *Boundary Representation*
- CAD - *Computer Aided Design* - Desenho Assistido por Computador
- CDH - *Cooling degree hours*
- EIA - *U.S. Energy Information Administration*
- EP - EnergyPlus
- EPW - *EnergyPlus Weather File*
- EUI - *Energy Use Intensity* - Intensidade de Uso de Energia (kWh)
- GA - *Glare Autonomy* - Autonomia de Ofuscamento (%)
- HB - Honeybee
- HDH - *Heating degree hours*
- INMET - Instituto Brasileiro de Meteorologia
- ISO - *International Organization For Standardization*
- LB - Ladybug Tools
- MHACO - *Multi-objective Hypervolume-based Ant Colony Optimizer*
- NBR - Norma Brasileira
- NSGA - *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*
- ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
- ONU - Organização das Nações Unidas
- PMV - *Predicted Mean Vote*
- PPD - *Percentage of People Dissatisfied*
- RBFMOpt - *Radial Basis Function Multi-Objective Optimization*
- UDI - *Useful daylight illuminance* - Iluminação Natural Útil (%)
- kWh - Kilowatt-hora
- sDA - *Spatial Daylight Autonomy* (%)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	16
1.2. OBJETIVOS	17
1.2.1. Objetivo Geral	17
1.2.2. Objetivos Específicos	17
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2. REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	21
2.2. ANÁLISE DO CONTEÚDO	25
2.2.1. Edificações Eficientes	25
2.2.2. Design Computacional	28
2.2.3. Ferramentas de Análise, Simulação e Otimização	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1. ESTUDO DE CASO 01 - OTIMIZAÇÃO DOS MATERIAIS APLICADOS	35
3.1.1. Metodologia	36
3.1.1.1. Vinculação do Modelo BIM	37
3.1.1.2. Criação do modelo analítico	39
3.1.1.3. Análise das condições ambientais	43
3.1.1.4. Simulação com as condições iniciais do projeto	50
3.1.1.5. Modelagem paramétrica e otimização da edificação	54
3.1.2. Resultados e Discussão	56
3.1.2.1. Simulação Simplificada	56
3.1.2.2. Simulação Completa	57
3.1.2.3. Análise de Conforto Térmico	60
3.2. ESTUDO DE CASO 02 - OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DE SOMBREAMENTO PASSIVO	62
3.2.1. Metodologia	62
3.2.1.1. Atualização do Modelo Analítico	64
3.2.1.2. Montagem do sistema de envidraçamento	69

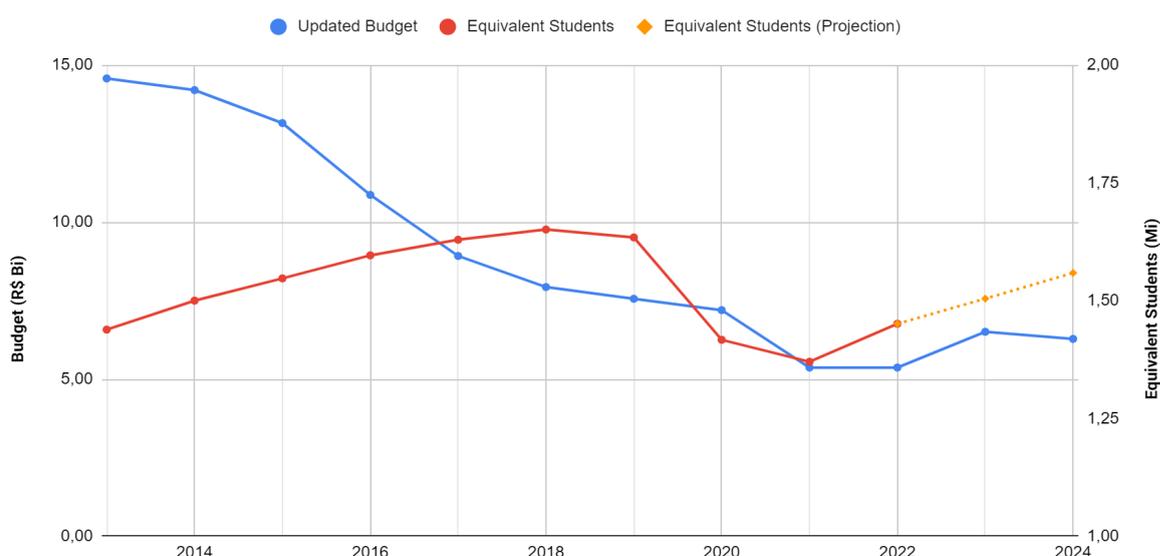
3.2.1.3. Simulação nas condições iniciais	72
3.2.1.4. Modelagem paramétrica dos elementos de sombreamento	73
3.2.1.5. Otimização da solução	73
3.2.2. Resultados e Discussão	74
3.2.2.1. Otimização mono objetivo	74
A. Rodada 01 - Minimizar EUI	74
B. Rodada 02 - Maximizar UDI	75
C. Rodada 03 - Maximizar GA	76
3.2.2.2. Otimização multiobjetivo	77
A. Cenário 01	79
B. Cenário 02	80
C. Validação	83
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
4.1. CONTRIBUIÇÕES	87
4.2. LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIAS	91

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de construções energeticamente eficientes, ou até mesmo autossuficientes, é uma realidade atual. Sobretudo pelo fato de que parcela significativa do consumo energético mundial é oriundo das edificações (MANNI et al, 2020; ZHANG; JI, 2021). Nos Estados Unidos, por exemplo, de acordo com dados da *U.S. Energy Information Administration* (EIA), o consumo das edificações residenciais e comerciais somadas correspondem a aproximadamente 40% do consumo total do país (EIA, 2024). Este elevado consumo tem sido apontado inclusive como fator crítico para a transição energética, além de um desafio global para o desenvolvimento sustentável (MANNI et al, 2020).

Este cenário se torna particularmente mais grave nas instituições públicas de ensino, onde a crescente demanda por infraestrutura contrasta com os constantes cortes de recursos financeiros. Dados disponibilizados pela Associação Nacional dos Dirigentes das Instituições Federais de Ensino Superior (ANDIFES, 2024) revelam o preocupante paradoxo (figura 01): enquanto há um aumento do total de alunos equivalentes (métrica adotada para avaliar o total de alunos com base em ingresso, evasão e diplomação), os recursos financeiros disponibilizados sofrem constante redução, impactando a capacidade de investimento e manutenção da infraestrutura.

Figura 01: Evolução do orçamento e do total de alunos equivalentes nas Universidades Federais Brasileiras



Fonte: O autor (2025).

Neste aspecto, o foco em projetos performativos se mostra de grande importância. Podendo contribuir, por exemplo, para o atingimento dos objetivos

propostos pela ONU¹ dentre eles o Objetivo 7, que busca “Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos” e Objetivo 11 que propõe “Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis”, impactando indiretamente em outros como Fome Zero e Educação de Qualidade.

O projeto performativo refere-se a uma abordagem de design onde a análise de desempenho de um edifício ou sistema é integrada ao processo desde as fases iniciais do projeto, com o objetivo de otimizar o seu comportamento em relação a critérios específicos determinados. Esta metodologia considera como um edifício responde ao ambiente, impactando no uso de energia, aproveitamento de iluminação natural, conforto térmico e outros fatores (CHEN; ZHANG; ZHENG, 2024).

Porém, os projetos devem objetivar a eficiência não só da fase construtiva mas também de toda vida útil da edificação, visto que no período de operação é que ocorre a maior demanda energética e impacto ambiental (SOARES et al., 2017). O consumo energético neste período pode ultrapassar 30% do total da edificação (ALWAN et al., 2021; MADY et al., 2024). Para mitigar esse impacto, é essencial considerar o desempenho energético já nas fases iniciais do projeto, onde é possível maior integração entre as disciplinas envolvidas, otimizando a performance (ATAMAN; DINO, 2021; RATAJCZAK; SIEGELE; NIEDERWIESER, 2023).

A consideração de fatores climáticos, bem como dos materiais aplicados em função destes, é muito importante para o projeto bem sucedido de uma edificação eficiente. Nos projetos convencionais, a análise destas questões fica geralmente a cargo da experiência dos profissionais envolvidos. Entretanto, tal prática carrega imprecisões e subjetividades (ZHANG; LIU; WANG, 2019). Um caminho para atingir resultados mais precisos e confiáveis, e consequentemente edificações mais eficientes, é através da análise assistida por ferramentas computacionais (ATAMAN; DINO, 2021).

Atualmente existem várias ferramentas, porém as validadas e mais utilizadas no fluxo de trabalho paramétrico são: Radiance e Daysim para iluminação natural; e

¹ ONU. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>.

EnergyPlus para simulação de energia (KIRIMTAT et al., 2016). Gürcan et al. (2023) demonstraram que com a aplicação de ferramentas deste tipo foi possível reduzir mais de 50% da radiação recebida nas fachadas e nos pavimentos de uma edificação. Ghorbani Naeini et al. (2023), aplicaram estas ferramentas no projeto de uma edificação residencial no Iran, conseguindo um aumento de 5% no conforto e redução da carga térmica em 15%.

Entretanto, apesar dos potenciais agregados por estes recursos de projeto, a sua aplicação ainda é reduzida. Ataman e Dino (2021) realizaram uma pesquisa com nove grandes escritórios na Turquia, abordando o processo de projeto de edificações com foco em performance. A dificuldade de incorporar critérios de desempenho no projeto, principalmente devido à “lacuna interdisciplinar” entre arquitetos e engenheiros, foi um relato unânime. Em projetos de maior escala os arquitetos sentiram necessidade de aplicar competências que não podiam ser mantidas na empresa no longo prazo, necessitando assim de consultores.

Neste contexto, o Design Computacional, que se mostra como uma forma de integração destas questões, consiste num método de projeto cuja complexidade é resultado de um processo associativo, onde diversos elementos do projeto são associados e uma alteração modifica todo o conjunto. O processo associativo se destaca por possibilitar que sejam considerados fatores externos, como forças de atuação dos ventos, incidência solar; e internos, como resistências de deformação de materiais (TEDESCHI, 2014; RATAJCZAK; SIEGELE; NIEDERWIESER, 2023). De acordo com Tedeschi (2014) este método difere dos convencionais, onde a complexidade é conferida através da adição e sobreposição de elementos sem uma interação entre eles, sendo a consistência final do projeto relacionada a convenções e padrões de desenho, dependendo inclusive de análises subjetivas.

Além disso, o uso do design computacional, principalmente através de sistemas generativos, possibilita mais tempo de reflexão e análise por parte do projetista. Nestes sistemas o projetista não interage diretamente com os materiais e produtos, mas com uma configuração baseada em regras paramétricas para variação, transformação e/ou produção novos elementos, podendo seguir inclusive um mesmo estilo pretendido (FISCHER; HERR, 2001; CELANI; VAZ, 2012; CHEN; ZHANG; ZHENG, 2024; SHEN; YE, 2024). Desta forma, as soluções possíveis para

um mesmo problema são ampliadas. Cabe ao projetista a capacidade de descrever os problemas, identificar as relações e os fluxos de informações relacionados ao projeto (FISCHER; HERR, 2001).

O design computacional pode ser utilizado em conjunto com a análise climática em diversos fluxos de trabalho, como: (i) geração automática de variações de projeto; (ii) processos iterativos de geração, simulação, análise e adaptação da forma, para identificação de boas soluções para um determinado contexto; (iii) otimização para busca da melhor solução de projeto atendendo a critérios de desempenho pré-estabelecidas; e (iv) exploração projetual, que diferente da otimização, não irá apresentar a solução ideal, mas a relação entre os parâmetros (DE LUCA, 2023).

O processo de otimização é frequente na engenharia e consiste na busca da melhor solução para um determinado problema, que pode ter um ou mais objetivos, além de poder estar sujeito a um conjunto de restrições. Tal processo passa por diversas iterações e em problemas com muitas variáveis torna-se muito custoso para desenvolvimento manual, para isso a aplicação de métodos computacionais é de grande valia.

Dentre estes métodos, os algoritmos evolutivos têm se demonstrado como os mais efetivos para aplicação nos problemas da construção civil, pois possuem flexibilidade para lidar com diversos objetivos, além de permitirem interação e serem confiáveis. (RUTTEN, 2011; ZHANG; JI, 2021; YU et al., 2023)

Diversas aplicações têm sido realizadas como em JI et al., 2023, para melhoria de métricas de conforto térmico, iluminação natural e consumo de energia no projeto de um átrio utilizando otimização multiobjetivo, baseada em algoritmo genético, integrando diferentes sistemas de simulação

Outro estudo interessante buscou otimizar o aproveitamento de luz natural, com menor absorção de radiação solar e desconforto por ofuscamento, através da variação da taxa de sombreamento da fachada de um ginásio de esportes. Embora o estudo tenha se baseado teoricamente em uma única variável - o percentual de abertura do elemento da fachada - um componente aleatório foi incorporado à

parametrização. Isso permitiu a existência de várias opções de montagem, mesmo dentro de um valor específico (FAN; LIU; TANG, 2022).

Ratajczak, Siegele e Niederwieser (2023) empregaram otimização multiobjetivo para equilibrar a admissão de luz natural e a demanda energética, manipulando parâmetros que afetam a forma da edificação. As 200 iterações feitas no projeto resultaram em EUI variando de 66.265 a 82.701 kWh/m²/ano e sDA de 53,78% a 100%, com medianas de 74,711 kWh/m²/ano e 90,83%, respectivamente. O modelo BIM inicial, apresentou um EUI de 69.297 kWh/m²/ano e um sDA de 81,28%, indicando potencial de otimização.

A abordagem de otimização também pode agregar elementos de geração de energia, onde os elementos de sombreamento, modelados parametricamente, também servem de base para células fotovoltaicas (NOORZAI, BAKMOHAMMADI e GARMAROUDI, 2022). O conjunto otimizado neste trabalho reduziu de 20% do consumo de energia, mantendo bons índices de conforto.

Os diversos estudos analisados demonstram que a aplicação de ferramentas de análise, simulação energética e otimização pode subsidiar decisões no projeto para reduzir o consumo energético, minimizando os custos de operação, sobretudo em suas fases iniciais onde há alto impacto transformador e baixo impacto em termos de custo (ZHANG; LIU; WANG, 2019; ATAMAN; DINO, 2021).

Entretanto, a maioria deles se concentra em ambientes únicos (RICCI et al., 2020; XUE; NOORZAI; BAKMOHAMMADI; GARMAROUDI, 2022; LIU, 2022; JI et al., 2023). Outros se limitam a seções específicas de edificações, como um único pavimento sem subdivisões internas (GÜRCAN et al., 2023; YU et al., 2023; ZHANG; JI, 2021) ou apenas uma parte da fachada. No entanto, é crucial realizar análises em múltiplos ambientes, considerando as trocas térmicas que ocorrem entre os espaços através dos materiais que os compõem, sobretudo em edificações de uso complexo.

1.1. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Os Restaurantes Universitários são elementos importantíssimos para permanência dos alunos nas universidades, principalmente os de baixa renda. Tendo assim importante função social que é a de garantir alimentação de qualidade

além de indiretamente contribuir para formação acadêmica e profissional dos alunos das instituições de ensino.

Paralelo a isso, presenciamos a constante redução de verbas destinadas à manutenção do funcionamento das instituições públicas de ensino superior (ANDIFES, 2024). Assim, planejar espaços funcionais, seguros e confortáveis com menor demanda financeira para operação é essencial. A escolha correta dos materiais de construção bem como a melhoria das fachadas, tem impacto direto nestas questões e pode ser potencializada através da otimização utilizando técnicas de modelagem paramétrica, esta área de pesquisa têm se mostrado relevante sobretudo pela crescente e constante preocupação com a sustentabilidade ambiental (QUEIROZ, 2023).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar e otimizar o consumo energético de um Restaurante Universitário, considerando todos os ambientes que o compõem de forma integrada.

1.2.2. Objetivos Específicos

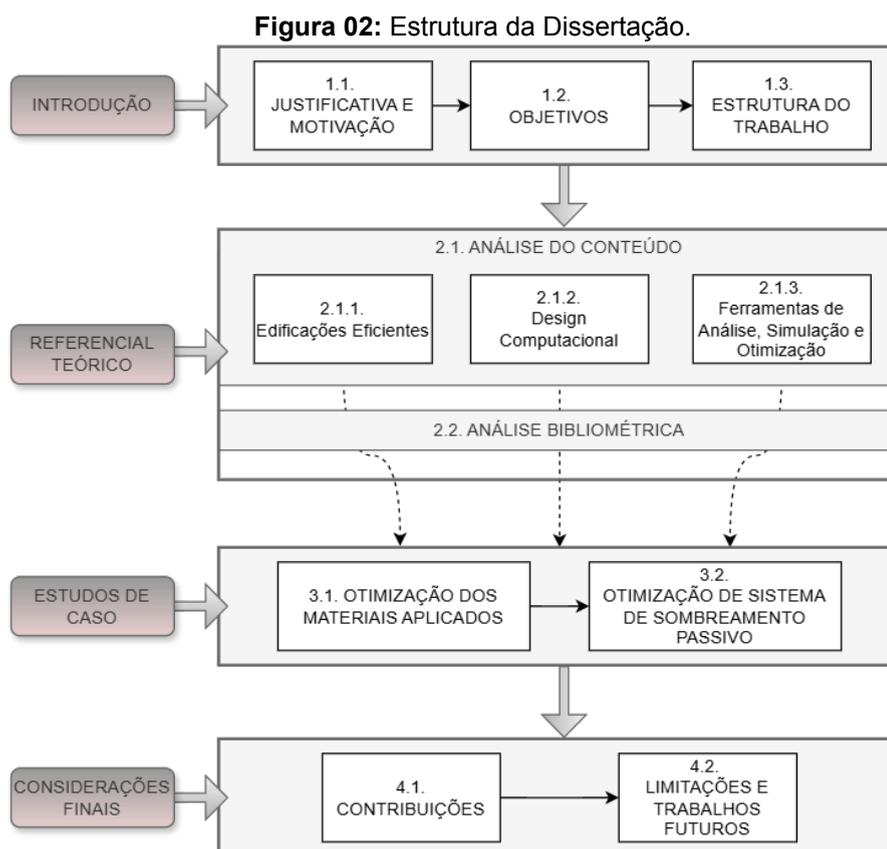
Como objetivos específicos deste trabalho destacam-se:

- Desenvolver algoritmos em linguagem de programação visual para: integração de modelo BIM, simulação energética, otimização da escolha de materiais aplicados e otimização da distribuição de elementos de sombreamento.
- Desenvolver um modelo analítico completo, multizona, considerando todos os ambientes da edificação de forma integrada.
- Comparar diferentes algoritmos de otimização aplicáveis no contexto do projeto de edificações, através de plugins disponíveis, avaliando suas vantagens e desvantagens.
- Analisar o uso de energia e métricas de conforto no projeto de uma importante edificação institucional.

- Entender os impactos das diferentes opções de materiais e elementos de sombreamento no consumo energético da edificação.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é dividido em 4 seções, conforme apresentado na figura 02.



Fonte: O autor (2025)

A primeira é a introdução, que apresenta uma visão geral dos conceitos abordados no trabalho, bem como os objetivos a serem atingidos. A Seção 2 apresenta o referencial teórico que serviu de base para desenvolvimento do trabalho, A Seção 3 detalha a metodologia desenvolvida, bem como os resultados obtidos nos estudos de caso desenvolvidos. Por fim, na Seção 4 estão as conclusões, limitações do estudo e oportunidades para pesquisas futuras.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Buscando entender como estão desenvolvidas as questões relacionadas ao desempenho das edificações, e como o design computacional tem contribuído neste campo, uma revisão de literatura utilizando técnicas sistemáticas para levantamento e análise do material disponível.

A análise da literatura existente é em seguida feita em duas etapas, a primeira do ponto de vista bibliométrico, avaliando dentre outras questões a evolução da produção ao longo do tempo, a predominância de fontes e o desenvolvimento temático.

Para construção da revisão nos baseamos na declaração PRISMA 2020 para levantamento de trabalhos relacionados aos temas estudados. O *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* - PRISMA foi desenvolvido para auxiliar revisores, oferecendo métodos para dar transparência sobre os objetivos, metodologia e resultados de uma revisão sistemática (PAGE et al., 2021).

O levantamento de fontes foi realizado nas bases de dados Scopus e Web of Science, no dia 10 de dezembro de 2024, sendo buscados nos campos de Títulos, Resumos e Palavras-chave os seguintes termos:

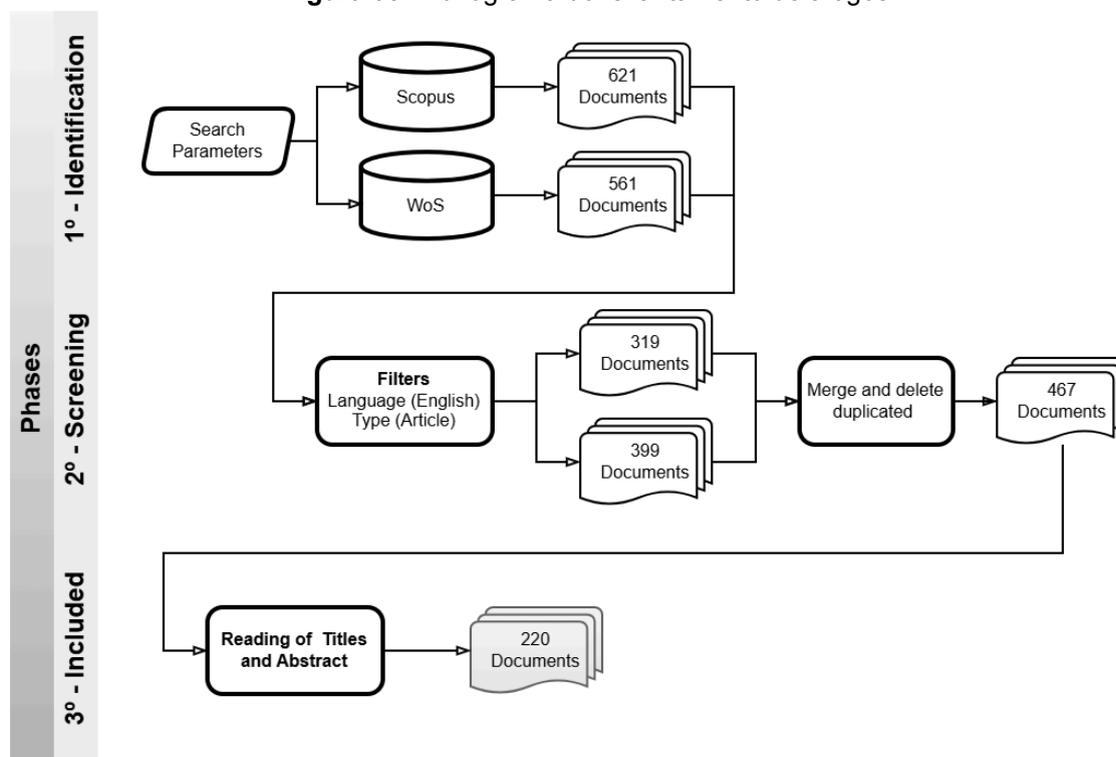
- **"parametric design" OR "generative design" OR "computational design"**: Por ser um assunto relativamente novo, os conceitos de Design Paramétrico, Design Generativo e Design Computacional acabam se misturando em alguns momentos. Considerar os três termos amplia as possibilidades.
- **evaluat* OR simulat* OR perform* OR efficien* OR optimization***: Com estas, o objetivo é localizar trabalhos que trazem abordagens relacionadas à análise e melhoria da performance das edificações.
- **energ* OR electricity**: Objetivando localizar trabalhos que considerem o impacto no consumo de energia elétrica das edificações.

- **building OR construction:** Por fim, como a aplicação do design computacional é muito ampla, esta palavra chave restringe a busca ao campo das edificações. Além de se relacionar também ao BIM.

Foram aplicados filtros, limitando a extração em documentos do tipo “Artigo” em língua inglesa em ambas as bases de dados. Em seguida, utilizando o pacote Bibliometrix, para linguagem R, (ARIA; CUCCURULLO, 2017) unificamos os documentos em uma única lista, excluindo os artigos duplicados. Após a leitura dos títulos e resumos dos artigos unificados foram excluídos da listagem os documentos que não se alinham com o objeto da pesquisa.

Foram excluídos documentos que: abordam exclusivamente geração de energia; analisam questões de eficiência no contexto urbano e não dá edificação; possuem foco apenas em engenharia dos materiais. Além de outros que apesar das palavras chave utilizadas entraram na busca mas são de áreas diversas como química, biomolecular e similares. O fluxograma da figura 03 detalha o processo de levantamento dos documentos.

Figura 03: Fluxograma do levantamento de artigos.



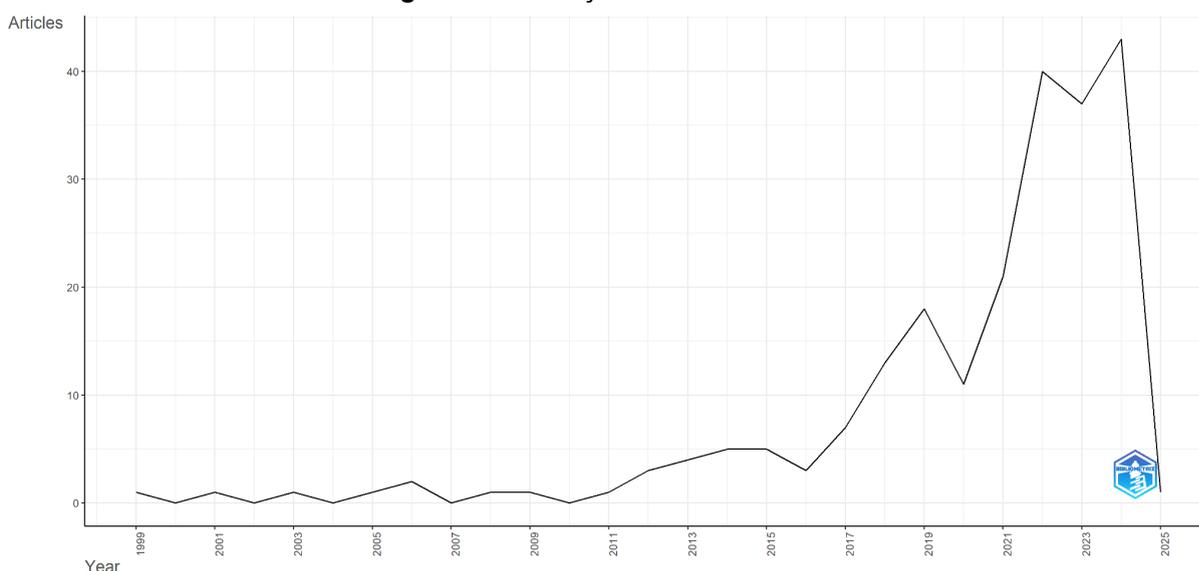
Fonte: O autor (2025).

2.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A partir dos 220 artigos levantados, utilizando o painel Biblioshiny disponível no pacote bibliometrix (ARIA; CUCCURULLO, 2017) realizamos análises bibliométricas, sintetizando os resultados encontrados.

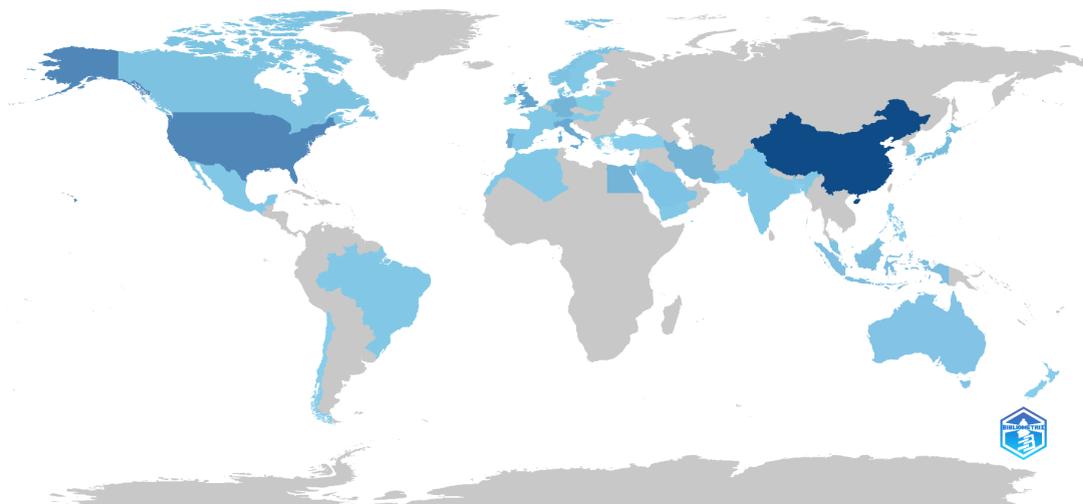
Os artigos obtidos datam de de 1999 à 2025 (*Early Access* neste último caso), a partir da figura 04 podemos notar que a utilização do Design Computacional para simulação e otimização energética de edificações ainda é um tema emergente, tendo uma expressivo aumento na produção anual iniciado no ano de 2019. Entre 1999 e 2013 foram publicados menos de 5 artigos por ano.

Figura 04: Produção acadêmica anual



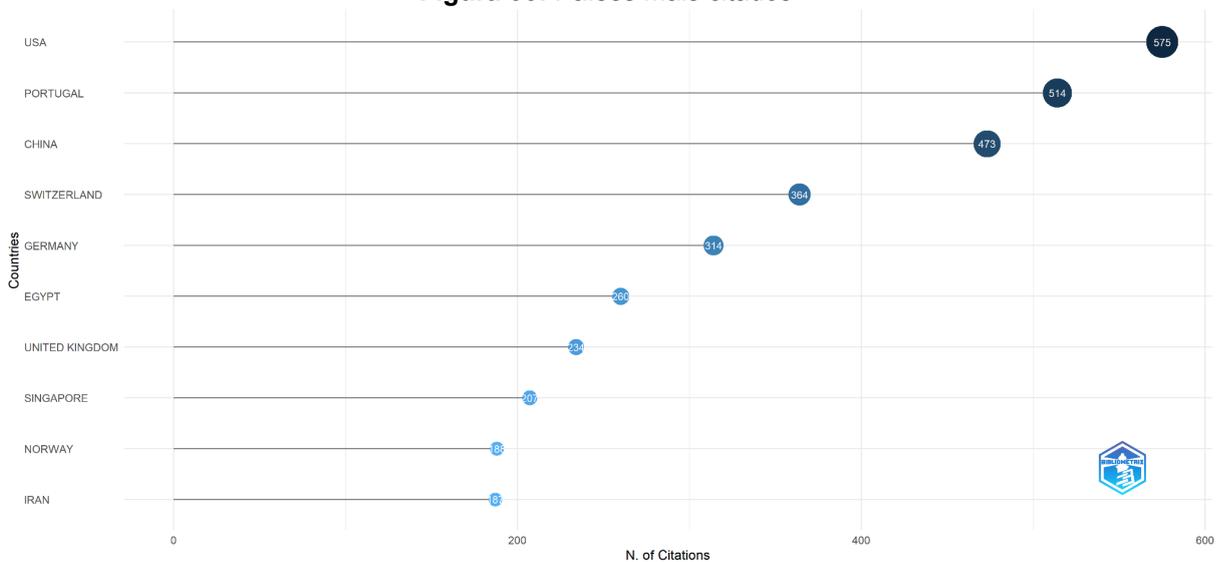
Fonte: O autor (2025)

Analisando a produção global (figura 05) vemos que China, Estados Unidos e Reino Unido lideram a produção com 149, 77 e 45 artigos publicados, respectivamente, no período analisado. O Brasil aparece apenas na 21ª posição do ranking, empatado com Estônia, Jordânia, México e Marrocos com 6 artigos publicados cada. Demonstrando como o tema tem sido pouco discutido no país.

Figura 05: Produção científica global

Fonte: O autor (2025)

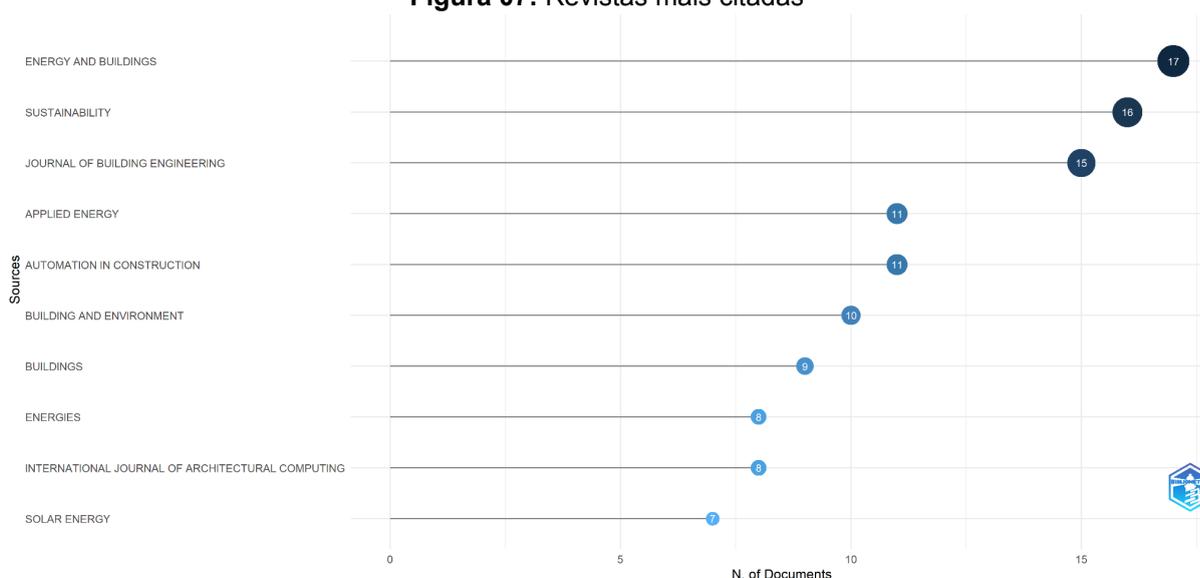
É interessante destacar que, apesar de liderar a produção global, a China ocupa o 3º lugar no ranking de países mais citados, atrás de Estados Unidos e Portugal (figura 06).

Figura 06: Países mais citados

Fonte: O autor (2025)

A figura 07 apresenta o ranking de revistas por publicação, as revistas *Energy and Buildings*, *Sustainability* e *Journal of Building Engineering* foram as que mais publicaram no período, com 17, 16 e 15 artigos respectivamente, é interessante destacar que estas revistas publicam em Open Access, onde os autores ou instituições pagam pela publicação. Apesar do volume publicado, a *Automation in Construction*, que ocupa o 5º lugar, foi a mais citada, com um total de 768 citações.

Figura 07: Revistas mais citadas

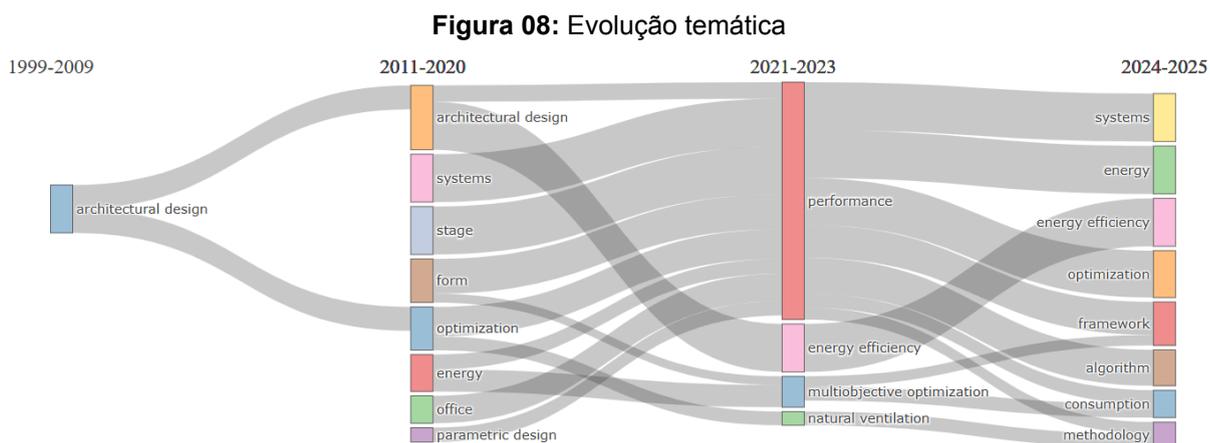


Fonte: O autor (2025)

Analisamos a evolução dos temas abordados considerando os períodos (i) 1999-2009, (ii) 2011-2020, (iii) 2021-2023 e (iv) 2024-2025, a divisão se deu em função do volume produzido nos períodos. O gráfico da figura 08 demonstra essa evolução, partindo do Design Arquitetônico no primeiro período avançando a temas mais complexos como performance, otimização e eficiência energética.

No segundo período, os temas “*System*” e “*Stage*” indicam a consideração dos diversos sistemas que compõem as edificações, bem como os estágios de desenvolvimento dos projetos e também o ciclo de vida da edificação como abordado por Kiss e Szalay (2023). O Design Paramétrico surge nesse período, sendo integrado ao tema “*performance*”, junto com outros temas emergentes como a otimização.

De acordo com SHAHI (2021) a otimização consiste em um processo de avaliação de alternativas projetuais, nas etapas iniciais de projeto, e seus impactos no desempenho da edificação. Estes impactos podem ser medidos em termos de usos de energia, eficiência estrutural, impactos no ciclo de vida e outros.



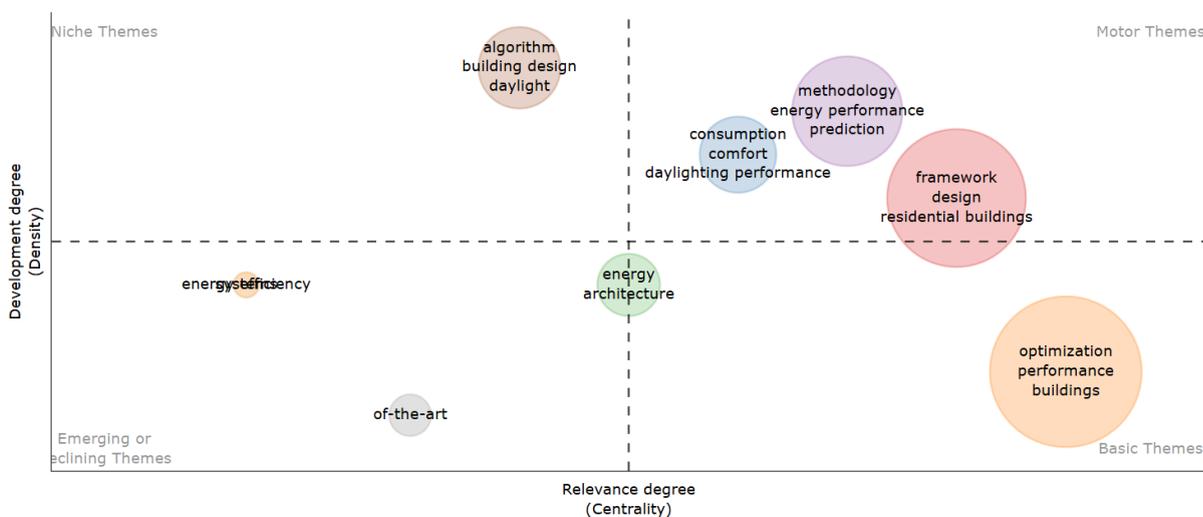
Fonte: O autor (2025)

No campo da otimização, há forte presença do uso de algoritmos genéticos como em Yi et al. (2021), onde utilizando o Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) realizaram a otimização de uma treliça, maximizando a luz natural no espaço interno, a resistência da estrutura e reduzindo o peso do sistema e o custo geral de material. Outra abordagem buscou otimizar o desempenho e a produção de um sistema de sombreamento de fachada feito de UHPFRC (concreto reforçado com fibras de ultra-alto desempenho), os autores aplicaram regras paramétricas para definição das dimensões e quantidade de perfurações em painéis, validando os resultados com simulações de iluminação e conforto (LEONE; NOCERINO, 2021), entretanto considerando apenas períodos específicos do ano.

Ainda na figura 08, o último período indica uma diversificação dos temas, com Sistemas, Energia, Eficiência Energética e Otimização se mantendo ainda relevantes. A entrada do tema “Algoritmos” indica uma crescente na importância de ferramentas computacionais para a área.

A figura 09 apresenta o mapa temático, considerando apenas o último período analisado. Os temas Algoritmo (que aqui entendemos como o desenvolvimento), Design de Edificações e Iluminação Natural são bem desenvolvidos. O tema “*of-the-art*” indica o surgimento de pesquisas levantando os principais avanços e tendências na área (DE LUCA, 2023; HOSSEINI et al., 2024). Otimização, Performance e Buildings são apresentados como básicos, sendo fundamentais para a área porém ainda necessitando desenvolvimento, devido à baixa densidade e é neste ponto que este trabalho se insere.

Figura 09: Mapa temático do último período (2024-2025)



Fonte: O autor (2025)

2.2. ANÁLISE DO CONTEÚDO

Os artigos mapeados foram analisados fornecendo subsídios para desenvolvimento de conceitos e abordagens relacionados à Edificações Eficientes, Design Computacional e Ferramentas de Análise, Simulação e Otimização. Outras fontes também foram consideradas complementando as questões levantadas.

2.2.1. Edificações Eficientes

Edificações eficientes são aquelas que onde o consumo de energia é o menor possível, alcançado através do projeto da forma e do envelope da edificação (CALDAS, 2008; CHEN; JANSSEN; SCHLUETER, 2018), ou ainda de melhorias nos sistemas de aquecimento, resfriamento, iluminação, e ventilação com a inclusão de sistemas passivos como em R. M. Sakiyama et al. (2021), onde os autores utilizaram um algoritmo de otimização multiobjetivo (RBFMOpt) para maximizar a eficácia da ventilação natural e minimizar a demanda energética de aquecimento e resfriamento.

Considerando que a maior parte do consumo das edificações se dá com a climatização, podendo atingir entre 30 e 50% com sistemas convencionais (ENGLART, 2024), um aspecto importante a ser considerado é o aquecimento por insolação. Porém, segundo Al-Masrani et. al. (2018), há uma tendência em simplificar a solução do problema de aquecimento por insolação evitando-se aberturas nas fachadas críticas, o que nem sempre é possível por limitações de

localização ou necessidades do projeto. Quando isso acontece, normalmente o resultado são projetos ineficientes.

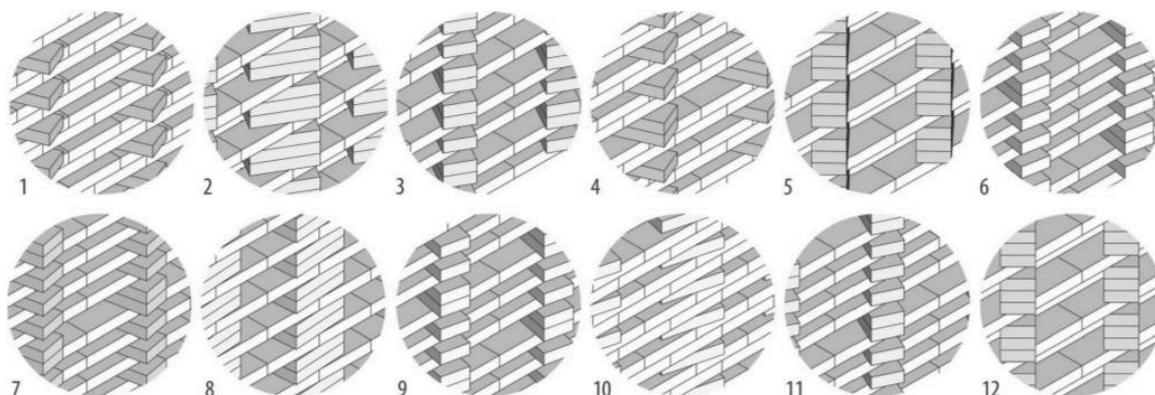
Uma alternativa é a adoção de sistemas de sombreamento, que têm impacto significativo na eficiência energética das edificações, sobretudo por reduzir a carga necessária para resfriamento das áreas internas, visto que limita a insolação direta. Entretanto também pode impactar negativamente no montante de iluminação natural recebido, desta forma o desempenho ideal do elemento vai depender da prioridade dada pelos ocupantes da edificação. (KIRIMTAT et al., 2016).

Os sistemas de sombreamento pode ser classificados em (i) Sistemas Passivos, que não requerem energia elétrica para funcionamento, ou (ii) Sistemas Ativos, que necessitam de energia para controlar sua mecânica; e Sistemas Híbridos, baseados em biomimética e/ou materiais inteligentes (AL-MASRANI et al., 2018)

Considerando apenas os Sistemas Passivos, visto que o objeto a ser desenvolvido neste artigo se classifica neste grupo, a grande parte dos artigos analisados trabalhou com elementos do tipo Brise Soleil, de forma horizontal ou vertical (VALITABAR et al., 2021; FAN; LIU; TANG, 2022; NOORZAI; BAKMOHAMMADI; GARMAROUDI, 2022; WANG et al., 2022; GABER et al., 2023). Sendo estes apontados como os sistemas de sombreamento mais populares (RAFATI; MORTEZA HAZBEI; EICKER, 2022). Havendo, ao nosso conhecimento, poucos estudos abordando o uso de painéis perfurados.

Vazquez, Duarte e Poerschke (2020) estudaram a otimização de “*Masonry Screen Walls*”, que são vedações em alvenaria vazada (figura 10), utilizando design paramétrico, gramática da forma e algoritmo genético. O foco foi melhorar o índice de iluminação natural (sDA) e reduzir a carga necessária para resfriamento e a exposição solar direta anual (ASE).

Figura 10: Detalhes das soluções ótimas para as paredes de alvenaria vazada

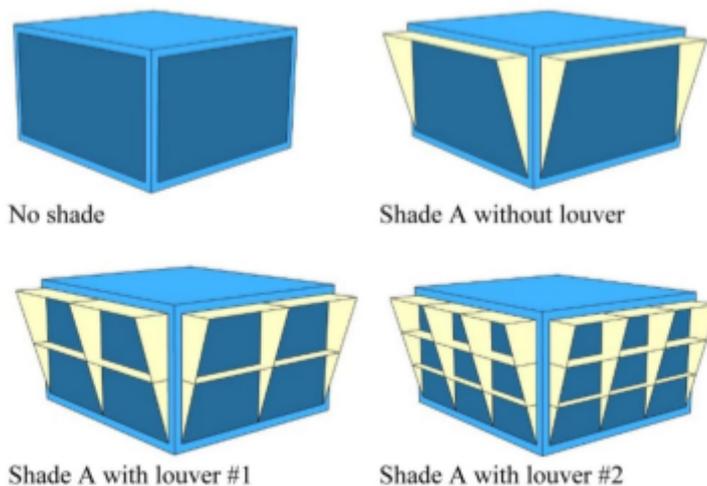


Fonte: Vazquez, Duarte e Poerschke (2020)

Em estudo recente, Gürçan et al. (2023) aplicaram simulação e otimização em um projeto de fachada integrada, proporcionando controle da irradiação solar e comunicação. Embora os painéis propostos não tenham sido fabricados, os resultados indicam benefícios significativos na redução do ganho solar. Diferentemente deste estudo, que se concentrou em aspectos formais e controle solar, nossa abordagem expande a análise para incluir métricas de desempenho energético e conforto visual, além de considerar a aplicação prática dos painéis em um sistema de sombreamento passivo.

Ibrahim et. al (2024) avaliaram a aplicação de proteções horizontais e verticais nas janelas (figura 11), em diferentes padrões climáticos. Os resultados demonstraram possibilidade de redução de 10% do uso de energia, com melhoria nos índices de aproveitamento de luz do dia útil e ofuscamento.

Figura 11: Exemplos de proteções solares avaliadas



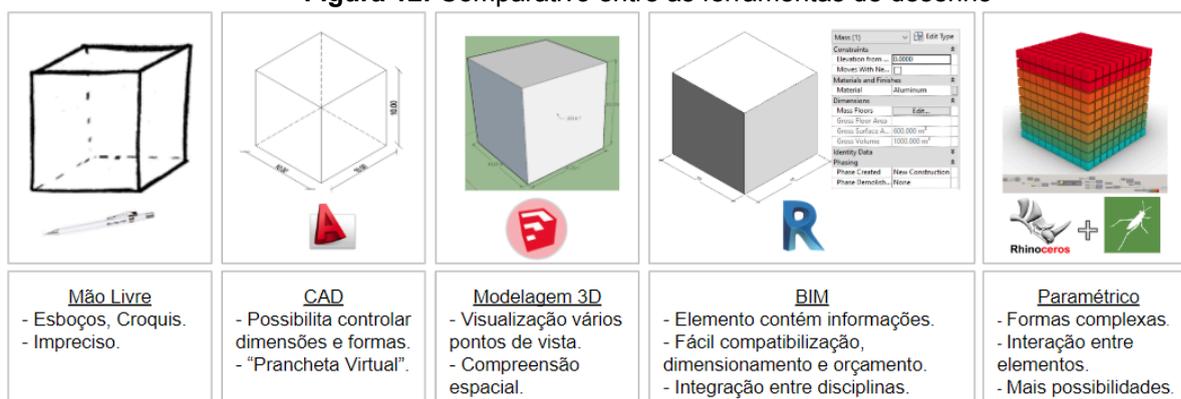
Fonte: Ibrahim et. al (2024)

Para o projeto de uma edificação eficiente, é crucial a análise considerando fatores climáticos. Em um fluxo de trabalho integrado essa análise é feita com o auxílio de ferramentas computacionais (ATAMAN; DINO, 2021). Sendo Radiance e Daysim (ambos para iluminação natural) e EnergyPlus (para simulação de energia) as mais utilizadas. Estas ferramentas são conectadas ao fluxo de trabalho paramétrico utilizando plugins e componentes específicos, os principais são Ladybug Tools e Climate Studio (DE LUCA, 2023).

2.2.2. Design Computacional

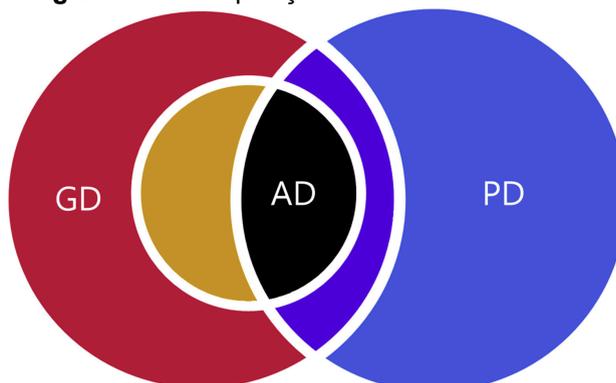
Do desenho a mão livre até os métodos de desenho atuais houve grande evolução na forma de conceber projetos de arquitetura. As ferramentas CAD (Computer Aided Design) tiveram grande importância no desenho de arquitetura, substituindo a prancheta e possibilitando a solução de problemas geométricos nos projetos, adicionando maior precisão e controle de elementos desenhados (ALMAZ et al., 2024). Posteriormente surgiram softwares de modelagem 3D que permitiram a criação e visualização de volumes, sólidos ou não, no ambiente virtual, os elementos criados puderam então ser rotacionados, redimensionados e visualizados de qualquer ponto de vista, de forma rápida e precisa, proporcionando maior compreensão espacial.

Atualmente estão disponíveis os softwares BIM (Building information Modeling) que possibilitam atrelar informação aos objetos. Dados como custo, material, peso, propriedades físicas e etc. são vinculados aos elementos otimizando etapas, por exemplo, de compatibilização, dimensionamento e orçamento. De forma contemporânea a estes softwares têm se popularizado ferramentas de design paramétrico vinculadas aos modeladores 3D e BIM. A figura 12 abaixo ilustra algumas características, além de diferenças entre os métodos.

Figura 12: Comparativo entre as ferramentas de desenho

Fonte: O autor (2025)

Estas ferramentas se unem no campo do Design Computacional, que está transformando a maneira como os arquitetos projetam edifícios, pois permite a exploração de um maior espaço de design além da criação de soluções mais eficientes, sustentáveis e personalizadas. Para além do uso dos computadores, esta metodologia está relacionada ao pensamento computacional. Frequentemente o Design Computacional é confundido com o Design Paramétrico, Design Generativo e Design Algorítmico, com estes termos representando 71% dos termos relacionados ao Design Computacional nas bases de dados científicas, entretanto trata-se conceitos complementares (CAETANO; SANTOS; LEITÃO, 2020), a figura 13 ilustra essa sobreposição temática.

Figura 13: Sobreposição temática dos conceitos

Fonte: (CAETANO; SANTOS; LEITÃO, 2020)

O Design Paramétrico consiste no desenvolvimento do projeto baseado em regras e restrições que definem o resultado final, seja ele em termos de forma, custo, performance, peso ou outra grandeza. Segundo WoodBury (2010) um importante destaque nesta metodologia é a introdução da relação entre os

elementos, que passam a ser associados, demandando uma mudança de pensamento por parte dos projetistas sobre os elementos do projeto:

No Design Generativo a interação do projetista é com um conjunto de regras abstratas que possibilitam a geração de variantes de um determinado projeto ou produto (FISCHER; HERR, 2001), podendo inclusive não ser de fácil entendimento, ao projetista, como o algoritmo ou conjunto de regras afeta a forma final (CAETANO; SANTOS; LEITÃO, 2020).

O Design Algorítmico, também conceituado por Tedeschi (2014) como AAD - *Algorithm Aided Design*, consiste no uso de algoritmos para geração de modelos, porém neste caso com total interação entre o projetista e o conjunto de regras, neste caso definidas por ele. Pode ser entendido como um subconjunto do Design Generativo, porém com maior grau de controle e transparência do processo (CAETANO; SANTOS; LEITÃO, 2020).

Ratajczak, Siegele e Niederwieser (2023) defendem que Integrar o Design Paramétrico, o Design Generativo e a automação no software BIM, representa um novo avanço que oferece aos arquitetos e engenheiros novas oportunidades ao trabalhar com edificações complexas.

Ataman e Dino (2021) defendem que o paradigma do projeto performativo ainda não está sendo aplicado de forma abrangente, sobretudo por conta das abordagens convencionais de projeto que dificultam a colaboração e integração necessária para o desenvolvimento adequado de projetos complexos.

A utilização do AAD é fundamental para isto, pois através dele é possível que os aspectos do mundo físico sejam traduzidos em dados que informam e transformam o projeto. Este processo pode ser utilizado nas etapas iniciais do projeto e considerar componentes significativos como insolação, iluminação e eficiência energética.

2.2.3. Ferramentas de Análise, Simulação e Otimização

De acordo com De Luca (2023), existem quatro métodos principais para fluxos de trabalho que envolvem modelagem paramétrica de edificações integrada à análise climática e de desempenho energético:

- **Automação:** Geração automática de variações projetuais baseadas em parâmetros predefinidos.
- **Projeto-Análise-Avaliação-Adaptação:** Processo iterativo que integra geração da forma, simulação e análise, com forte ênfase na interoperabilidade entre ferramentas.
- **Otimização:** Busca da melhor solução projetual considerando critérios de desempenho preestabelecidos, podendo incluir otimização multiobjetivo para equilibrar diferentes parâmetros.
- **Exploração Projetual:** Análise das relações entre parâmetros, sem necessariamente buscar uma solução ideal.

A eficácia dessas ferramentas foi validada em diversos estudos. Xue e Liu (2022) realizaram uma análise comparativa em edificação comercial, confrontando medições in loco de iluminação natural com simulações computacionais. Os resultados demonstraram forte correlação (Pearson = 0,955), corroborando a confiabilidade das ferramentas. Similarmente, Ricci et al. (2020) realizaram validação semelhante, focando em fachadas cinéticas e conforto interno.

O Building Information Model (BIM) emerge como ferramenta fundamental neste contexto, transcendendo a simples representação tridimensional ao integrar informações e processos durante todo o ciclo de vida do projeto. Sua principal contribuição reside na interoperabilidade, permitindo exportação de dados para simulações e otimizações precisas de parâmetros construtivos (ZHAO; ZHANG; WANG, 2022).

Contudo, Ratajczak, Siegele e Niederwieser (2023) apontam lacunas significativas na compatibilidade e interoperabilidade sistemática, especialmente em ferramentas de análise, simulação e otimização. Os autores defendem ainda que Integrar o Design Paramétrico, o Design Generativo e a automação no software BIM, representa um novo avanço que oferece aos arquitetos e engenheiros novas oportunidades ao trabalhar com edificações complexas. Entretanto, a complexidade operacional ainda é apontada como obstáculo à sua ampla adoção (DE LUCA, 2023).

Esta complexidade se manifesta principalmente na capacitação profissional. Ataman e Dino (2021) identificam que a principal barreira para a implementação de

análises energéticas em projetos arquitetônicos é a limitada familiaridade dos projetistas com ferramentas de análise de desempenho. Esta deficiência, também observada por De Luca (2023), evidencia a necessidade de metodologias que integrem ferramentas computacionais com curvas de aprendizado mais acessíveis, como o Ladybug Tools, facilitando assim a implementação de estratégias de eficiência energética desde as fases iniciais do projeto. Os autores argumentam que esta limitação é consequência de uma formação excessivamente teórica, quando na verdade o conhecimento para projetos performativos requer uma abordagem prática orientada a projetos (ATAMAN; DINO, 2021).

No campo da otimização, métodos matemáticos tradicionais podem ser inadequados para problemas com múltiplas variáveis e soluções não lineares (KISS; SZALAY, 2020). Em edificações, predominam algoritmos estocásticos baseados em população, como algoritmos genéticos e baseados em enxames ou colônias (FANG; CHO, 2019; KISS; SZALAY, 2020; GAN et al., 2020). Porém, os hiperparâmetros aplicados, como tamanho da população e limites de geração, tem impacto significativo nos resultados apresentados, podendo ser sub-ótimos (numa convergência prematura) ou demandar um custo computacional ainda maior (GAN et al., 2020).

Dessa forma, outros algoritmos disponíveis podem ser mais apropriados em função do problema. Em estudo comparativo recente, Silva, Garcia e Carlo (2022) avaliaram três algoritmos de otimização multiobjetivo: RBFMOpt (baseado em funções matemáticas), NSGA2 (estratégias genéticas) e MHACO (comportamento de colônia de formigas). O estudo focou na otimização do EUI de resfriamento e maximização do conforto térmico via PMV. O RBFMOpt destacou-se pela superior amplitude de resultados e velocidade de convergência, sendo recomendado para problemas complexos e computacionalmente intensivos.

De acordo com Yu et. al. (2023) um problema de otimização multiobjetivo é composto basicamente de: (i) Objetivos e Restrições que são as metas que se deseja atingir e os fatores que as limitam, onde a relação entre estes elementos normalmente é contraditória; (ii) Função ou Matriz de avaliação, que trata-se da equação matemática, algoritmo ou programa que irá calcular os objetivos e verificar se as restrições estão respeitadas; e (iii) Parâmetros de projeto, que são as variáveis que geram, quando modificadas, diferentes valores para a função objetivo e também

para as restrições. Também podem ser inseridos limites de amostras e iterações, os hiperparâmetros.

Como exposto por De Luca (2023), muitos trabalhos se focam no uso da simulação e otimização em estratégias de Form Finding, sendo os parâmetros relacionados a variações formais, assim entendemos que a análise da escolha de materiais em projetos cuja forma já esteja definida seja um campo ainda a ser explorado.

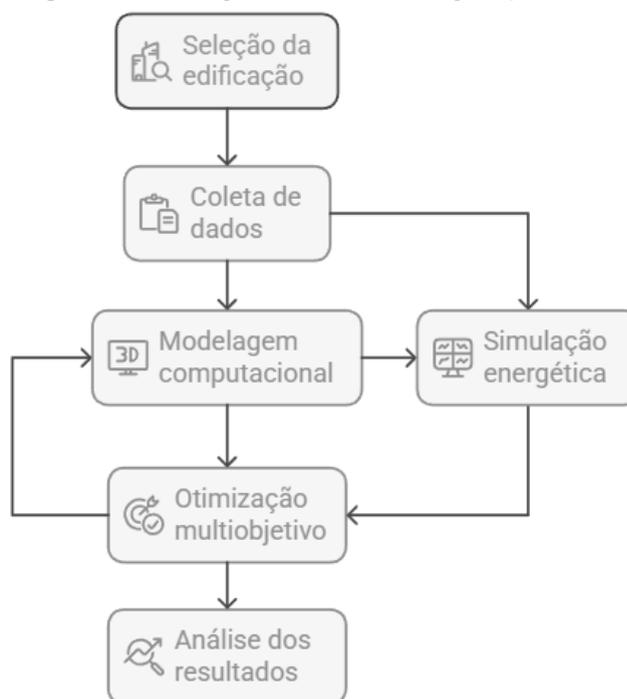
3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho empregou como metodologia científica a pesquisa experimental com abordagem quantitativa, combinando técnicas de modelagem computacional, simulação energética e algoritmos de otimização para exploração de alternativas projetuais eficientes. A pesquisa experimental busca resolver problemas práticos e gerar conhecimento útil para aplicações reais, selecionando e manipulando variáveis para entendimento de suas relações funcionais (SEVERINO, 2014).

O método aplicado fundamenta-se na análise paramétrica e na otimização multiobjetivo, permitindo avaliar diversas combinações de variáveis arquitetônicas e construtivas com o objetivo de minimizar o consumo energético e maximizar o conforto ambiental.

O trabalho foi desenvolvido através da implementação de um algoritmo no Grasshopper, linguagem de programação visual integrada ao Rhinoceros que permite gerar formas complexas sem a necessidade de escrever linhas de código avançado (MCNEEL, 2024). A metodologia segue um ciclo iterativo de modelagem, simulação e otimização, dividido basicamente nas etapas listadas a seguir, e ilustradas na figura 14.

- **Seleção da edificação de estudo:** Levando em conta tipologia arquitetônica, localização geográfica e disponibilidade de dados.
- **Coleta e tratamento de dados climáticos e construtivos:** Dados climáticos obtidos de bases digitais ou estações meteorológicas locais, materiais e sistemas construtivos disponíveis para o contexto, além de perfil de uso da edificação.
- **Modelagem paramétrica e simulação energética:** Importação do modelo, definição das regras paramétricas para variação da edificação, bem como simulações iniciais para definição da linha de base.
- **Otimização multiobjetivo:** Definição dos objetivos para minimização e/ou maximização, bem como das eventuais restrições.
- **Análise e validação dos resultados:** Comparação dos resultados em diferentes métodos de otimização.

Figura 14: Fluxograma da metodologia aplicada.

Fonte: O autor (2025).

Para atingir os objetivos da pesquisa, um estudo de caso em duas fases foi realizado, utilizando design computacional, simulações com ferramentas validadas, além de otimizações simples e multiobjetivo. O processo é desenvolvido tendo como base o projeto em modelo BIM, em fase de anteprojeto de um Restaurante Universitário. A primeira fase buscou a melhor combinação de materiais de construção para aplicação, já na segunda fase foi avaliada a melhor distribuição de diferentes modelos de elementos de sombreamento.

3.1. ESTUDO DE CASO 01 - OTIMIZAÇÃO DOS MATERIAIS APLICADOS

O projeto base utilizado neste estudo está sendo desenvolvido pela Superintendência de Projetos e Obras (SPO) da UFPE para a construção do Restaurante Universitário no Campus Vitória de Santo Antão. A edificação pode ser analisada em dois blocos adjacentes, o primeiro conta com um salão de refeições de pé-direito duplo, cujas paredes externas possuem amplos vãos envidraçados.

O bloco da cozinha inclui área de cocção, espaços destinados à armazenagem e ao pré-preparo de alimentos no térreo, além de ambientes administrativos e salas no pavimento superior. Este também possui um corredor envidraçado, com vista para a cozinha e o salão, uma vez que o restaurante também

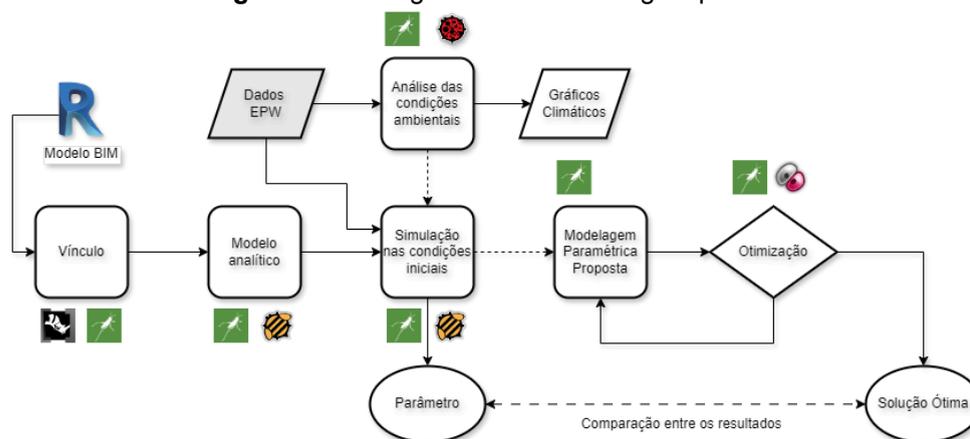
será utilizado como espaço de formação para profissionais de nutrição. O projeto contempla ainda uma marquise que percorre toda a fachada externa do salão, porém proporcionando sombreamento apenas para a área do térreo.

3.1.1. Metodologia

Baseando-se nas etapas listadas no tópico 3, a figura 15 ilustra a metodologia utilizada neste estudo de caso.

- **Vinculação do modelo BIM:** Essencial para integração das informações do projeto, como geometria e atributos. Permitindo uma análise mais precisa e colaborativa durante o desenvolvimento do projeto.
- **Criação do modelo analítico:** Representação das superfícies que conformam os ambientes e serão avaliadas. Crucial para posterior avaliação do comportamento da edificação sob diferentes contextos climáticos e de materiais aplicados.
- **Análise das condições ambientais:** Considera fatores climáticos como insolação, temperatura e umidade no contexto estudado. Isso ajuda a compreender o impacto dessas condições no desempenho da edificação.
- **Simulação do desempenho com as condições iniciais do projeto:** Aplicação dos dados climáticos no projeto sem intervenções, avaliando o desempenho da edificação, os resultados obtidos servem de comparação para as próximas etapas.
- **Modelagem paramétrica da edificação:** Definição de parâmetros modificáveis, que possam se ajustar às condições específicas do ambiente, neste caso serão os materiais aplicados.
- **Otimização da solução:** A partir de uma série de iterações envolvendo simulação, avaliação e ajustes em parâmetros.

Figura 15: Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: O autor (2025).

3.1.1.1. Vinculação do Modelo BIM

A interoperabilidade entre ferramentas é um aspecto fundamental no contexto do Building Information Modeling (BIM). Ela permite a troca eficiente de informações entre os diversos profissionais envolvidos no projeto, além de reduzir o tempo gasto com a recriação dos modelos em diferentes plataformas.

O modelo foi fornecido pela equipe da SPO-UFPE em formato nativo Revit-2023. Inicialmente, precisou ser feita a preparação do arquivo para a posterior criação do modelo analítico vinculado. Alguns aspectos da modelagem precisaram ser modificados ou removidos para um melhor processamento, porém sem comprometer o volume arquitetônico.

Foram removidos do modelo os seguintes elementos:

- Colunas - Pois estavam configuradas como delimitadores de ambientes, assim os volumes internos dos ambientes eram gerados com muitas faces, o que impacta na etapa de simulação e consequentemente otimização.
- Mobiliários (exceto do salão) e elementos de estaiamento da marquise - Apenas para melhor aproveitamento da memória disponível no computador, tendo em vista que temos um software rodando dentro de outro.
- Detalhes de WCs internos (Divisórias, portas, louças...) - As divisórias estão indicadas como delimitadores de ambiente, o que traria os mesmos transtornos relatados anteriormente.

- Ambientes fora do volume principal - Elementos internos, bem como os próprios ambientes do bloco de WCs na entrada do restaurante, além da guarita. Estes ambientes não são objeto do estudo, apenas o seu volume externo será mantido para questões de contexto.

Além disso, precisou-se ajustar o parâmetro de altura dos ambientes indicando-se como limitador de altura o nível superior. Esta configuração é essencial, pois caso as faces dos volumes dos ambientes não estejam em contato não serão avaliadas as trocas de calor entre elas durante a simulação.

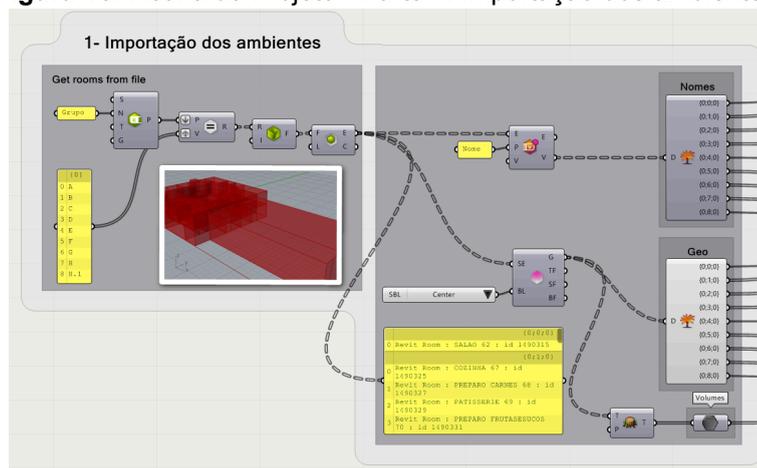
Para vincular o modelo BIM ao software responsável pela simulação e otimização, utilizamos o plugin Rhino.Inside-Revit que permite a execução do software de modelagem Rhinoceros no espaço de memória do Revit, com acesso a todos os seus elementos e dados (“Rhino.Inside®.Revit”, 2024). A conexão entre o modelo BIM e o modelo analítico, bem como as etapas de simulação e otimização, é realizada por meio do Grasshopper. A programação é realizada por meio da combinação de diversos blocos, ou componentes, que possuem funções específicas. Esses componentes possuem entradas (Input) e saídas (Output), e são interconectados por meio de “Wires”, pelos quais as informações fluem. As entradas podem ser alimentadas com parâmetros numéricos, textuais, geométricos e outros, inclusive dados de saídas de outros componentes.

Para a simulação energética, os elementos trazidos do modelo BIM incluem principalmente os volumes dos ambientes, aberturas, marquises, coberturas e elementos de contexto (como edificações vizinhas ou blocos externos que possam afetar o local da análise). Esses volumes são posteriormente transformados em *BREP (Boundary Representation)*, representações paramétricas de um sólido. Essa transformação permite que os demais algoritmos no Grasshopper manipulem esses elementos. As *BREPs* são então inseridas nos componentes do Honeybee, um plugin de análise energética integrado ao conjunto de ferramentas Ladybug Tools, conectando o modelo com ferramentas validadas de análise energética e iluminação natural, EnergyPlus e Radiance respectivamente (ROUDSARI; PAK; VIOLA, 2013).

Para uma compreensão mais detalhada dos processos adotados, apresentamos a rotina criada em partes. O Algoritmo 1, também apresentado na figura 16, detalha os passos para a coleta e vinculação dos elementos entre as

ferramentas. Os ambientes foram previamente categorizados no modelo BIM, agrupados por tipo de ambiente, esta divisão é necessária para a aplicação dos respectivos programas, mais detalhados a seguir, os *outputs* são gerados como sublistas de itens de acordo com o agrupamento indicado na tabela 01.

Figura 16: Rotina do Projeto - Parte 1: Importação dos ambientes.



Fonte: O autor (2025).

Algoritmo 01: Vinculação dos elementos.

Step 1: Get rooms from file - Search on BIM file the room elements with the listed parameters

If Param.Name = "Grupo", then

Param.Values = [A, B, C, D, E, F, G, H, H.1]

For i in Param.Values

Get Revit elements that match the parameter value, then create sublists

End For

Else

Output - "Error - Parameter not found"

End Else

End If.

Step 2: Get "Step 1" room names based on the listed parameter

Param.Name = "Nome"

Step 3: Get "Step 1" room shape based on the listed parameter

Boundary.Location = "Center"

Fonte: O autor (2025).

3.1.1.2. Criação do modelo analítico

Após o vínculo com o modelo BIM, o modelo analítico é criado através de alguns passos. O primeiro consiste na aplicação das configurações de programa para cada tipo de ambiente. Essas configurações incluem dados relacionados a

ocupantes, infiltração de ar externo e ajustes de temperatura para acionamento da climatização. Além disso, são considerados os consumos em quilowatt-hora (kWh) para iluminação, equipamentos elétricos, equipamentos a gás e água quente. Os ambientes foram agrupados em dez categorias, apresentadas na Tabela 01.

Tabela 01: Características dos grupos de ambientes do projeto.

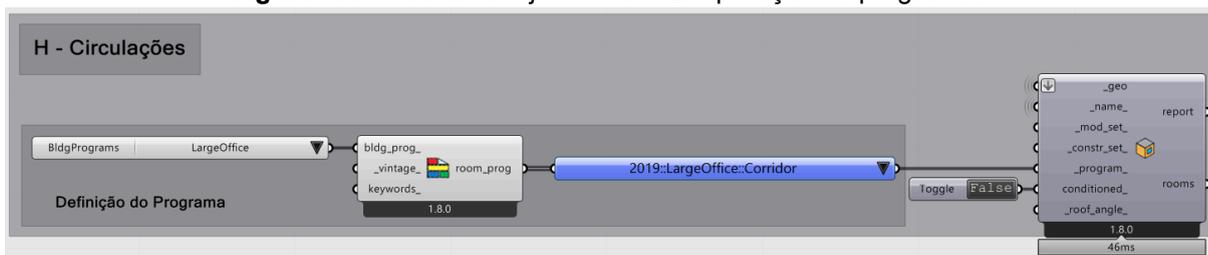
Grupo	Programa	Ocupação (P/m ²)	Setpoint Temp. (°C)	Illum. (W/m ²)	Equip. Elétricos (W/m ²)
A-Salão de Refeições	<i>QuickServiceRestaurant_Dining</i>	0.753	23.9 - 21.1	6.5	116
B-Preparo	<i>QuickServiceRestaurant_Kitchen</i>	0.054	-	11.7	270.9
C-Estoque	<i>SuperMarket_DryStorage</i>	0.036	-	4.1	3.3
D-Câmara Refrigerada	<i>SuperMarket_DryStorage</i>	0.036	10 - 0 ²	4.1	3.3
E-Câmara Congelada	<i>SuperMarket_DryStorage</i>	0.036	0 - (-18) ²	4.1	3.3
F-Administrativos	<i>College_Office</i>	0.054	23.9 - 21	8.0	10.8
G-Banheiros	<i>SuperMarket_Restroom</i>	0.086	-	6.8	—
H-Circulações	<i>LargeOffice_Corridor</i>	0.011	-	4.4	1.7
H.1-Circulação Mezanino	<i>LargeOffice_Corridor</i>	0.011	24 - 21	4.4	1.7
I-Plenum (Sem cargas)	-	-	-	0.01	-

Fonte: O autor (2025).

A figura 17 demonstra o fluxo necessário para aplicação dos programas em um grupo de ambientes, tendo sua rotina descrita no algoritmo 2. Os programas aplicados (tabela 01), em sua maioria são oriundos da biblioteca de normas ASHRAE disponibilizada pelo Honeybee sendo a ASHRAE 90.1 2019 | IECC 2015 a mais recente. Para as câmaras frias (D e E) os programas foram adaptados para considerar ajustes de temperatura mais reais.

² Portaria CVS-6/99, de 10.03.99 - Centro de Vigilância Sanitária da Secretaria de Saúde do Estado de São Paulo

Figura 17: Rotina do Projeto - Parte 2: Aplicação de programas



Fonte: O autor (2025).

Algoritmo 02: Aplicação dos programas.

Step 1: Create HB Rooms

For i in [Grupo]:

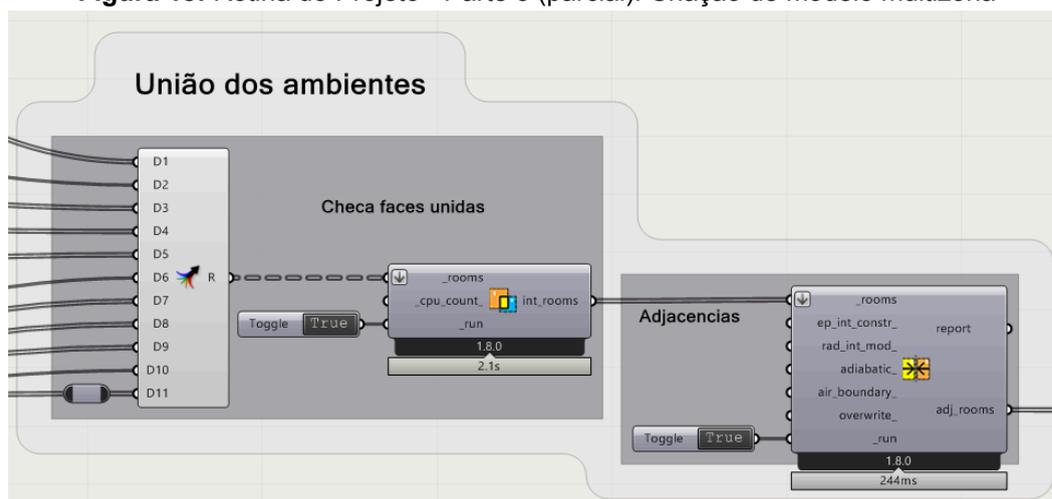
Merge the geometry and names defined in Algorithm 01 with the programs listed in Table 01.

End For

Fonte: O autor (2025).

O segundo passo consistiu na união dos ambientes para identificação e tratamento das superfícies adjacentes entre dois ou mais espaços, isso é necessário para a devida classificação das superfícies como paredes internas ou externas, tetos e pisos, além de também verificar onde deve ser computado troca de calor entre ambientes, criando assim um modelo multizona (figura 18).

Figura 18: Rotina do Projeto - Parte 3 (parcial): Criação de modelo multizona

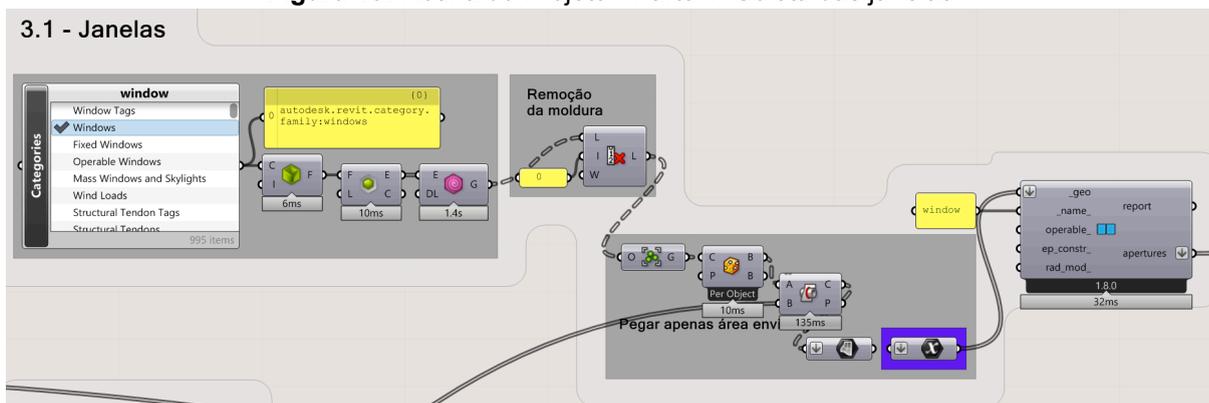


Fonte: O autor (2025).

Em seguida, foram selecionadas as aberturas, é importante destacar que as superfícies que representam as aberturas (janelas, portas e cortinas de vidro) devem estar corretamente alinhadas às superfícies que representam as paredes. Para que fosse mantido o vínculo com o modelo original, essa etapa demandou algumas

estratégias de decomposição de formas, intersecção de sólidos e manipulação de estruturas de dados. A figura 19 e o algoritmo 03 a seguir ilustram o processo para coleta das janelas, ação semelhante foi adotada para coleta das portas e cortinas de vidro.

Figura 19: Rotina do Projeto - Parte 4: Coleta das janelas



Fonte: O autor (2025).

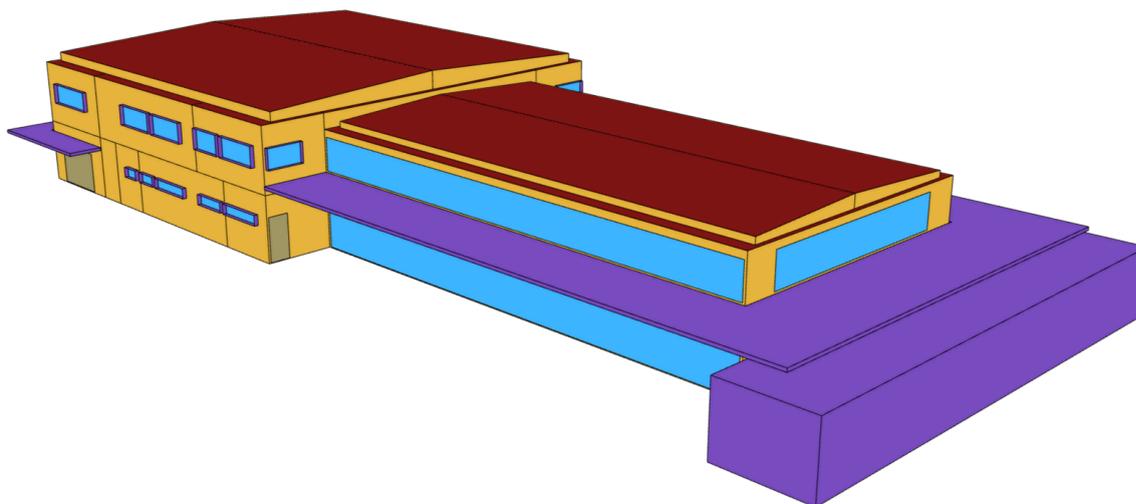
Algoritmo 03: Vínculo com as janelas do modelo BIM.

Step 1: Search on BIM file the windows ELEMENTS.
If Element.category = "Windows", then
Step 1.1: Get the edges of the window;
Step 1.2: Create a bounding box that encloses all elements of each window
Else
 Output - "Error - Windows not found"
End Else
End If.
Step 2: Intersect Breps (A x B)
 Input A: Output from **Step 1**
 Input B: Output from Algorithm 1-Step 3
 Output: Windows surfaces.
Step 3: Create HB-Windows.

Fonte: O autor (2025).

No quarto passo, procedemos à seleção e vinculação dos elementos de sombreamento, incluindo a marquise do salão e as molduras previstas nas janelas. Essas últimas são inseridas diretamente no Honeybee de forma paramétrica, podendo ser utilizadas como um dos parâmetros manipulados durante a otimização. Em relação aos demais elementos, para a vinculação foi feita apenas a seleção dos elementos utilizando os containers específicos do Rhino.Inside-Revit, a conversão para BREP é automática. A figura 20 apresenta o modelo analítico vinculado.

Figura 20: Modelo analítico gerado a partir do modelo BIM



Fonte: O autor (2025).

3.1.1.3. Análise das condições ambientais

Para realizar a análise das condições ambientais e as etapas de simulação, são utilizados arquivos climáticos que contêm informações como radiação solar, chuvas, umidade, direção e intensidade dos ventos (TEDESCHI, 2014). Normalmente, estes dados são obtidos de fontes como aeroportos e estações climáticas, sendo comum o uso do formato EPW (*EnergyPlus Weather data*).

Esses arquivos podem ser encontrados no repositório Climate.OneBuilding.Org e também por meio do “EPW Map”³ usando o componente do Ladybug. Entretanto, não há dados disponíveis para Vitória de Santo Antão, cidade onde será implantada a edificação estudada. Em situações semelhantes, outros estudos consideraram informações de cidades próximas. Zhang e Ji (2021) utilizaram dados de uma cidade localizada a 168 km do local estudado devido à indisponibilidade específica.

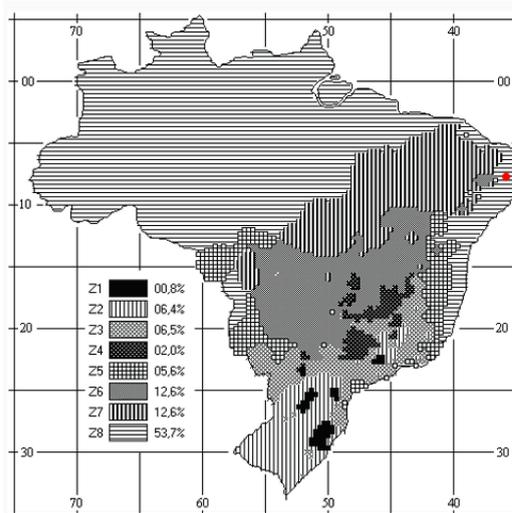
As cidades mais próximas de Vitória de Santo Antão, com dados disponíveis, são Surubim (58,87 km), Palmares (71,54 km) e Caruaru (77,52 km). No entanto, é importante considerar que essas cidades apresentam algumas diferenças devido às condições geográficas específicas de cada região.

Para suporte à decisão, recorreremos ao Zoneamento Bioclimático Brasileiro, definido na NBR 15220-3:2005. Porém, segundo Roriz (2012a) as oito zonas

³ epwmap. Disponível em: <<https://www.ladybug.tools/epwmap>>. Acesso em: 8 abr. 2024.

existentes (figura 21) não refletem adequadamente a diversidade climática do país, devido à sua grande dimensão. Esse zoneamento, que foi baseado em dados de apenas 300 cidades com as demais zonas estimadas por aproximação, desde 2012 tem sido objeto de debates e estudos de revisão.

Figura 21: Zoneamento bioclimático brasileiro conforme NBR 15220-3

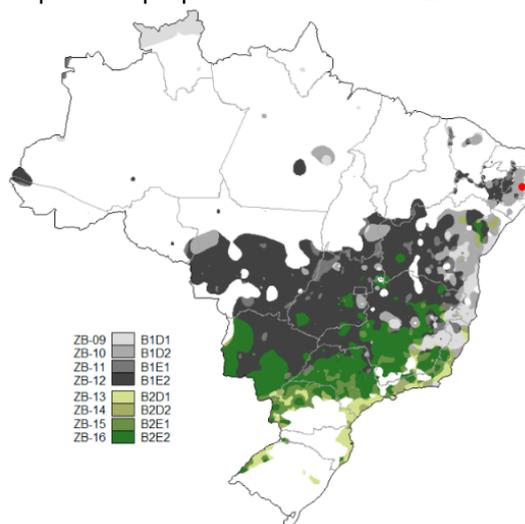


Fonte: Adaptado de NBR 15220-3⁴

Na primeira proposta de revisão do zoneamento bioclimático do Brasil, Roriz utilizou dados de temperaturas mínimas e máximas medidas pelo INMET correspondendo a 610 municípios, 11% das cidades Brasileiras, propondo a ampliação do zoneamento para 20 zonas após o agrupamento, que considerou (i) 5 subdivisões relacionadas à Temperatura Média do Ar e (ii) 4 subdivisões relacionadas à Amplitude Térmica (RORIZ, 2012a). Neste primeiro cenário, Vitória de Santo Antão é inserida na zona 10, como Palmares e Surubim, aproximadamente onde está marcado na figura 22.

⁴ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro. 2005.

Figura 22: Zonas 9 a 16 da primeira proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro

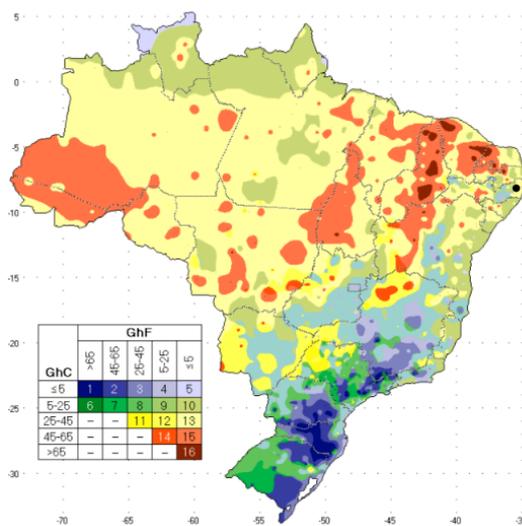


Fonte: Adaptado de RORIZ, 2012a

Na segunda proposta apresentada, ainda em 2012, houve um aumento significativo no número de dados medidos, abrangendo 1265 locais, obtidos de diversas fontes. A forma de classificação também foi diferente da versão anterior, pois, segundo o autor a tarefa depende de questões ainda em discussão entre os pesquisadores da área, além do fato de que os critérios precisam ser bem ponderados para evitar uma quantidade exagerada de zonas mas também evitar o mascaramento de diferenças climáticas significativas para o desempenho das edificações (RORIZ, 2012b).

A distribuição foi realizada com base em indicadores de rigor climático, utilizando o total de graus-horas de calor (GhC) e de frio (GhF), resultando em 16 zonas. Vitória de Santo Antão foi classificada na zona 13, assim como Palmares e Surubim (RORIZ, 2012b), conforme indicado aproximadamente na figura 23.

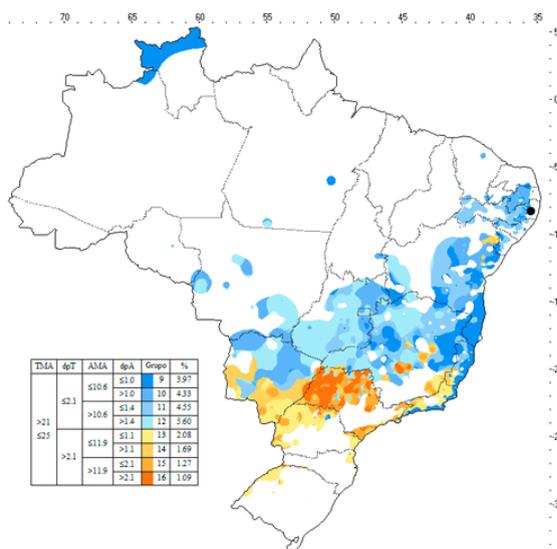
Figura 23: Segunda proposta para o Zoneamento Bioclimático do Brasil



Fonte: Adaptado de RORIZ, 2012b

A última proposta disponível teve nova ampliação de dados medidos, abrangendo 1513 cidades brasileiras, além de outras 230 sul-americanas. O método de classificação foi semelhante ao da primeira versão, considerando os valores das médias anuais de temperatura e amplitude térmica, além dos valores de desvio padrão destas grandezas, como resultado obteve-se 24 Zonas Bioclimáticas (RORIZ, 2013). A cidade estudada é apontada no Grupo 11 (figura 24), assim como Palmares, desta forma os dados desta cidade serão utilizados neste estudo.

Figura 24: Grupos Climáticos 9 a 16 de acordo com última proposta de o Zoneamento Bioclimático do Brasil

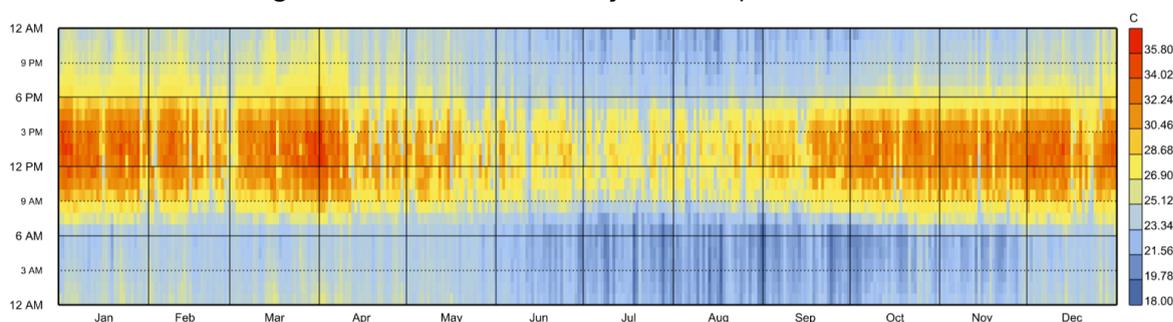


Fonte: Adaptado de RORIZ, 2014

De posse dos dados climáticos disponíveis é possível, através da construção de rotinas utilizando o plugin Ladybug Tools, fazer algumas análises. A primeira delas é quanto à temperatura do ar, que de acordo com CHEN et al. (2020) é um dos fatores ambientais mais impactantes no desempenho da edificação.

A cidade tem temperatura média anual de 25°C, com temperaturas mínimas e máximas registradas em 18°C e 35,8°C respectivamente. Os meses mais quentes estão compreendidos entre Outubro e Março, com aumento de 1 grau nas temperaturas média e mínima. A figura 25 apresenta a distribuição dos registros de temperatura ao longo de um ano.

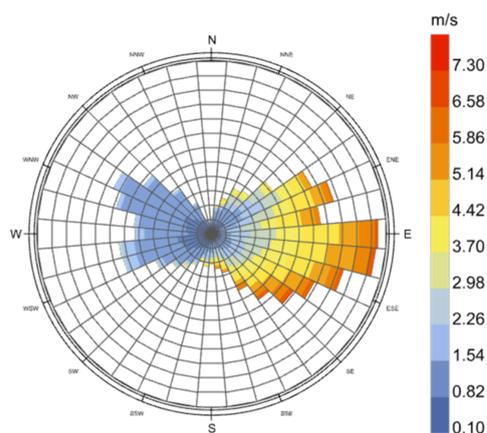
Figura 25: Gráfico de distribuição de temperaturas anuais



Fonte: O autor (2025).

O vento predominante na região vem da direção leste, com velocidade média de 2,10m/s (7,57 km/h), considerado de acordo com a Escala de Beaufort⁵ como brisa leve. A velocidade máxima registrada é de 7,30m/s (26,28 km/h), considerado como brisa moderada. A figura 26 apresenta a distribuição do vento no local estudado, considerando direção e velocidade.

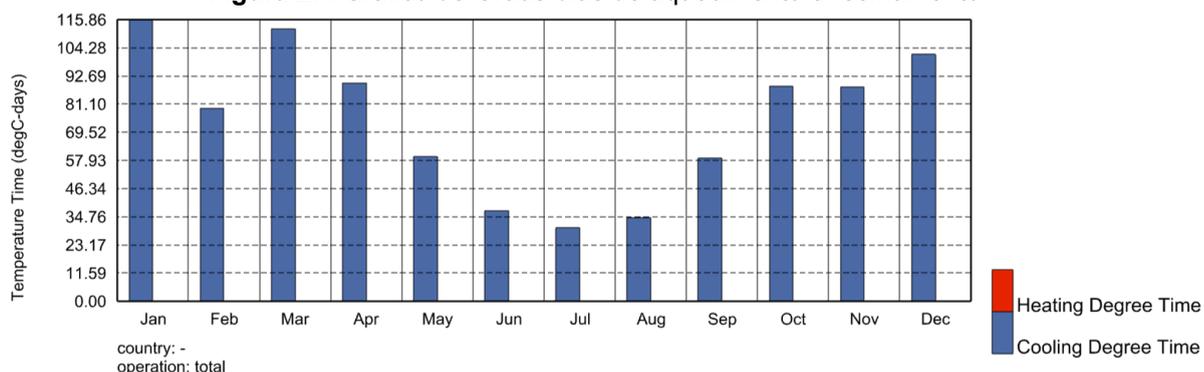
⁵ ROYAL METEOROLOGICAL SOCIETY. The Beaufort Wind Scale. Disponível em: <<https://www.rmets.org/metmatters/beaufort-wind-scale>>.

Figura 26: Rosa dos ventos da cidade estudada

Fonte: O autor (2025).

Outra análise importante que pode ser feita se refere a distribuição de graus-dia de resfriamento e de aquecimento. Trata-se de um método que busca estimar a quantidade de energia necessária para esfriar ou aquecer uma edificação (CHEN et al., 2020), para isso é calculada a diferença entre os valores medidos e os limites inferiores e superiores de temperatura definidos previamente, quando a temperatura for menor que o limite inferior a diferença é somada como “Graus-dias de Aquecimento”, caso seja maior que o limite superior trata-se de “Graus-dias de Resfriamento”.

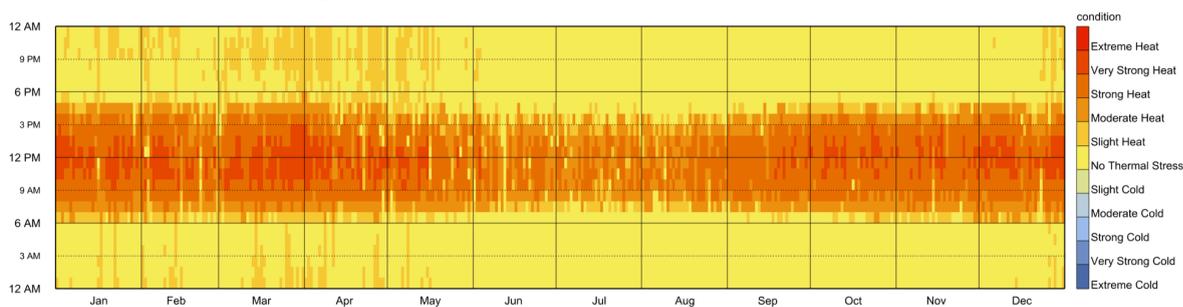
Considerando a temperatura mínima aceitável como 18°C e máxima como 23°C, foi gerado o gráfico da figura 27. Como esperado para uma cidade do Nordeste Brasileiro, não foram apresentados Graus-dias de aquecimento. Sendo Janeiro, Março e Dezembro os meses com maiores valores de Graus-dias de resfriamento registrados, que são os meses com mais valores de temperatura acima da média.

Figura 27: Gráfico de Graus-dias de aquecimento e resfriamento.

Fonte: O autor (2025).

Levando em conta a faixa de conforto possível entre 9 e 26°C (padrão adotado no Ladybug), é possível observar (figura 28) que em parcela significativa do tempo os habitantes estão experienciando situações de stress térmico causada por calor, sendo em 35,8% do tempo entre calor moderado e extremo, reforçando a necessidade de estratégias de resfriamento ativas ou passivas.

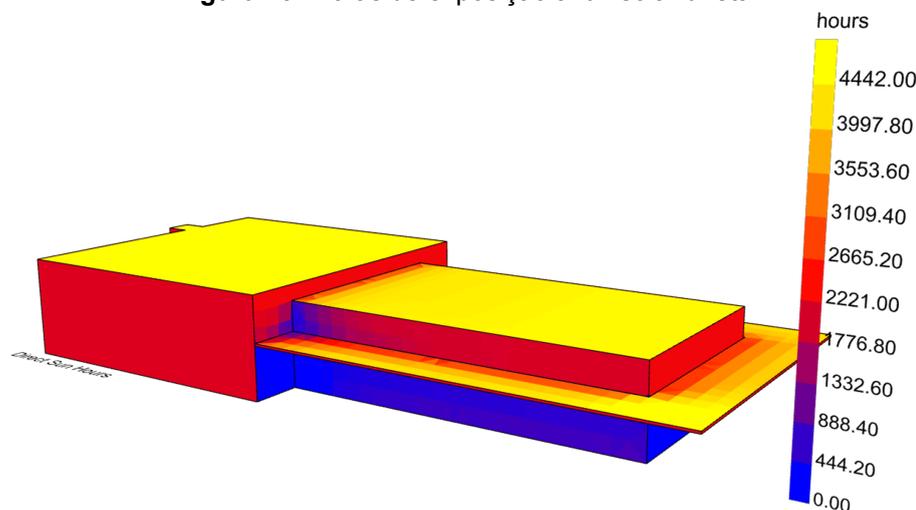
Figura 28: Conforto por hora na cidade estudada



Fonte: O autor (2025).

Utilizando um volume simplificado da edificação e elementos de contexto, analisamos também a quantidade de horas de radiação direta nas faces do prédio, grandeza que impacta diretamente na demanda de resfriamento da construção (CHEN et al., 2020). Consideramos uma subdivisão das faces da edificação em uma malha quadriculada de 1 metro, o período analisado foi de um ano, na faixa horária das 5h às 18h, totalizando 4.745 horas. Nota-se (figura 29) uma incidência alta em praticamente todas as faces da edificação, é possível observar também que a marquise cumpre bem seu papel de bloquear a radiação solar em boa parte da parede do salão.

Figura 29: Horas de exposição à luz solar direta



Fonte: O autor (2025).

3.1.1.4. Simulação com as condições iniciais do projeto

A simulação é uma forma muito eficaz de lidar com o relacionamento complexo entre clima, eficiência energética, conforto e outros (KIRIMTAT et. al. 2016), assim utilizamos o modelo analítico devidamente configurado, os dados climáticos da cidade de Palmares e considerando as análises feitas quanto ao clima local realizamos a simulação da eficiência da edificação em sua condição atual de projeto. Os resultados desta simulação servirão de base para comparação com as soluções apresentadas via design generativo nas etapas de otimização.

Para tal, é necessário que sejam definidas as métricas que serão avaliadas, e em próximo momento otimizadas. A escolha das métricas, ou indicadores avaliados, é uma etapa crítica, pois depende não só das características e ocupação prevista para a edificação, mas também do contexto onde está inserida, inclusive o climático. Assim, métricas para edificações comerciais podem ser diferentes das avaliadas em edificações residenciais. Da mesma forma, prédios construídos em locais de clima frio tendem a ter objetivos de otimização diferentes de outros localizados em climas quentes. Para este projeto as métricas avaliadas são:

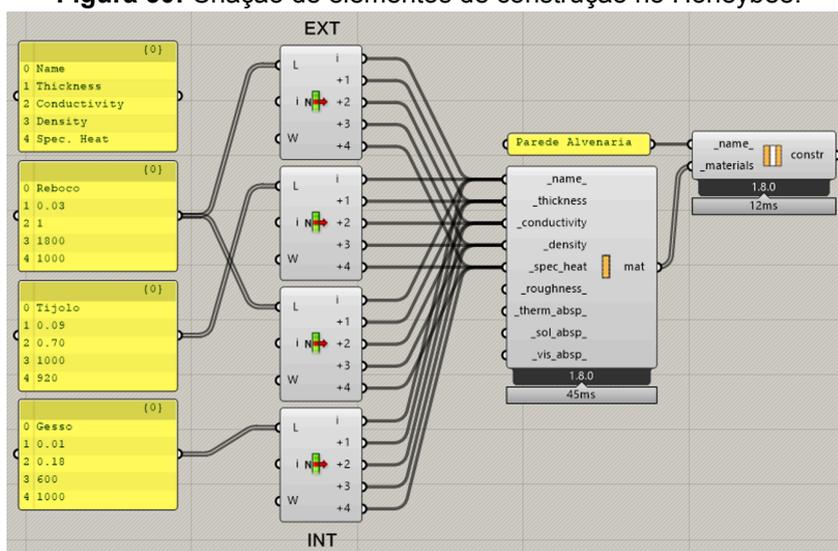
- EUI - *Energy Use Intensity*: Considera o consumo anual de energia com aquecimento, resfriamento e iluminação, é expresso em Kwh/m² (TOUTOU; FIKRY; MOHAMED, 2018; FANG; CHO, 2019; ZHANG; JI, 2021; GABER et al., 2023; JI et al., 2023; RATAJCZAK; SIEGELE; NIEDERWIESER, 2023).
- PMV - *Predicted Mean Vote*: Índice que prevê o valor médio de um grande grupo de pessoas, segundo a escala de sensações (GHORBANI NAEINI et al., 2023; YU et al., 2023).

As características construtivas que serão consideradas no modelo energético são agrupadas em “*Construction Sets*”, estes conjuntos contém as informações requeridas para a simulação no Energyplus, podendo ser aplicadas a um ambiente ou a todo o modelo. Novas configurações de construção podem ser criadas, aplicadas em função da Zona Climática (com base na ASHRAE 90.1) em que a edificação se encontra ou ainda escolhidas dentro da biblioteca disponibilizada no Honeybee com cerca de 250 variações disponíveis.

Tendo em vista que na atual fase em que o projeto se encontra ainda estão indefinidos os materiais de construção que serão adotados, consideramos algumas alternativas de materiais para efeito de simulação e identificação da melhor eficiência energética. As tipologias avaliadas irão considerar variações nos materiais aplicados em paredes, vidros (janelas e cortinas de vidro), piso e cobertura, com base no que é comumente utilizado na região.

Para que estes materiais sejam considerados na simulação energética eles são criados como instâncias legíveis pelo Open Studio e EnergyPlus através do componente “*HB Opaque Material*”. A figura 30 ilustra o processo de criação de uma parede de alvenaria, onde são informadas as características de cada camada do elemento.

Figura 30: Criação de elementos de construção no Honeybee.



Fonte: O autor (2025).

As informações necessárias, além da espessura dos materiais, são as seguintes: (i) Condutividade Térmica, (ii) Densidade e (iii) Calor Específico, definidas como:

- (i) “Quociente de densidade da taxa de fluxo de calor e gradiente de temperatura termodinâmico que tem a mesma direção do fluxo de calor”. É expressa em $W/(m \cdot K)$, pela letra grega λ (lambda). (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2019b)
- (ii) “Quociente de massa que passa pelo volume aparente de um corpo”. É expressa em kg/m^3 , pela letra grega ρ (Rô). (Idem, 2019a)

- (iii) “Quociente de capacidade térmica (quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema) pela massa. É expressa em $J/(kg \cdot K)$, pela letra “c”. (Idem, 2019b)

Os demais inputs não são obrigatórios e para simplificação da simulação serão considerados os valores padrão. A norma ISO 10456, que trata da determinação de valores térmicos de projeto, recomenda que para os cálculos de transferências térmicas sejam utilizados os valores fornecidos pelos fabricantes, entretanto caso não estejam disponíveis ou definidos recomenda a utilização dos valores tabelados apresentados (Idem, 2007). A tabela 02 lista os materiais de construção que serão aplicados nas configurações de construção analisadas nas próximas etapas, consideramos os valores apresentados na supracitada norma, exceto onde indicado.

Tabela 02: Valores térmicos de projeto para materiais em aplicações na construção

Material	Condutividade Térmica	Densidade	Calor Específico
Concreto	1,15	1800	1000
Concreto Armado	2,30	2300	1000
Concreto Celular Autoclavado	0,17	400	1000
Reboco (Cimento e Areia)	1,00	1800	1000
Tijolo Cerâmico	0,70	1000	920
Telha Fibrocimento *	0,35	1600	840
Telha Termoacústica *	0,019044	290	1000
Azulejo (Piso)	0,065	400	1500
Vidro	1,00	2500	750
Ligas de Alumínio	160	2800	880
Aço	50	7800	450
Gesso	0,18	600	1000
Placa de Gesso	0,21	700	1000
Madeira	0,12	450	1600

* Valores obtidos em folhetos técnicos, Brasilit e Dânica respectivamente

Fonte: O autor (2025).

Para os elementos envidraçados foram consideradas duas das opções disponíveis na biblioteca do Honeybee: *Generic Single Pane* e *Generic Double Pane*.

A primeira simulação realizada, considera a carga anual estimada por m² para resfriamento, aquecimento e iluminação. Foram testados alguns cenários, considerando tipologias construtivas normalmente adotadas no país, com diferentes materiais sendo aplicados, materiais estes montados e inseridos na rotina de acordo com as características apresentadas na tabela 03, exceto para as configurações padronizadas (Padrão HB e Zona 1A). Neste primeiro momento manipulamos apenas tipos de paredes e janelas, sem diferenciação quanto à localização interna ou externa. Os elementos não modificados seguem o “Padrão HB”. Os valores encontrados são apresentados na tabela 03 e expressos em kWh/m².

Tabela 03: Resultados das primeiras simulações - Energia

#	Configuração	Resfriamento	Aquecimento	Iluminação	EUI
01	Padrão HB	529,17	-	27,57	816,74
02	Zona 1A	578,39	0,15	27,57	866,10
03	Tijolos cerâmicos + Vidro Simples	594,74	-	27,57	882,30
04	Tijolos cerâmicos + Vidros Duplos	586,57	-	27,57	874,13
05	Bloco de Concreto + Vidro Simples	652,61	-	27,57	940,17
06	Bloco de Concreto + Vidros Duplos	644,01	-	27,57	931,57
07	Concreto Armado + Vidros Simples	628,10	-	27,57	915,66
08	Concreto Armado + Vidros Duplos	648,98	-	27,57	936,55

Fonte: O autor (2025).

O melhor resultado atingido foi apresentado para o cenário com o *Construction Set* padrão do Honeybee. Em seguida o cenário baseado na Zona Bioclimática, apesar deste apresentar também uma pequena carga de aquecimento. Entretanto, estas configurações de construção não são usuais na região. O padrão

HB por exemplo, considera na montagem das paredes externas com camadas de tijolo, concreto, ar e material isolante, totalizando pouco mais de 35 cm de espessura.

Assim, considerando os padrões usuais de construção, o melhor resultado é atingido com a configuração 04, sendo esta adotada como referencial para demais etapas.

3.1.1.5. Modelagem paramétrica e otimização da edificação

Em um segundo momento, ampliando a variedade de composições de materiais possíveis para aplicação na edificação, foi realizada uma otimização com o objetivo identificar o melhor conjunto de materiais aplicados que resultasse no menor valor de EUI. A otimização foi feita no Galápagos, um plugin de otimização nativo do Grasshopper, que utiliza um solucionador heurístico, recomendado para problemas com grande número de variáveis, cujo resultado não pode ser determinado através de solucionadores lineares (TEDESCHI, 2014). As configurações de materiais adotadas foram transformadas em variáveis discretas que servem como inputs para otimização, tendo em vista que as variáveis aceitas podem ser apenas “*Number Sliders*” do Grasshopper.

Em computação evolucionária, estas variáveis ou parâmetros são chamados de genes e cada conjunto formado por variações aleatórias de cada um dos genes é chamado de genoma (RUTTEN, 2011). Os genes que são avaliados neste problema e a faixa de variação estão listados no quadro 01.

Quadro 01: Parâmetros para simulação de uso de energia.

Gene	Elemento Construtivo	Faixa de Variação
A	Parede Externa (PE)	[0, 3]
B	Parede Interna (PI)	[0, 3]
C	Laje (L)	[0, 1]
D	Vidros Externos (VE)	[0, 1]
E	Vidros Internos (VI)	[0, 1]
F	Telha (T)	[0, 2]

Fonte: O autor (2025).

A quadro 02 lista a configuração das variações de elementos construtivos adotados, indicando a espessura e o material de construção aplicado em cada camada, apresentadas no sentido Exterior-Interior.

Quadro 02: Configurações materiais dos elementos construtivos

Elemento Construtivo	Variação	Camada (Material - Espessura em mm)				
		1	2	3	4	5
Parede Externa	0 - Alvenaria - blocos cerâmicos	Reboco - 30	Bloco Cerâmico - 90	Reboco - 30	Gesso - 10	
	1 - Alvenaria - blocos de concreto	Reboco - 30	Bloco de Concreto - 140	Reboco - 30	Gesso - 10	
	2 - Alvenaria - blocos de concreto celular	Reboco - 30	Bloco Conc. Celular - 90	Reboco - 30	Gesso - 10	
	3 - Concreto armado	Reboco - 30	Concreto Armado - 100	Reboco - 30	Gesso - 10	
Parede Interna	0 - Alvenaria - blocos cerâmicos	Gesso - 10	Reboco - 20	Bloco Cerâmico - 90	Reboco - 20	Gesso - 10
	1 - Alvenaria - blocos de concreto	Gesso - 10	Reboco - 20	Bloco de Concreto - 140	Reboco - 20	Gesso - 10
	2 - Alvenaria - blocos de concreto celular	Gesso - 10	Reboco - 20	Bl. Conc. Celular - 90	Reboco - 20	Gesso - 10
	3 - Concreto armado	Gesso - 10	Reboco - 20	Concreto Armado - 100	Reboco - 20	Gesso - 10
Laje	0 - Concreto Armado	Contrapiso - 50	Concreto Armado - 100	Reboco - 30	Gesso - 10	
	1 - Pré-moldada	Contrapiso - 50	Bl. cerâm- 80	Reboco - 30	Gesso - 10	
Vidro Externo/ Interno	0 - Vidro Simples	Vidro Claro - 6				
	1 - Vidro Duplo	Vidro Claro - 6	Ar - 12,7	Vidro Claro - 6		
Telhas	0 - Fibrocimento	Fibrocimento - 8				
	1 - Alumínio	Alum. - 1				
	2 - Sanduíche	Aço - 0,7	PU - 30	Aço - 0,7		

Fonte: O autor (2025).

3.1.2. Resultados e Discussão

O processo foi conduzido em um notebook com processador Intel Core i5-1135G7 e 20 GB de RAM. Realizamos duas rodadas de otimização, na primeira utilizamos o componente de simulação simplificado chamado “HB *Annual Loads*”. Embora as simulações sejam mais rápidas (cerca de 35 segundos), os desenvolvedores alertam que pode haver até 5% de erro com esse componente, especialmente considerando o menor número de medições por hora. No entanto, em fases iniciais de projeto, quando a precisão não é crítica, esse componente pode ser adequado para tomada de decisões (“HB-Energy Primer”, 2024).

Na segunda rodada, empregamos uma simulação mais completa, utilizando o componente “Model to OSM”. Esse componente converte o modelo energético criado em um modelo do OpenStudio e, em seguida, executa a simulação no EnergyPlus. Cada simulação nesta etapa durou pouco mais de 2 minutos.

3.1.2.1. Simulação Simplificada

O otimizador foi configurado utilizando o solver evolucionário com encerramento do processo após 20 gerações estagnadas, ou seja, sem novas melhorias, tendo cada geração um total de 50 elementos. O fator de “*Inbreeding*”, ou endocruzamento, foi de 75%, e o percentual de indivíduos mantidos para a próxima geração foi de 5%.

Após um processo de cerca de 40 horas, o melhor resultado foi de 638,033 kWh/m², nascido na geração 6. Valor 27% menor do que o resultado adotado como referência (configuração 04 da tabela 03). Outras duas configurações atingiram valores muito próximos, os melhores resultados obtidos nesta simulação estão apresentados no quadro 03.

Quadro 03: Melhores resultados da primeira rodada de otimização

#	PE	PI	L	VE	VI	T	EUI
1	Blocos de concreto celular	Blocos cerâmicos	Pré-moldada	Duplo	Duplo	Termoacústicas	638,03
2	Blocos cerâmicos	Blocos de concreto celular	Pré-moldada	Duplo	Duplo	Termoacústicas	638,60
3	Blocos de concreto celular	Blocos de concreto	Pré-moldada	Duplo	Duplo	Termoacústicas	638,98

Fonte: O autor (2025).

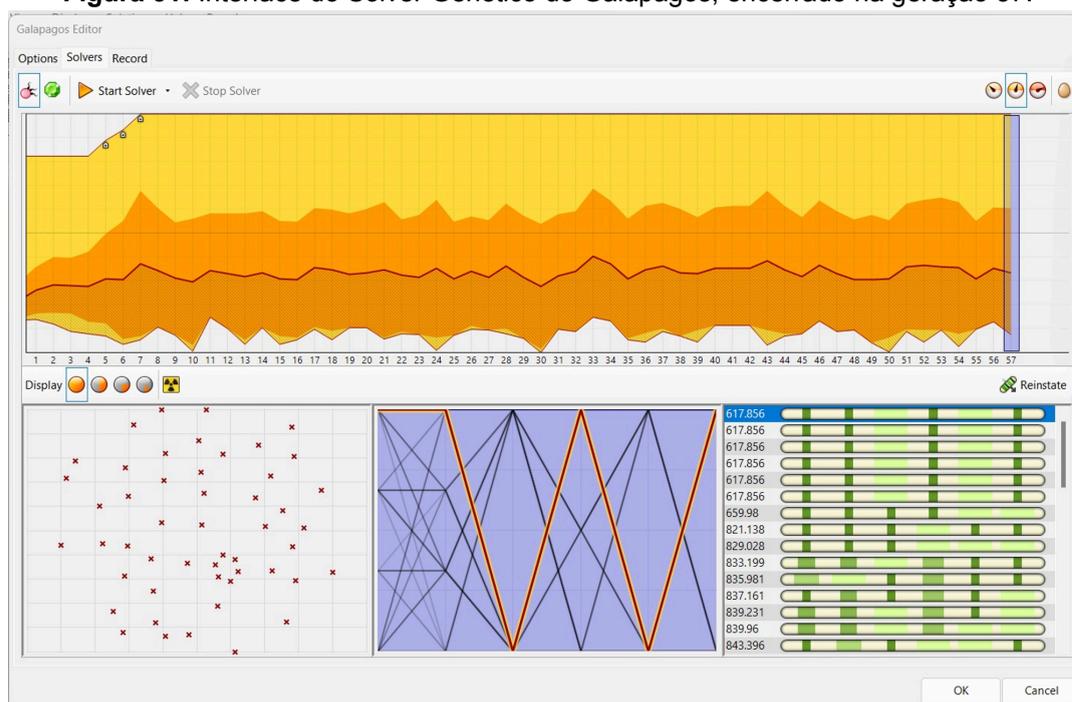
É possível notar nesta primeira análise que estariam bem definidos os tipos de vidros, laje e telhas, com as variações ocorrendo apenas nos tipos de paredes adotadas. Por sua vez, o pior resultado obtido durante o processo foi de 1159,37 kWh/m², obtido na Geração 3, sendo o genoma configurado da seguinte forma: paredes externas em blocos de concreto; paredes internas em concreto armado, laje pré-moldada, telhas termoacústicas, vidros externos e internos simples.

3.1.2.2. Simulação Completa

Na segunda rodada, também foi utilizado o solver evolucionário, porém com a mudança no limite de gerações, alterado para 50 gerações estagnadas e um maior percentual de indivíduos mantidos para a próxima geração foi de 10%.

A primeira geração de indivíduos teve como melhor solução o valor de 675,63 kWh/m², na Geração 5 encontrou-se um valor de 653,567 kWh/m², 3,26% inferior ao inicial. Um novo candidato a mínimo global foi obtido na Geração 6 onde o menor valor atingido foi de 639,8 kWh/m², 5,30% inferior ao valor inicial. A Geração 7 por sua vez atingiu um resultado de 617,86 kWh/m², 8,55% inferior ao valor inicial. Devido ao limite de gerações estagnadas definido, o processo rodou até a geração 57 tendo como tempo total cerca de 96 horas, validando por fim o resultado obtido na geração 7. A figura 31 apresenta o resumo da otimização com indicação das gerações onde foram encontrados novos candidatos.

Figura 31: Interface do Solver Genético do Galápagos, encerrado na geração 57.



Fonte: O autor (2025).

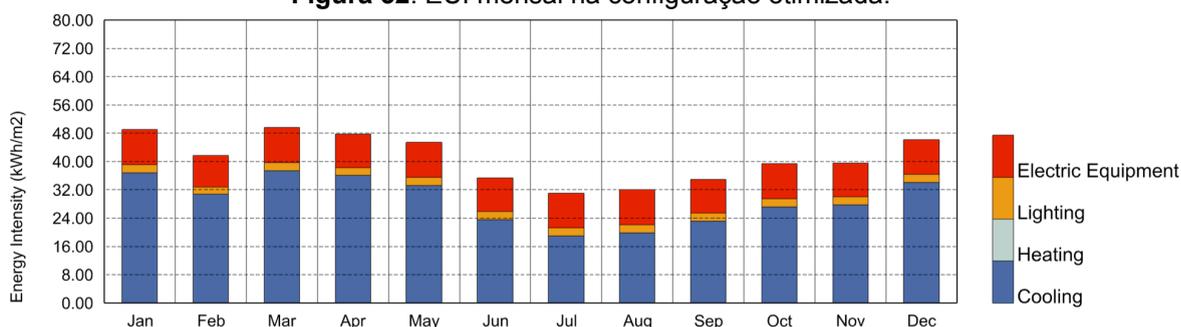
O resultado obtido foi 3,16% menor que o atingido com a simulação simplificada. Em comparação aos resultados dos cenários iniciais simulados (tabela 03), o resultado obtido nesta etapa apresenta redução 29,31% do EUI estimado no melhor cenário não padronizado, e 34,28% em relação ao pior cenário, que considerou apenas paredes de blocos de concreto e vidros simples. O conjunto de características, ou genoma, do melhor e pior resultado desta rodada estão indicados respectivamente no quadro 04.

Quadro 04: Melhor e pior resultado da segunda rodada de otimização

#	PE	PI	L	VE	VI	T	EUI
1	Concreto Armado	Concreto Armado	Concreto Armado	Duplo	Simples	Termoacústicas	617,86
2	Blocos cerâmicos	Blocos cerâmicos	Pré-moldada	Simples	Simples	Termoacústicas	939,28

Fonte: O autor (2025).

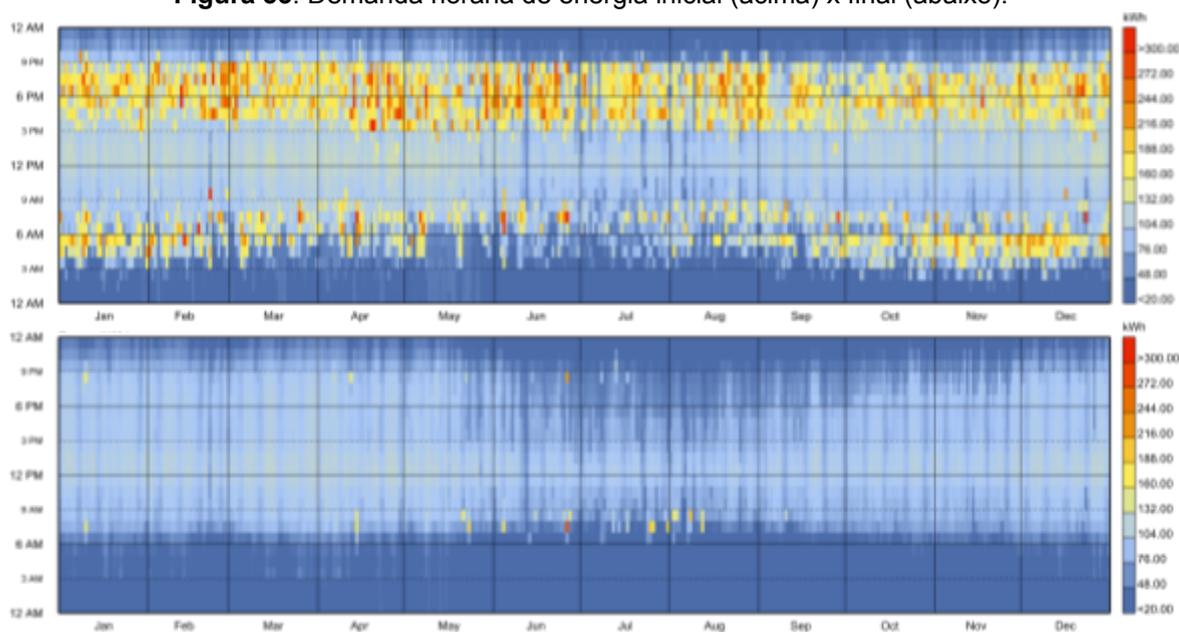
A figura 32 apresenta a distribuição mensal do EUI por tipo de uso considerando a configuração otimizada. Assim como nas simulações iniciais, o maior uso de energia está vinculado ao sistema de resfriamento, seguido de equipamentos elétricos e iluminação. Considerando a área total de pouco mais de 970m² o maior consumo se dá nos meses de março e abril com cerca de 46.500kWh consumidos.

Figura 32: EUI mensal na configuração otimizada.

Fonte: O autor (2025).

A partir da simulação realizada, também é possível analisar o montante de energia demandada por hora. Tal valor é importante para definição de modalidades tarifárias junto às concessionárias de energia, além da demanda contratada que corresponde a potência em kW que a concessionária é obrigada a disponibilizar ao cliente. Caso a demanda medida ultrapasse 5% deste montante, o consumidor é obrigado a pagar uma multa de duas vezes o valor da tarifa vigente para cada kW ultrapassado (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021). Na prática, a tarifa paga para cada kW ultrapassado equivale a 3 vezes o valor original, tornando esta ocorrência bastante onerosa.

A figura 33 demonstra uma comparação da energia demandada no projeto inicial e na opção otimizada. Nota-se que com o projeto otimizado a demanda contratada poderia estar 100 e 160kW. Porém, caso o contrato fosse firmado desta forma com o projeto não otimizado haveria cobrança de ultrapassagem em praticamente todos os meses.

Figura 33: Demanda horária de energia inicial (acima) x final (abaixo).

Fonte: O autor (2025).

É importante destacar que, ao simular o melhor resultado obtido em cada rodada de otimização no outro método considerado, encontramos significativas diferenças entre os dois tipos de simulação (tabela 08). Estudos futuros podem debruçar sobre o comparativo dos métodos de cálculo utilizados.

Tabela 08: Comparativo dos métodos de simulação aplicados aos melhores genomas.

Genoma	Simplificado	Completo	Diferença
(R1) PE: Blocos de concreto celular, PI: Blocos cerâmicos, L: Pré-moldada, VE: Duplo VI: Duplo, T: Termoacústicas	* 638,03	808,52	21,08%
(R2) PE: Concreto Armado, PI: Concreto Armado, L: Concreto Armado, VE: Duplo, VI: Simples, T: Termoacústicas	649,52	* 617,86	-5,12%

Fonte: O autor (2025).

3.1.2.3. Análise de Conforto Térmico

A análise de conforto é complexa, por envolver aspectos de tolerâncias individuais, bem como vestimenta utilizada pelos indivíduos e atividades praticadas no momento da análise, além dos aspectos ambientais como ventilação, temperatura do ar e umidade (GHORBANI NAEINI et al., 2023). Com os resultados de temperatura, umidade e ventilação gerados na simulação é possível avaliar as

condições de conforto dos espaços. Por ser o principal e maior ambiente da edificação, abordamos aqui apenas o Salão de Refeições.

Efetuamos simulações considerando o cenário inicial e otimizado, sem climatização, avaliando assim o impacto da escolha dos materiais na melhoria ou não do conforto interno. A tabela 09 apresenta a média do Percentual de Pessoas Desconfortáveis-PPD, para tais cenários. Esta grandeza está relacionada ao percentual de pessoas com valores de PMV abaixo do aceitável (inferiores a -0,5 e superiores a +0,5) no período avaliado. Importante destacar que o melhor resultado possível é 5% e o indicado por normas é que esteja abaixo de 10% (Ladybug Primer, 2024)

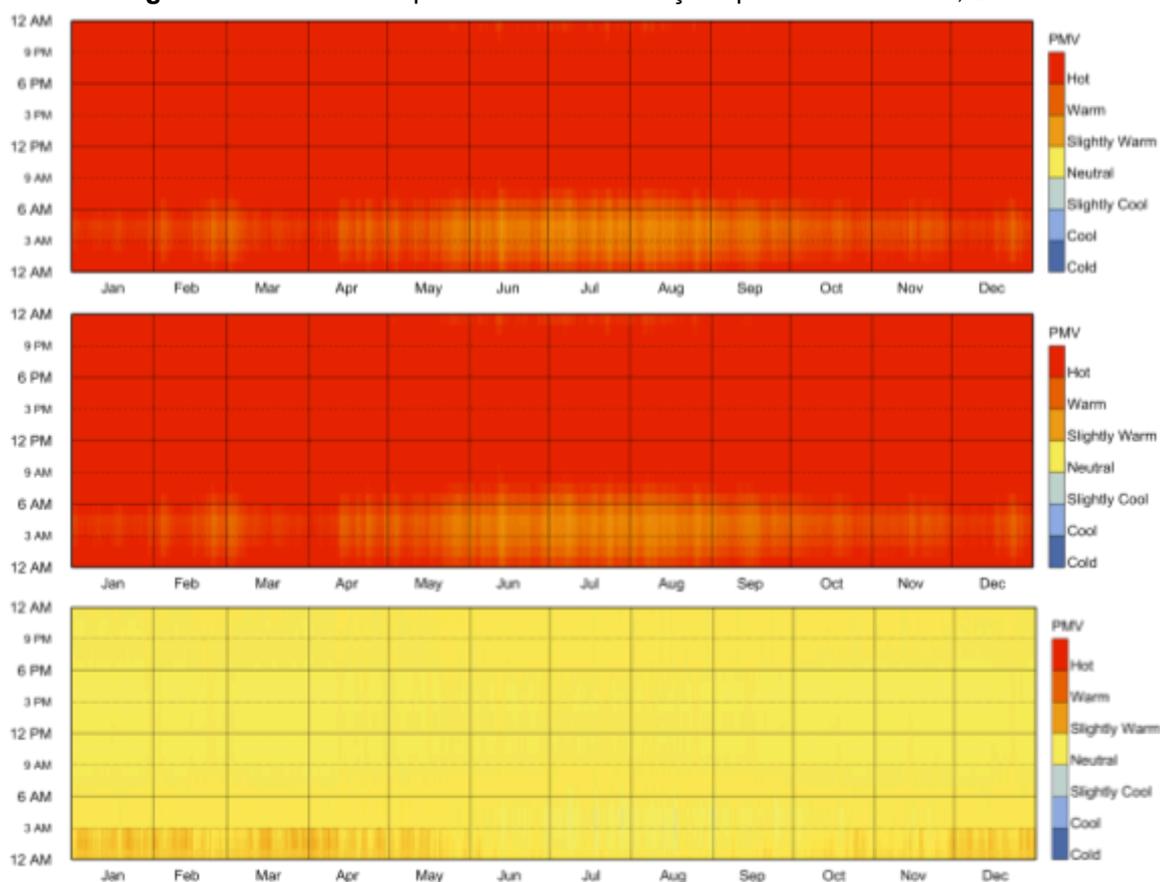
Apesar dos ganhos em redução do uso de energia, para os materiais avaliados não houve melhoria significativa nos aspectos de conforto, provavelmente pelo fato de que não existem impactos em valores de umidade e velocidade do vento, demandando ainda uso de climatização. A figura 34 apresenta uma distribuição horária do PMV relativo ao salão, para os três cenários avaliados.

Tabela 09: Comparativo dos métodos de simulação aplicados aos melhores genomas.

#	Cenário	Salão	Edificação
1	Inicial - Não climatizado	96,42%	82,67%
2	Otimizado - Não climatizado	96,17%	81,48%
3	Otimizado - Climatizado	5,66%	48,42%

Fonte: O autor (2025).

Figura 34: PMV horário para o Salão de Refeições para os cenários 1, 2 e 3.



Fonte: O autor (2025).

3.2. ESTUDO DE CASO 02 - OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DE SOMBREAMENTO PASSIVO

Partindo do modelo previamente otimizado na fase 01, o objetivo nesta fase é simular e otimizar um sistema de proteção solar para o principal ambiente da edificação, de forma a melhorar a eficiência da edificação como um todo e manter bons índices de conforto.

3.2.1. Metodologia

Foi implementada uma rotina utilizando Grasshopper, além do plugin Ladybug Tools. Estas ferramentas são as duas mais utilizadas para este fim (KIRIMTAT et al., 2016). Para o processo de otimização multiobjetivo, utilizamos a ferramenta Opossum (WORTMANN, 2017) com o algoritmo RBFMOpt (*Radial Basis Function Multi-Objective Optimization*), visto que este possui bom desempenho na solução de problemas similares, além de reduzido custo computacional quando comparado a algoritmos evolutivos (SILVA; GARCIA; CARLO, 2022). A metodologia proposta para

3.2.1.1. Atualização do Modelo Analítico

O modelo otimizado na fase anterior estudo prévio é inserido nesta nova rotina através de importação no formato JSON, onde todas as características dos ambientes e materiais aplicados são mantidos. Apesar de não haver impedimento para o desenvolvimento de toda a análise em uma única rotina do Grasshopper, esta fragmentação ajuda a manter o algoritmo mais enxuto, minimizando também a chance de erros ao permitir modificações apenas nos aspectos que estão sendo trabalhados nesta etapa. As demais configurações necessárias para essa fase do estudo são detalhadas a seguir.

Para realizar as simulações de Luz Natural, adicionamos as características dos materiais ao modelo através de "Radiance Modifiers", onde as principais informações requeridas são (i) Transmitância Visual e (ii) Refletância. De acordo com a CIE S 017:2020 tais grandezas são definidas como:

- (i) "razão do fluxo luminoso transmitido, para o fluxo incidente", expressa pela letra grega τ (tau) e tem sua unidade como I.
- (ii) "razão do fluxo luminoso refletido, para o fluxo incidente", expressa pela letra grega ρ (rô) e tem sua unidade como I. (CIE, 2020)

Quanto às refletâncias, de acordo com a norma ISO 8995-1, elas são definidas de acordo com as superfícies internas dos ambientes. A tabela 10 indica as faixas de valores recomendadas e os valores que adotamos neste trabalho.

Tabela 10: Valores de refletância das superfícies

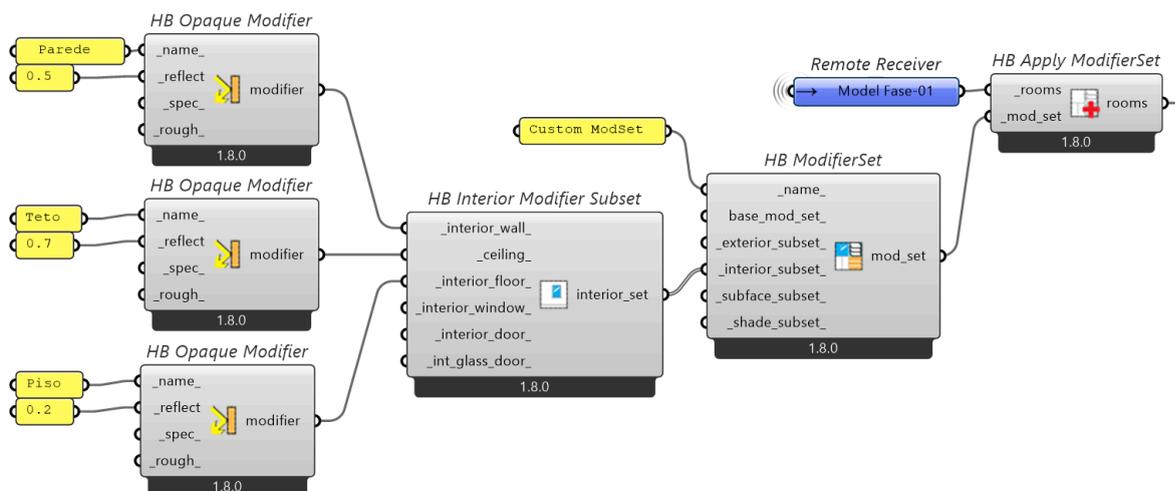
Superfície	Recomendação (ISO, 2002)	Valor adotado
Teto	0,6 - 0,9	0,7
Paredes	0,3 - 0,8	0,5
Piso	0,1 - 0,5	0,2

Fonte: O autor (2025).

Nos demais inputs existentes, como índice de refração e rugosidade, mantivemos os valores padrão do Honeybee, o preenchimento dos mesmos é opcional. A figura 36, apresenta um trecho da rotina criada incluindo estas informações.

Figura 36: Aplicação das refletâncias no modelo

Apply Reflectances



Fonte: O autor (2025).

Para avaliação da iluminância nos postos de trabalho existem, segundo a NBR 15215-4, duas possibilidades. A primeira é a determinação de pontos estratégicos nos locais de trabalho e a segunda consiste na criação de uma malha de pontos abrangendo todo o ambiente (ABNT, 2023). Assim, considerando que os layouts ainda estão em definição, adotamos a segunda alternativa. Para isto, é necessário determinar o índice K do local, através da equação 01 utilizando os valores de comprimento (C) e largura (L) dos ambientes, além da distância vertical entre o plano de trabalho e topo das janelas (Hm), para esta última será adotado o valor padrão de 1,30m.

$$K = C * L / (Hm * (C + L)) \quad \text{Eq. 01}$$

Em seguida o valor encontrado é correlacionado com a tabela 11, também apresentada na NBR 15215-4. A quantidade de pontos é a mínima para que se atinja um erro inferior a 10%, podendo ser aumentada para maior precisão do resultado (ABNT, 2023).

Tabela 11: Quantidade mínima de pontos a serem medidos, de acordo com a NBR 15215-4.

K	Nº de Pontos
$K < 1$	9
$1 < K < 2$	16
$2 < K < 3$	25
$K > 3$	36

Fonte: Adaptado de ABNT (2023).

Entretanto, para definição da quantidade de pontos de medição (ou sensores) no EnergyPlus, de forma parametrizada e vinculada aos ambientes, utilizamos o componente “*Sensor Grid from Rooms*” onde a malha de sensores é distribuída no espaço de acordo com um espaçamento (*grid size*) definido. Para que a maioria dos ambientes possuam sensores em quantidade próxima ao mínimo recomendado pela norma citada, consideramos para os grandes ambientes (Salão, Cozinha e Circulações) o *grid size* de 1 metro, enquanto para os demais ambientes adotamos 80 centímetros.

Nos ambientes onde não há contribuição de iluminação natural, inicialmente não há a necessidade de previsão de sensores porém, para que pudéssemos manter a estrutura da listas de ambientes, necessária em outras etapas como na visualização dos resultados no modelo, adotamos um valor elevado para o *grid size*, resultando em uma quantidade reduzida de pontos e evitando impacto significativo no tempo de processamento. A quantidade de sensores por ambiente ficou distribuída como apresentado na tabela 12.

Tabela 12: Quantidade de pontos a serem medidos

Ambiente	K	Nº mínimo de pontos	Luz Natural	Grid Size	Nº adotado de pontos
Acabamento e Distribuição	1,41	16	S	0,8	32
Antecâmara	0,88	9	N	10,0	1
Armazenamento de Pratos e Pannelas	1,39	16	S	0,8	33
BWC Acessível 01	0,96	9	S	0,8	7
BWC Acessível 01	0,96	9	S	0,8	6
BWC Feminino	1,56	16	S	0,8	24

Ambiente	K	Nº mínimo de pontos	Luz Natural	Grid Size	Nº adotado de pontos
BWC Masculino	1,56	16	S	0,8	24
Câmara - Congelados	1,25	16	N	10,0	1
Câmara - Hortifruti	1,09	16	N	10,0	1
Câmara - Laticínios	1,09	16	N	10,0	10
Circulação Mezanino	6,33	36	S	1,0	50
Circulação Térreo	5,56	36	S	1,0	54
Convivência Funcionários	1,76	16	S	0,8	36
Copa	1,63	16	S	0,8	28
Cozinha	3,19	36	S	1,0	93
Dispensa Diária	1,00	16	S	0,8	8
Dispensa Secos	1,76	16	S	0,8	36
DML Mezanino	0,85	9	N	10,0	1
DML Térreo	0,85	9	N	10,0	1
Doca - Higienização	1,68	16	N	10,0	4
Lavagem de Pratos e Panelas 1	1,54	16	S	0,8	71
Lavagem de Pratos e Panelas 2	1,76	16	S	0,8	58
Nutrição Mezanino	1,27	16	N	10,0	2
Nutrição Térreo	1,27	16	S	0,8	27
Patisserie	1,16	16	S	0,8	12
Plataforma Elevatória Mezanino	0,66	9	N	10,0	1
Plataforma Elevatória Térreo	0,66	9	N	10,0	1
Preparo de Carnes	1,16	16	S	0,8	12
Preparo de Saladas e Vegetais	1,16	16	S	0,8	12
Preparo de Frutas e Sucos	1,16	16	S	0,8	12
Reunião	1,52	16	N	10,0	3
Saída de Lixo	0,74	9	N	10,0	1
Sala 01	1,52	16	S	0,8	40
Sala 02	1,85	16	S	0,8	40

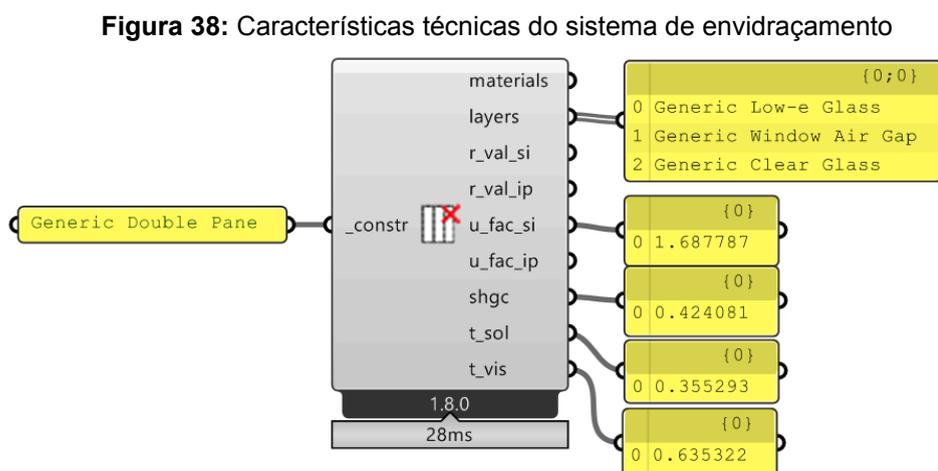
sistema passa a efetuar os cálculos considerando uso ininterrupto das 6:00 às 18:00.

3.2.1.2. Montagem do sistema de envidraçamento

Para uma simulação mais precisa dos painéis com elementos de sombreamento, utilizamos a ferramenta WINDOW, desenvolvida pela Berkeley University (LBNL, 2014), nela indicamos as camadas que compõem o sistema de envidraçamento para obter os valores de Ufactor, Fator Solar (SHGC) e transmitância do conjunto.

Estas grandezas servem para construção de elementos no modelo analítico a ser simulado no Honeybee. Estratégia semelhante foi aplicada em outros trabalhos como na modelagem de um fluxo de trabalho, para projeto de edificações residenciais, adaptável às mudanças climáticas (ROSSI-SCHWARZENBECK; FIGLIOLA, 2019). As características dos elementos envidraçados foram obtidas no WINDOW e inseridas posteriormente na rotina do grasshopper.

Para garantir que os valores considerados entre as duas ferramentas são compatíveis, comparamos os valores apresentados ao desconstruir o *Construction Set* “Generic Double Pane” do Honeybee (fig. 38), com os valores calculados pelo WINDOW (fig. 39) para um sistema com camadas de características similares. O comparativo entre os valores obtidos está apresentado na tabela 13.



Fonte: O autor (2025).

Tabela 13: Comparação dos dados entre o Honeybee e WINDOW.

Tipo	Honeybee	WINDOW	Diferença
Ufactor (W/m ² *K)	1,688	1,642	2,73%
SHGC (%)	42,4	42,8	0,4 pp
Tvis (%)	63,5	66,0	2,5 pp

Fonte: O autor (2025).

Figura 39: Montagem e cálculo de sistema similar ao “Generic Double Pane” no WINDOW

The screenshot displays the WINDOW software interface for configuring a window assembly. The top section shows the assembly name 'Painel Padrão' and various parameters: # 2, Tilt: 90°, IG Height: 1000.00 mm, Environmental Conditions: NFRC 100-2010, IG Width: 1000.00 mm, Overall: 24.570 mm, and Mode: . A diagram shows a cross-section of a double-pane window with two glass panes (1 and 2) and an air gap. Below the diagram is a detailed table of assembly components and their properties.

	ID	Name	Mode	Thick	Flip	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tir	E1	E2	Cond	Comment
-	Glass 1	13561 ECT173_6T.KCC		6.0	<input type="checkbox"/>	0.437	0.242	0.377	0.740	0.134	0.135	0.000	0.837	0.031	1.000	
	Gap 1	1 Air		12.7												
-	Glass 2	9708 6_Clear.OCN		5.9	<input type="checkbox"/>	0.779	0.073	0.072	0.883	0.082	0.082	0.000	0.840	0.840	1.000	

Center of Glass Results Temperature Data Optical Data Angular Data Color Properties Radiance Results

Ufactor	SC	SHGC	Rel. Ht. Gain	Tvis	Keff	Layer 1 Keff	Gap 1 Keff	Layer 2 Keff
W/m2-K			W/m2		W/m-K	W/m-K	W/m-K	W/m-K
1.642	0.492	0.428	322	0.660	0.0565	1.0000	0.0300	1.0000

Fonte: O autor (2025).

A diferença entre os valores obtidos em ambas as ferramentas é muito pequena, desta forma entendemos que os sistemas de envidraçamento calculados no WINDOW podem ser incorporados ao fluxo de trabalho do HB sem prejuízos.

A partir do modelo padrão configurado no WINDOW, apresentado na figura 25, foram criados mais 3 tipos de montagem, adicionando uma camada relativa ao painel perfurado (figura 40) em cada um deles, conforme dimensões apresentadas na tabela 14. O painel perfurado está a 15mm do vidro externo. O material considerado foi chapa de alumínio, com espessura de 1,2mm e peso de 3,24kg/m² (considerando a chapa lisa).

Tabela 14: Características dos painéis perfurados.

Tipo	Ø (mm)	Dist. Furos (mm)	% abertura
A	10	17,5	25,6%
B	25	65,0	11,6%
C	60	70,0	57,7%

Fonte: O autor (2025)

Figura 40: Configuração de painel perfurado no WINDOW.

Shading Layer Library

ID #: 53005

Name: Painel Perfurado A - 25%

Product Name:

Manufacturer: Evandro

Type: Perforated screen

Material: 51014 Alumínio - HD

Permeability Factor (thermal) 0.256

Perforated Screen

Geometry: Circular

Dimensions

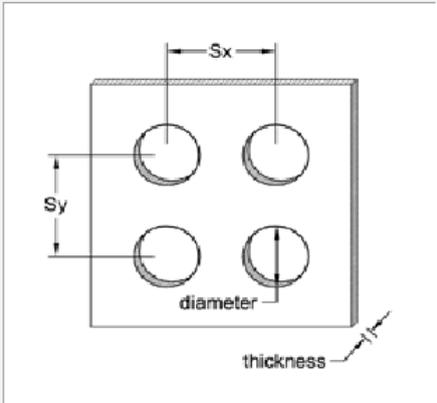
Diameter: 10.000 mm

Thickness: 1.200 mm

Spacing

Sx: 17.500 mm

Sy: 17.500 mm



Fonte: O autor (2025)

Desta forma, ao final temos 4 tipos de módulos a serem aplicados na edificação e, após a execução dos cálculos no software WINDOW, obtivemos os dados técnicos para cada conjunto (tabela 15), estas informações são então inseridas no Honeybee como *inputs* para a configuração dos *Radiance Modifiers* e *EP-Construction Sets* (figura 41), utilizados nas simulações de iluminação e energia respectivamente.

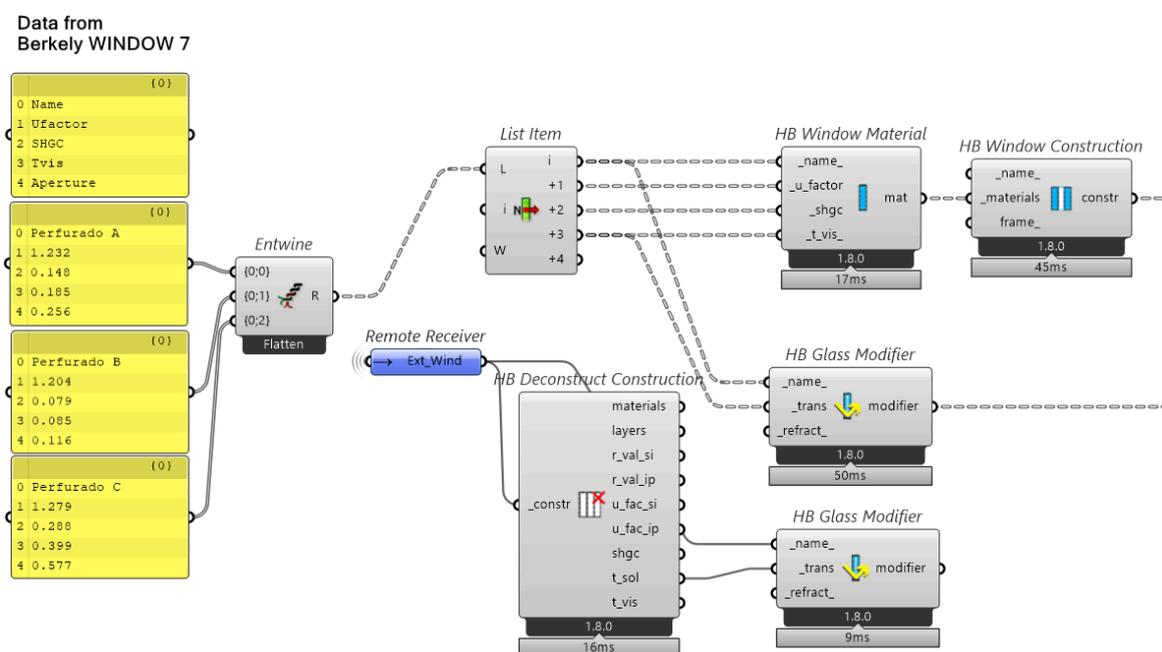
Tabela 15: Características técnicas dos elementos de sombreamento.

Tipo	Ufactor (W/m ² *K)	SHGC	Tvis
Padrão	1,642	0,428	0,660
Perf. A	1,232	0,148	0,185
Perf. B	1,204	0,079	0,085
Perf. C	1,279	0,288	0,399

Fonte: O autor (2025).

Figura 41: Inserção dos dados dos módulos no Grasshopper.

Windows + Shade Constructions



Fonte: O autor (2025).

3.2.1.3. Simulação nas condições iniciais

Assim como na Fase 01, simulamos a condição inicial a ser considerada nesta etapa. Além da EUI foram adicionadas as seguintes métricas para avaliação:

- UDI - *Useful Daylight Illuminance*: Porcentagem do tempo que o espaço recebe a iluminação natural adequada (NOORZAI; BAKMOHAMMADI; GARMAROUDI, 2022; GABER et al., 2023).
- GA - *Glare Autonomy*: Porcentagem do tempo que o espaço está livre de ofuscamento. Baseado em DGP - *Daylight glare probability* que é Probabilidade de ofuscamento causado pela iluminação natural em determinado ponto. Para esta métrica, o objetivo é que tenha valor inferior a 0,4 indicando assim que o ofuscamento é imperceptível. Valores acima de

0,45 causam desconforto nos usuários (NOORZAI; BAKMOHAMMADI; GARMAROUDI, 2022).

Os dados climáticos foram os mesmos utilizados na Fase 01, os resultados obtidos foram: 908,14 kWh/m² de EUI; 30,38% para o UDI, considerando a média de todos os ambientes da edificação; e 91,19% de tempo livre de ofuscamento (GA). Considerando que nesta fase as modificações analisadas se aplicam somente ao fechamento externo do salão, é interessante também que sejam avaliados os indicadores especificamente neste ambiente, são eles: EUI 875.47 kWh/m²; UDI de 85%; de GA de 95,6%.

É importante destacar que para análise individualizada do EUI por ambiente foi necessário realizar a simulação do ambiente de forma separada, sendo assim não são considerados espaços adjacentes e as barreiras à insolação que estes representam. Entretanto, os valores obtidos servem para comparação.

3.2.1.4. Modelagem paramétrica dos elementos de sombreamento

Para distribuição dos tipos de painéis entre os módulos da cortina de vidro analisada adotamos uma divisão randômica em 3 níveis, onde o total de módulos é dividido em dois grupos e estes dois grupos divididos novamente, desta forma, temos três parâmetros sendo manipulados na geração de alternativas no projeto (tabela 16). Neste momento consideramos mais relevante a quantidade de peças de cada tipo, do que o local exato de aplicação das mesmas, sendo assim o *input* “seed”, que trata da variação da distribuição randômica, não será manipulado.

Tabela 16: Parâmetros para simulação de uso de energia.

Parâmetro	Descrição	Faixa de Variação
Split N1	Divisão de primeiro nível	[0, 0.1 ... 0.9, 1.0]
Split N2	Divisão de segundo nível	[0, 0.1 ... 0.9, 1.0]
Split N3	Divisão de terceiro nível	[0, 0.1 ... 0.9, 1.0]

Fonte: O autor (2025).

3.2.1.5. Otimização da solução

Como motor de otimização adotamos o Opossum, *plugin* do Grasshopper, que possui dentre os *solvers* disponíveis o algoritmo baseado em modelo substituto RBFMOpt (WORTMANN, 2017). Este algoritmo, premiado no *International Black Box*

*Optimization Competition 2019*⁶, utiliza técnicas de *Machine Learning* para encontrar bons resultados com menos simulações através de funções matemáticas para aproximação dos resultados, reduzindo assim drasticamente o custo computacional do processo de otimização que, diferente dos algoritmos genéticos, não precisa simular novamente em todas as iterações.

O plugin foi desenvolvido focado em problemas de otimização arquitetônica que demandam simulações, como iluminação natural e uso de energia, onde dependendo da complexidade da edificação uma simulação pode levar até horas. Otimizações metaheurísticas baseadas em populações, como os algoritmos genéticos, podem se tornar inviáveis nestes casos (WORTMANN, 2017). A primeira fase deste trabalho utilizou este tipo de algoritmo com apenas um tipo de simulação (energia) e a otimização chegou a durar 96 horas.

O problema atual envolve 3 simulações por iteração (Luz Natural, Energia e Ofuscamento), com um total de 1000 possíveis soluções devido aos parâmetros de variação definidos.

3.2.2. Resultados e Discussão

O processo foi executado na mesma máquina da fase anterior. Para fins de comparação foram realizadas várias rodadas de otimização, mono e multiobjetivo. Para todas, o *solver* foi configurado para ser interrompido ao atingir o máximo de 100 iterações, ou após 30 execuções sem melhoria do resultado.

3.2.2.1. Otimização mono objetivo

Inicialmente executamos três rodadas com foco em cada uma das métricas avaliadas de forma individual. Não foram estabelecidas restrições ou faixas de valor para as outras métricas.

A. Rodada 01 - Minimizar EUI

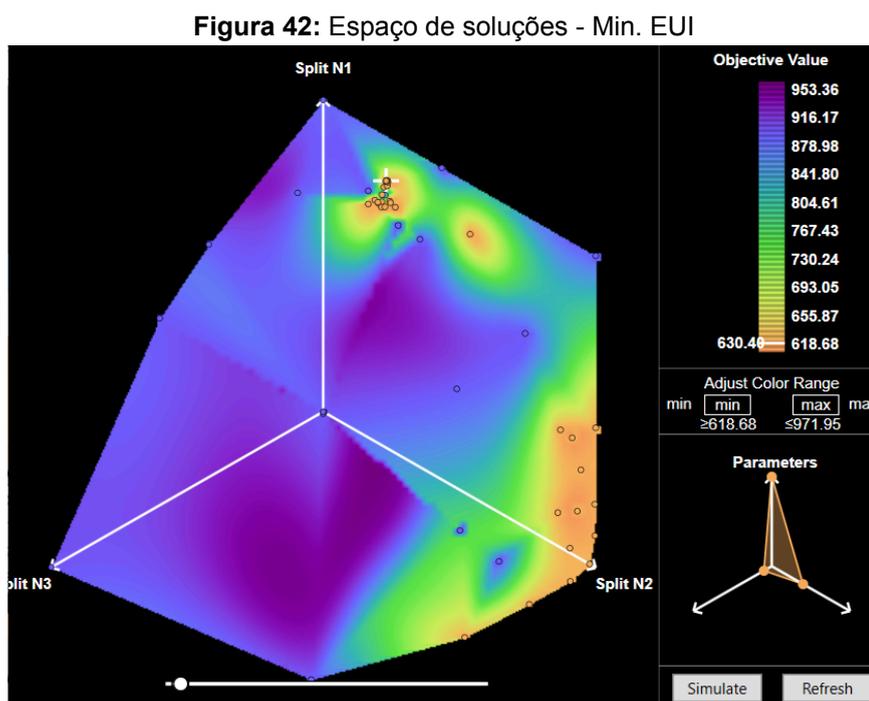
A primeira rodada focou apenas na redução do EUI total da edificação, o processo foi interrompido após 53 iterações, com cerca de 2h de processamento, pois desde a 23^a não foram encontrados novos valores mínimos. Com a

⁶ Institute for Computational Design and Construction | University of Stuttgart. Disponível em: <<https://www.icd.uni-stuttgart.de/research/research-tools/opossum/>>. Acesso em: 11 out. 2024.

configuração obtida para os três parâmetros (1,0; 0,4; 0,1) o melhor valor de EUI atingido foi 630,35 kWh/m². UDI e GA ficam respectivamente em 29,83% e 91,29%. Essa configuração utiliza 145 painéis do tipo B e 23 do tipo C.

O gráfico da figura 42 apresenta o espaço de soluções deste primeiro ciclo. Como a ferramenta utiliza aproximação, ao escolher uma das soluções disponíveis, ou seja, um ponto no gráfico, esta é simulada novamente e o valor pode ser ligeiramente diferente.

O resultado obtido nesta etapa representa uma redução de 277,79 kWh/m² no EUI (30,59%) do cenário inicial, já em relação a UDI e GA não houveram mudanças significativas sendo -0,55 pontos percentuais no primeiro e ganho de 0,10 no segundo. Em relação ao Salão houve redução de 43,32 kWh/m² no consumo, tendo sido obtido um EUI de 832,154 kWh/m², UDI de 87,9% e GA de 99,5%.



Fonte: O autor (2025)

B. Rodada 02 - Maximizar UDI

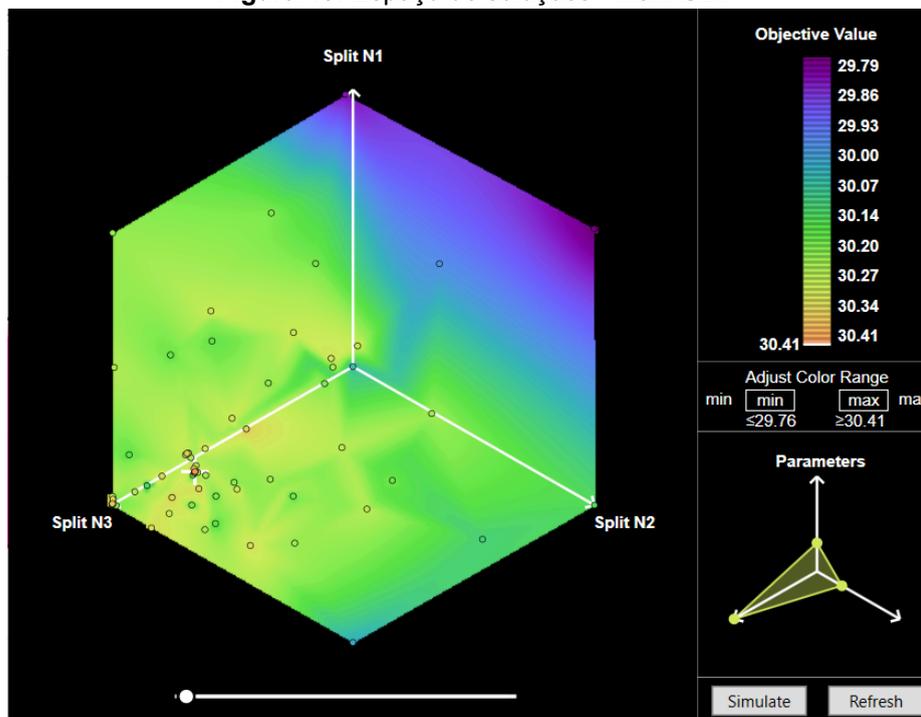
A segunda rodada focou na maximização do UDI, sendo obtido o valor de 30,41% após 69 iterações, que duraram 2h40. Os valores obtidos para EUI e GA foram 905,74 kWh/m² e 91,21%. Aqui notamos que apesar do acréscimo ser muito sutil para o UDI, houve significativo aumento no EUI em relação a primeira rodada, o

que não é vantajoso. A configuração dos parâmetros obtida neste cenário (0,3; 0,3; 1,0) representa 84 módulos sem nenhum painel, 36 painéis do tipo A e 48 do tipo C.

O gráfico da figura 43 apresenta o espaço de soluções desta nova rodada. Podemos destacar que para este indicador a diferença absoluta entre o menor e o melhor resultado obtido é muito pequena, representando apenas 0,62 pp.

Com este resultado tivemos uma redução de apenas 2,4 kWh/m² no EUI (0.26%) em relação ao modelo base, para UDI e GA os impactos também foram pequenos, 0,02 pp para ambos. Em relação ao Salão, apesar do aumento geral da edificação, houve redução de 2,1 p.p no UDI. Os resultados obtidos para o ambiente foram: EUI de 865,54 kWh/m², UDI de 82,9% e GA de 96,1%.

Figura 43: Espaço de soluções - Max. UDI



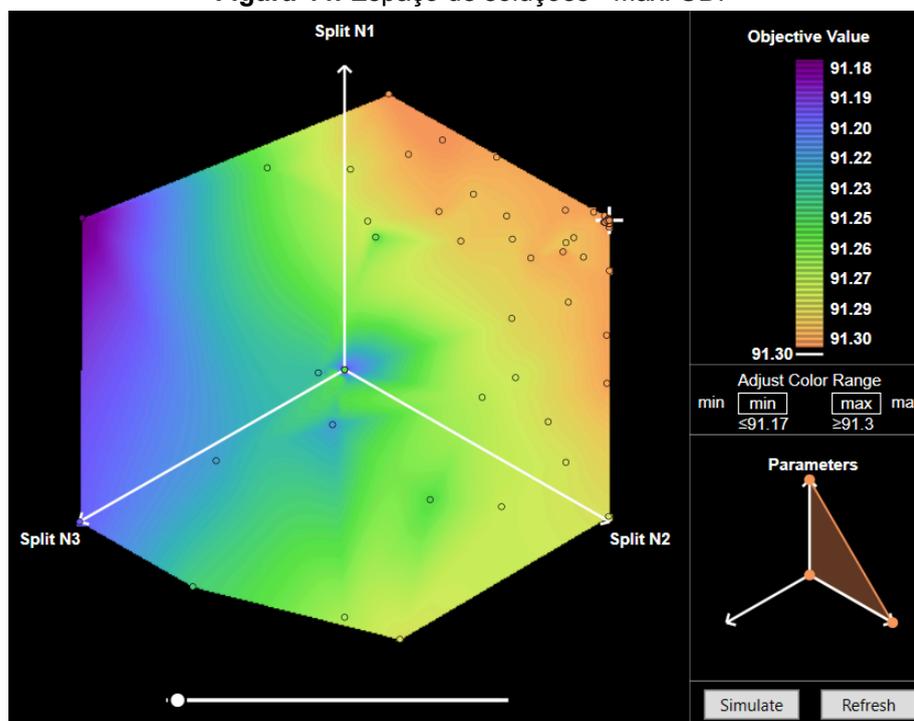
Fonte: O autor (2025)

C. Rodada 03 - Maximizar GA

No último ciclo objetivamos aumentar o GA, o processo durou aproximadamente 3h, executando 65 iterações. O melhor valor encontrado foi de 91,39%, representando um ganho de apenas 0,2 pp. Para o EUI foi encontrado o valor de 896,96 kWh/m², uma redução de apenas 1,23%, enquanto no UDI atingimos 29,78%, uma redução de 0,6 pp. O gráfico da figura 44 demonstra que a variação para a grandeza avaliada nesta etapa é muito pequena (0,12 pp), assim como para

o UDI na rodada anterior. Em relação ao Salão, houve aumento de 4,3 p.p no GA. Os resultados obtidos para o ambiente foram: EUI de 828,28 kWh/m², UDI de 88,3% e GA de 99,9%. Com a configuração de parâmetros obtida (1,0; 1,0; 0) temos todos os fechamentos com painéis do tipo B.

Figura 44: Espaço de soluções - Max. UDI



Fonte: O autor (2025)

A tabela 17, apresenta o resumo dos resultados obtidos nas rodadas de otimização anteriormente descritas, com os melhores resultados sublinhados. Podemos notar que para a métrica EUI há significativa margem de otimização, porém para UDI e GA há pouca variação entre os três resultados encontrados.

Tabela 17: Resumo dos resultados obtidos nas rodadas de otimização.

#	Iterações	EUI	UDI	GA	Qtd
01	53	<u>630,35</u>	29,83	91,29	145B, 23C
02	69	905,74	<u>30,21</u>	91,21	84S, 36B, 48C
03	65	896,96	29,78	<u>91,30</u>	168 B

Fonte: O autor (2025).

3.2.2.2. Otimização multiobjetivo

Em um outro momento, os objetivos das três rodadas anteriores foram avaliados de forma simultânea, em uma otimização multiobjetivo. Além disso,

incluímos um novo objetivo, que é minimizar o peso total do conjunto. Também foram aplicadas restrições relativas às quantidades mínimas de painéis por tipo.

O otimizador Opossum, possui *inputs* apenas para variáveis e objetivos, não há uma conexão direta para as restrições que podem ser inseridas como objetivos. Entretanto, devido ao caráter ponderador da otimização multiobjetivo os resultados podem não atender às restrições. Para contornar esta questão, inserimos no algoritmo desenvolvido uma etapa de avaliação de cada combinação de parâmetros quanto ao cumprimento das restrições, o resultado das avaliações é então inserido numa porta *AND*, onde o resultado verdadeiro acontecerá apenas quando todas forem atendidas. Quando o resultado total for falso, as simulações não são realizadas sendo atribuídos valores padronizados para o resultado delas, podendo assim serem retirados da análise final, o procedimento está descrito no algoritmo 04.

Algoritmo 04: Verification of Quantity Constraints by Type

```

Step 1: Define the maximum allowed quantities for each type
  Types = [Default, A, B, C]
  Qty_Min_Constraint = [20, 10, 10, 10]
  Constraint_Status = [ ] // List to store the status of each constraint
Step 2: Check if the quantities of each type respect the constraints.
For each Solver iteration:
  Qty_InModel = Current quantity of each type in the model
  For i in [Types]: // Iterate over each part type
    If Qty_InModel[i] ≥ Qty_Min_Constraint[i] then
      Add True to the "Constraint_Status" list
    Else
      Add False to the "Constraint_Status" list
    End If
  End For
Step 3: Check if all constraints are respected to decide whether to run the simulator
  If all items in "Constraint_Status" = True then
    Set the simulator "Run" input to True // Start the simulator
  Else
    Set the simulator "Run" input to False // Do not start
    GA = 0
    UDI = 0
    EUI = 5000
    Proceed to the next Solver iteration
  End If
End For

```

A. Cenário 01

Esta rodada, que chamaremos de cenário 01, teve duração de pouco mais de 9h, sendo interrompido após a execução de 100 iterações. Em otimização multiobjetivo não podemos falar de um único melhor resultado, tendo em vista que há verdade um balanço entre os objetivos em cada solução, sendo o produto da otimização um conjunto de resultados ótimos que atendam as restrições impostas (SOARES et al., 2017; FAN; LIU; TANG, 2022; DE LUCA, 2023; MADY et. al., 2024). Desta forma, obtivemos um total de 58 possíveis resultados, entretanto, com pequenas variações entre as métricas avaliadas, conforme apresentado na tabela 18

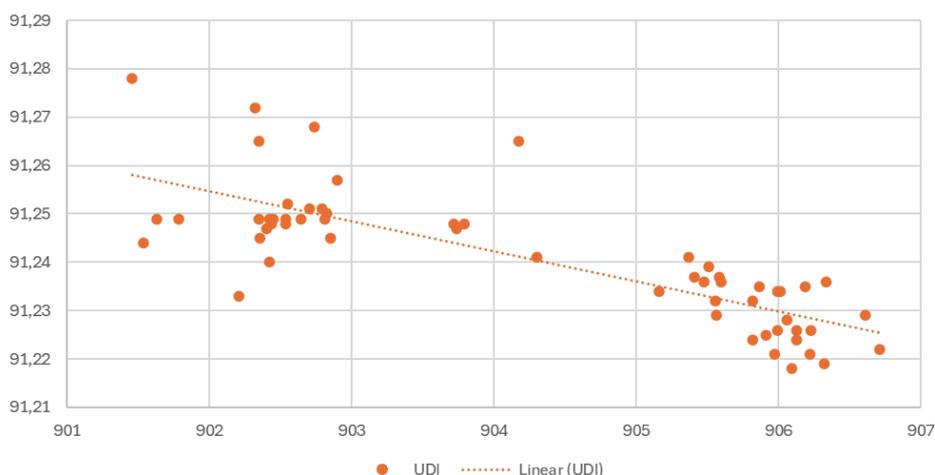
Tabela 18: Mínimos e máximos obtidos na simulação.

Métrica	Min	Máx	Dif.
EUI	901,46	906,71	5,45
UDI	91,22	91,27	0,05 pp
GA	30,06	30,35	0,29 pp
Peso	174,10	215,50	41,4

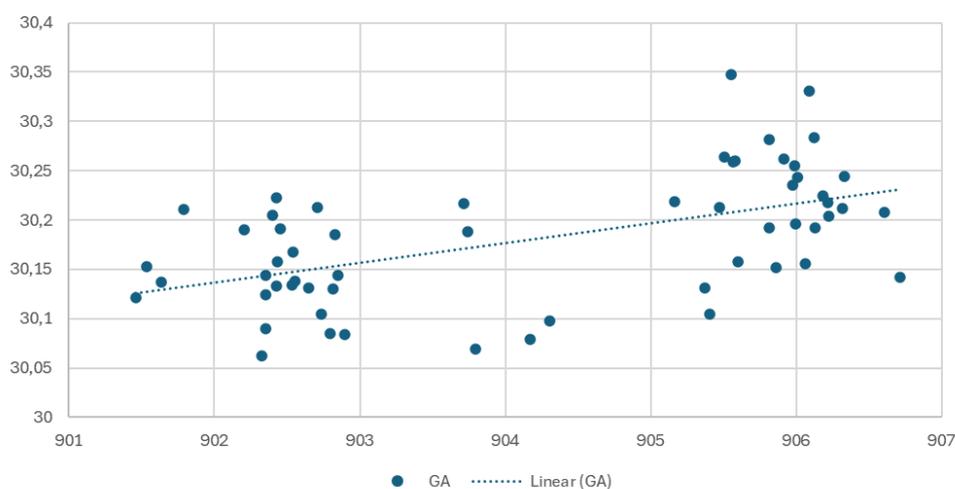
Fonte: O autor (2025)

Os gráficos das figuras 45, 46 e 47 correlacionam as métricas avaliadas, a partir deles podemos inferir que com a redução do peso dos painéis há maior consumo de energia, visto que menor é a área sombreada. De forma similar, quanto menor é o UDI registrado maior é o consumo de energia.

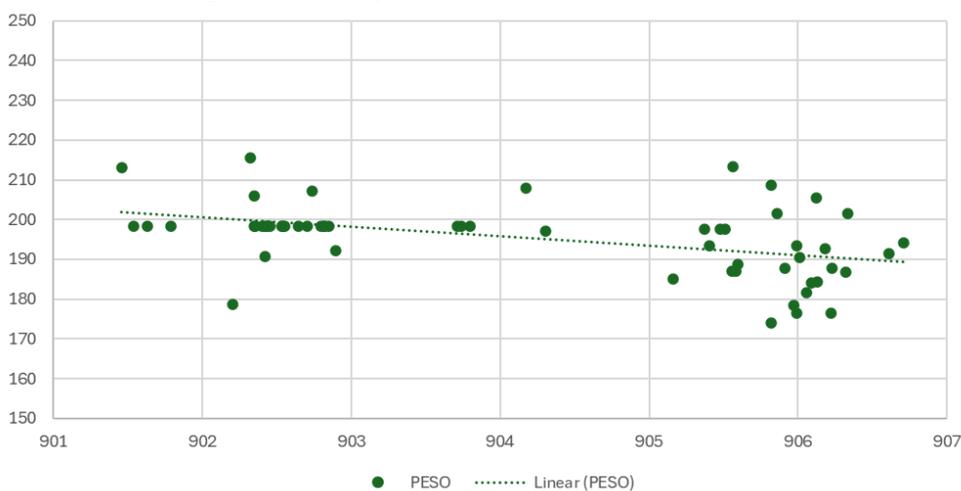
Figura 45: Relação entre EUI e UDI no cenário 01



Fonte: O autor (2025)

Figura 46: Relação entre EUI e GA no cenário 01

Fonte: O autor (2025)

Figura 47: Relação entre EUI e Peso no cenário 01

Fonte: O autor (2025)

B. Cenário 02

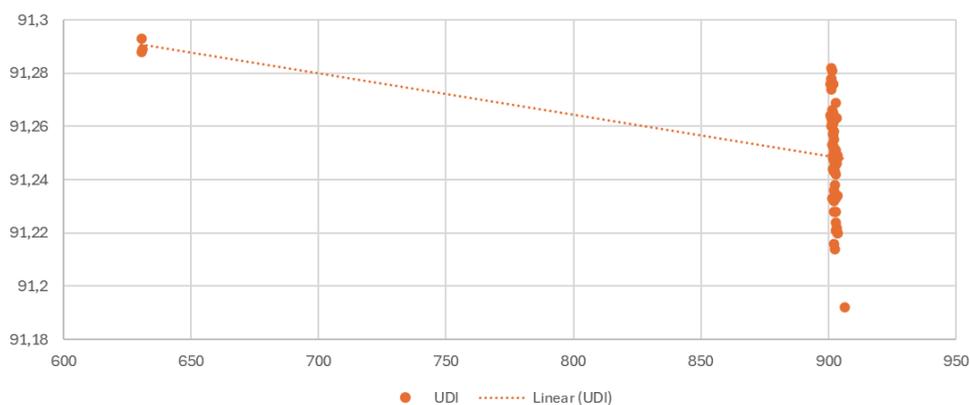
Adicionalmente, uma nova otimização foi realizada, desconsiderando a quantidade mínima para o painel padrão, podendo inclusive ser zerada. Após as 100 iterações obtivemos 68 possíveis resultados, sendo os valores mínimos e máximos encontrados apresentados na tabela 19. Com esta mudança, houve mais elasticidade nas métricas EUI e Peso, entretanto assim como na primeira avaliação, e nas rodadas com objetivos simples, não houve variação significativa para UDI e GA. Os resultados estão sintetizados nos gráficos das figuras 48, 49 e 50, as tendências observadas no cenário 01 se confirmam neste cenário também.

Tabela 19: Mínimos e máximos obtidos na simulação sem restrição para quantidade de painéis padrão.

Métrica	Min	Máx	Dif.
EUI	630,55	906,22	275,67
UDI	91,19	91,29	0,10 pp
GA	29,84	30,33	0,49 pp
Peso	127,81	214,08	86,27

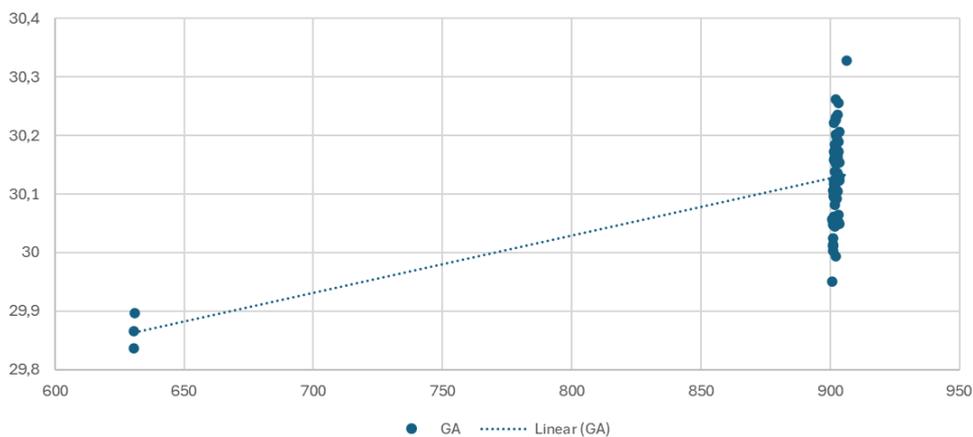
Fonte: O autor (2025)

Figura 48: Relação entre EUI e UDI no cenário 02

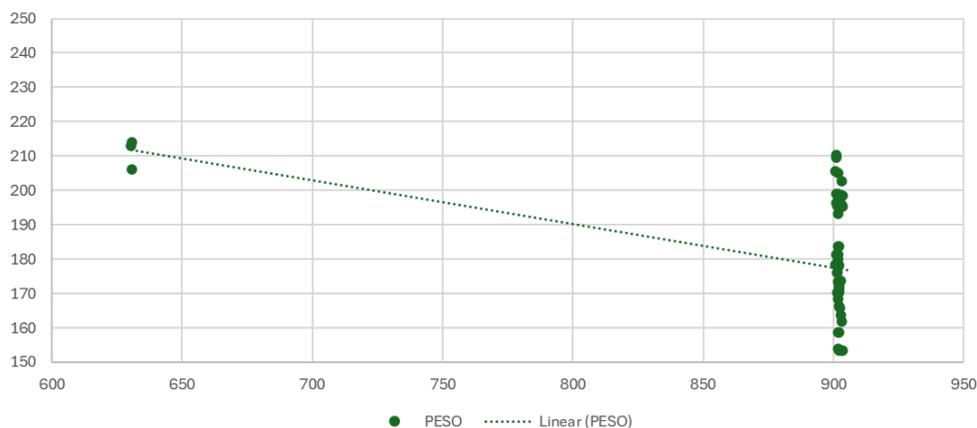


Fonte: O autor (2025)

Figura 49: Relação entre EUI e GA no cenário 02



Fonte: O autor (2025)

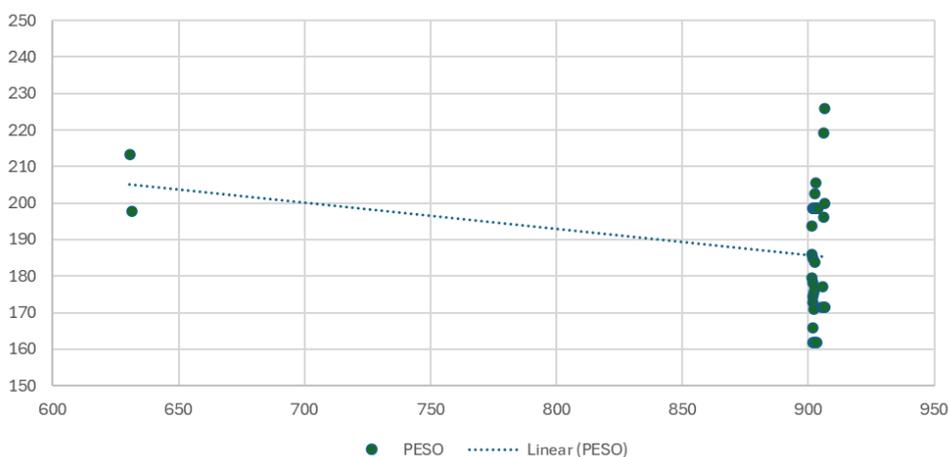
Figura 50: Relação entre EUI e Peso no cenário 02

Fonte: O autor (2025)

Pelos resultados obtidos para as métricas UDI e GA, podemos considerar que tais grandezas não sofrem influência significativa pelos parâmetros manipulados, sendo assim optamos pela exclusão desses objetivos e realização de novo ciclo de simulações, tomando como base os dois cenários de restrições apresentados anteriormente obtivemos:

- **Cenário 1.2:** 32 resultados possíveis, com EUI variando entre 901,57 e 906,08 kWh/m², e o peso variando entre 162,09 e 234,27 kg.
- **Cenário 2.2:** 43 resultados possíveis, com EUI variando entre 630,55 e 906,60 kWh/m², e o peso variando entre 161,83 e 225,85 kg.

O gráfico da figura 51 apresenta a distribuição dos resultados com base na relação entre EUI e Peso, a grande maioria dos resultados está distribuída na faixa dos 900 kWh/m²

Figura 51: Relação entre EUI e Peso no cenário 2.2

Fonte: O autor (2025)

Considerando que, entre as métricas avaliadas, a longo prazo a EUI é a que representa mais impacto, tanto financeiro quanto ambiental, entendemos que os melhores resultados são os que apresentam menor EUI. Assim, os parâmetros que definem os dois melhores resultados apresentados no cenário 2.2 são apresentados na tabela 20, bem como os valores das métricas avaliadas após a re-simulação.

É possível notar que, em um dos resultados (tabela 20), há significativa divergência entre o valor apresentado pelo otimizador e o valor simulado para o mesmo conjunto de parâmetros, logo este resultado não será considerado. Importante destacar também que, apesar das restrições impostas e da estratégia apresentada com o algoritmo 04, um dos resultados não respeita a restrição de quantidade de peças. Estas variações provavelmente são decorrentes das aproximações matemáticas feitas pelo algoritmo RBFMOpt e possivelmente podem ser contornadas com o aumento da quantidade iterações (WORTMANN, 2017).

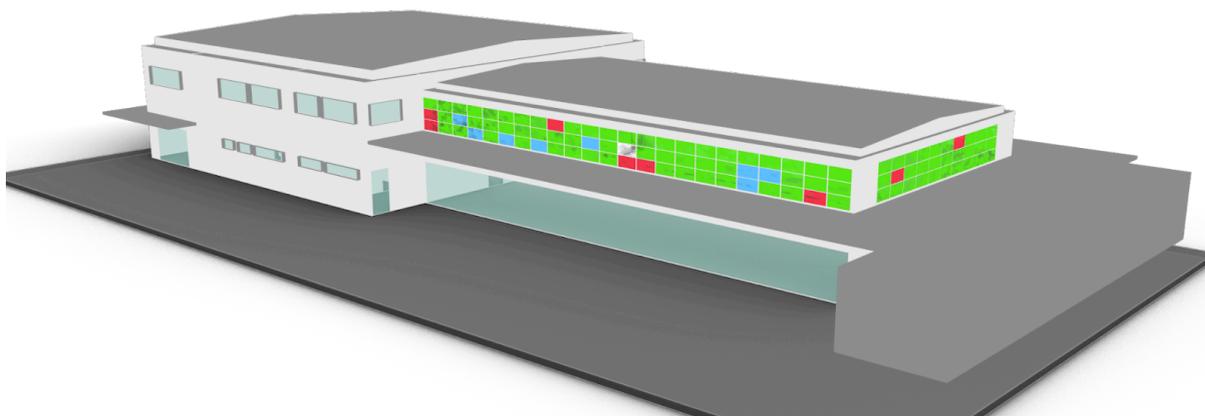
Tabela 20: Características dos melhores resultados.

#	Parâmetros	EUI Opossum	EUI Re-Simulado	Peso	Painéis
01	(0,56; 0,96; 0,19)	631,506	<u>900,574</u>	197,766	No Panel: 4 un Panel A: 72 un Panel B: 70 un Panel C: 22 un
02	(0,94; 0,85; 0,08)	630,546	630,214	213,29	No Panel: 1 un <u>Panel A: 6 un</u> Panel B: 146 un Panel C: 15 un

Fonte: O autor (2025)

C. Validação

Ao realizar um pequeno ajuste no resultado 02 da tabela 20, aplicando os parâmetros (0,92; 0,85; 0,08) obtivemos um modelo com: 01 módulo sem nenhum painel, 10 painéis do tipo A, 144 do tipo B e 13 do tipo C, atendendo as restrições impostas. Os valores obtidos para as métricas avaliadas foram: EUI=630,131 kWh/m²; UDI Geral=29,96%; UDI Salão=88%; GA Geral=91,29%; GA Salão=99,6%. Peso na fachada=218,25kg. Os resultados validam os valores obtidos nas etapas de simulação. A figura 52 ilustra a distribuição dos painéis sendo representados pelas cores Branco (Sem painel), Vermelho (A), Verde (B) e Azul (C).

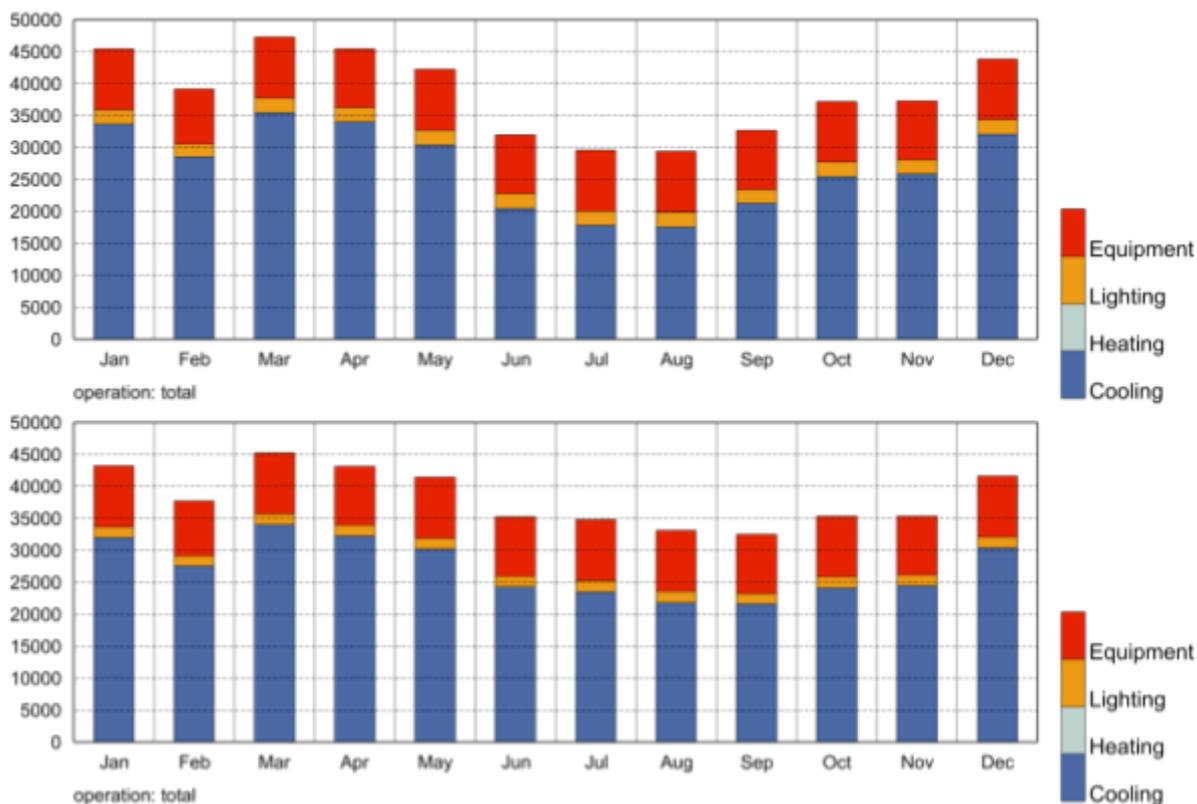
Figura 52: Perspectiva final do modelo

Fonte: O autor (2025)

A figura 53 apresenta a distribuição mensal do consumo da edificação por tipo de uso na configuração otimizada na primeira fase, que levou em conta apenas materiais, e a configuração otimizada na segunda fase. Nota-se que houve redução em praticamente todos os meses, com exceção dos meses de Junho a Agosto.

É importante destacar que, apesar da consideração de horário de funcionamento descrita anteriormente no item 3.2.1.1 houve redução no consumo de iluminação em todos os meses, validando o aproveitamento de luz do dia. O maior consumo está, como esperado, vinculado ao sistema de resfriamento, seguido de equipamentos elétricos e iluminação. Com a variação escolhida a redução no EUI é de 278 kWh/m², representando redução de cerca de 30% do simulado no cenário inicial apresentado no tópico 3.2.1.3.

Figura 53 - Consumo total em kWh por mês otimizando apenas materiais (acima) e com a aplicação dos painéis (abaixo).



Fonte: O autor (2025).

A tabela 21 apresenta um comparativo entre os valores calculados de consumo e demanda no cenário otimizado deste trabalho e no cenário inicial simulado na primeira etapa do estudo. São aplicadas as tarifas de energia praticadas pela concessionária local (Neoenergia, 2024)

Para simplificação escolhemos para demanda o valor máximo registrado, que é pago mensalmente, a escolha de outros valores pode impactar no resultado final em virtude de sub ou sobre contratações.

Tabela 21: Comparativo dos valores de demanda e consumo anuais

Descrição	Qtd Inicial	Qtd Otimizada	Tarifa (R\$)	Total Inicial (R\$)	Total Otimiz.(R\$)
Consumo Ponta	173.839	75.571	1,92614	334.838,25	145.560,33
Consumo Fora Ponta	515.067	383.214	0,40463	208.411,56	155.059,88
Demanda (Max)	514	482	22,68	139.890,24	131.181,12
				683.140,05	431.801,33

Fonte: O autor (2025)

Os valores calculados demonstram uma redução de 36,8% no custo anual com energia elétrica para a edificação, representando um total de R\$ 251.338,72 ao ano.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1. CONTRIBUIÇÕES

Este estudo evidencia a importância da análise e otimização do consumo energético de uma edificação, destacando o papel fundamental da escolha de materiais e como o design computacional pode contribuir nesse processo. Através da integração entre BIM, Design Computacional, e utilizando fluxos de trabalho como “Projeto-Análise-Avaliação-Adaptação” e “Otimização” descritos por De Luca (2023), foi possível identificar combinações de materiais que não apenas reduzem o consumo energético, mas também impactam no conforto dos usuários.

Adicionalmente também foi avaliada aplicação de painéis perfurados em sistemas de sombreamento passivo. Ambas as abordagens combinaram simulação energética e otimização, sendo na segunda parte avaliado também os métodos simples e multiobjetivo, para simulação foram utilizadas as ferramentas computacionais validadas Radiance e EnergyPlus através do plugin LadybugTools.

Além disso, a pesquisa ressalta a importância de uma abordagem integrada que considere todos os ambientes da edificação. As limitações identificadas, como a ampliação de parâmetros e a consideração de custos, abrem espaço para futuras investigações.

Já na primeira fase, a diferença entre os melhores e os piores resultados encontrados nos cenários simulados, com uma redução de 45% na simulação simplificada e 34% na mais completa, evidencia a importância deste tipo de análise, que pode trazer um significativo impacto na economia de energia das edificações.

Na segunda etapa, os resultados demonstraram que a escolha adequada dos painéis perfurados pode reduzir significativamente o consumo energético, com uma diminuição de até 278 kWh/m² anuais no EUI do projeto analisado. Embora as métricas relacionadas ao aproveitamento de luz natural (UDI) e ao ofuscamento (GA) tenham apresentado melhorias menos expressivas, os resultados reforçam a viabilidade do uso de painéis perfurados para equilíbrio entre eficiência energética e conforto visual, sobretudo ao verificar o impacto no custo anual da edificação.

Os resultados encontrados demonstram que a utilização desta metodologia traz uma grande contribuição gerencial ao ampliar as opções para tomada de decisão baseada em dados mais precisos, possibilitando desta forma a construção de edificações mais eficientes. Entretanto, o processo de otimização por Algoritmo Genético, apesar da vantagem em ampliar o leque de soluções avaliadas, demanda grande recurso computacional, tornando o processo normalmente longo, o que em alguns casos pode ser uma limitação, como já destacado por outros trabalhos, como em Rutten (2011). Por sua vez, o algoritmo RBFMOpt apesar da agilidade de execução, pode apresentar resultados não confiáveis em função do total de iterações, estudos avaliando a quantidade ideal destas podem trazer contribuições.

Este trabalho não apenas contribui para o entendimento das práticas de construção sustentável, mas também serve como um guia para profissionais e pesquisadores que buscam implementar soluções inovadoras e eficientes em projetos arquitetônicos. A adoção de ferramentas computacionais e a otimização de materiais são passos fundamentais para a construção de um futuro mais sustentável, alinhado com as demandas contemporâneas por eficiência energética e responsabilidade ambiental. Entre as principais contribuições deste trabalho, destacam-se:

- A implementação de uma abordagem integrada, considerando múltiplos ambientes simultaneamente, ampliando a precisão dos resultados em relação a estudos que avaliam apenas espaços isolados.
- A comparação de métodos de otimização simples e multiobjetivo, evidenciando as vantagens da abordagem multiobjetivo na busca por soluções equilibradas que atendam a diferentes critérios de desempenho.
- A validação da metodologia proposta por meio de um estudo de caso aplicado a um restaurante universitário, que pode ser replicada ou adaptada para outros tipos de edificações.

Por fim, o trabalho reforça a importância da integração de ferramentas de design computacional, BIM e algoritmos de otimização nos processos de projeto, destacando seu potencial para transformar o setor da construção civil e contribuir para a criação de edificações mais eficientes e sustentáveis.

4.2. LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os elementos construtivos considerados na análise se limitaram a paredes, teto, cobertura, vidros e painéis para sombreamento, a consideração adicional de outros elementos como portas, pisos, forros e outros pode acrescentar mais precisão aos resultados. Além disso, a inclusão de informações relativas aos custos de aplicação dos materiais analisados pode alterar as soluções tidas como ótimas, devido a relações de custo-benefício.

Quanto aos programas aplicados nos ambientes, foram utilizados de acordo com padrões existentes, a configuração de ocupação e equipamentos com dados reais, se disponíveis, também pode implicar em resultados mais precisos.

O estudo de caso realizado considera uma edificação a ser implantada em uma cidade do nordeste Brasileiro, sujeita a grandes níveis de insolação, a aplicação da metodologia em cidades com climas mais amenos pode resultar em reduções menos significativas. O local de implantação também não possui edificações de grande porte, por isso o contexto urbano não foi levado em consideração

Os dados climáticos utilizados neste estudo são baseados em registros históricos. Considerando as mudanças climáticas já observadas e as previsões de alterações ainda mais significativas no futuro próximo, não há garantia de que as edificações manterão sua eficiência ao longo do tempo. Modelos que utilizem Inteligência Artificial para extrapolar dados climáticos e prever cenários futuros podem oferecer vantagens substanciais no planejamento de edificações seguras e eficientes para as próximas décadas.

Como já abordado anteriormente, é muito importante que a análise de questões ambientais e energéticas seja feita nas fases iniciais do projeto, neste trabalho optamos por preservar os aspectos formais já definidos no projeto. Porém, a realização deste tipo de análise ainda na fase de concepção e a consideração de parâmetros que afetem a forma da edificação podem potencializar os resultados.

O algoritmo de otimização utilizado na segunda fase, RBFMOpt, se mostrou bastante ágil em comparação com o algoritmo genético utilizado na primeira etapa

do trabalho, entretanto observamos divergência significativa entre o resultado estimado pelo otimizador e o simulado através do HB, estudos avaliando a relação entre a quantidade de iterações e a precisão dos resultados podem ser interessantes.

Como perspectivas futuras, sugere-se:

- A aplicação da metodologia em outros contextos climáticos e tipologias de edificações, incluindo cenários com maior complexidade urbana.
- A incorporação de análises de custo-benefício para determinar a viabilidade econômica das soluções propostas.
- O desenvolvimento de modelos integrados que considerem variações climáticas ao longo do tempo, utilizando Inteligência Artificial para prever impactos de mudanças climáticas na eficiência energética das edificações.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Aneel Nº 1.000, de 7 de Dezembro de 2021**. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. Brasília-DF. 2021.

AL-MASRANI, S. M. et al. Design optimization of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends. **Solar Energy**, v. 170, p. 849–872, ago. 2018.

ALMAZ, A. F. et al. The Future Role of Artificial Intelligence (AI) Design's Integration into Architectural and Interior Design Education is to Improve Efficiency, Sustainability, and Creativity. **Civil engineering and architecture**, v. 12, n. 3, p. 1749–1772, 1 maio 2024.

ALWAN, Z. et al. Framework for parametric assessment of operational and embodied energy impacts utilising BIM. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 102768, out. 2021.

Andifes | Acompanhe a execução orçamentária das universidades federais. Disponível em: <<https://www.andifes.org.br/2020/08/30/execucao-orcamentaria/>>. Acesso em: 23 set. 2024.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, nov. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-4: Iluminação Natural Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação natural interna**. Rio de Janeiro. 2023.

ATAMAN, C.; DINO, İ. G. Performative design processes in architectural practices in Turkey: architects' perception. **Architectural Engineering and Design Management**, p. 1–15, 27 out. 2021.

CAETANO, I.; SANTOS, L.; LEITÃO, A. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. **Frontiers of Architectural Research**, v. 9, n. 2, p. 287–300, jun. 2020.

CALDAS, L. Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE_ARCH: An evolution-based generative design system. **Advanced Engineering Informatics**, v. 22, n. 1, p. 59–70, jan. 2008

CHEN, L.; ZHANG, Y.; ZHENG, Y. A performance-based generative design framework based on a design grammar for high-rise office towers during early design stage. **Frontiers of Architectural Research**, 1 ago. 2024.

CHEN, K. W.; JANSSEN, P.; SCHLUETER, A. Multi-objective optimisation of building form, envelope and cooling system for improved building energy performance. **Automation in Construction**, v. 94, p. 449–457, out. 2018.

CHEN, S. et al. A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings. **Energy and Buildings**, v. 216, p. 109944, jun. 2020.

CELANI, G.; VAZ, C. E. V. CAD Scripting and Visual Programming Languages for Implementing Computational Design Concepts: A Comparison from a Pedagogical Point of View. **International Journal of Architectural Computing**, v. 10, n. 1, p. 121–137, mar. 2012.

DEAD FISH. *Quente*. In: *Contra Todos*. Rio de Janeiro: DeckDisc, 2009. 1 CD, faixa 4.

DE LUCA, F. Advances in Climatic Form Finding in Architecture and Urban Design. **Energies**, v. 16, n. 9, p. 3935, 1 jan. 2023.

EIA - U.S. Energy Information Administration - Independent Statistics and Analysis. Disponível em: <<https://www.eia.gov/totalenergy/data/browser/index.php?tbl=T02.01A#>>. Acesso em: 24 out. 2024.

ENGLART, S. Analysis of rainwater use in membrane-based semi-direct evaporative cooling of air. **Journal of Building Engineering**, v. 90, p. 109409–109409, 22 abr. 2024.

FAN, Z.; LIU, M.; TANG, S. A multi-objective optimization design method for gymnasium facade shading ratio integrating energy load and daylight comfort. **Building and Environment**, v. 207, p. 108527, jan. 2022.

FANG, Y.; CHO, S. Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance. **Solar Energy**, v. 191, p. 7–18, out. 2019.

FISCHER, T. and HERR, C. M. Teaching generative design, In: Proceedings of the 4th International Generative Art Conference. Milão: Ed. SODDU, 2001.

GABER, B. et al. Employing ANN for daylight and energy prediction of hot climate office buildings: a case study of new Cairo, Egypt. **Architectural Engineering and Design Management**, p. 1–25, 6 set. 2023.

GAN, V. J. L. et al. Simulation optimisation towards energy efficient green buildings: Current status and future trends. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, n. 1, p. 120012, maio 2020.

GHORBANI NAEINI, H et al. Impact of building envelope parameters on occupants' thermal comfort and energy use in courtyard houses. **Architectural Engineering and Design Management**, p. 1–27, 2 set. 2023.

GÜRCAN, CEMILE GÜL. et al.. A Computational Design Strategy for Integrated Façades. **MEGARON / Yıldız Technical University, Faculty of Architecture, E-Journal**, 2023.

HB-Energy Primer. Disponível em: <<https://docs.ladybug.tools/hb-energy-primer/>>. Acesso em: 8 abr. 2024.

HB-Radiance Primer | HB-Radiance Primer. Disponível em: <<https://docs.ladybug.tools/hb-radiance-primer>>. Acesso em: 28 set. 2024.

HOSSEINI, SEYED MORTEZA et al. Enhancing Visual Comfort and Energy Efficiency in Office Lighting Using Parametric-Generative Design Approach for

Interactive Kinetic Louvers. **Journal of Daylighting**, v. 11, n. 1, p. 69–96, 19 maio 2024.

IBRAHIM, A. et al. Enhancing energy efficiency in shipping container house: a novel approach using hybrid louver systems. **Energy and Built Environment**, 1 nov. 2024.

INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, **CIE S 017**: International Lighting Vocabulary, 2nd Edition. Vienna, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8995-1**: Lighting of work places — Part 1: Indoor, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 80000-4: Quantities and units — Part 4**: Mechanics, 2nd Edition, 2019 a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 80000-5: Quantities and units — Part 5**: Thermodynamics, 2nd Edition, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10456: Building Materials And Products — Hygrothermal Properties**, 2007.

Ji, Y. et al. Intelligent Parametric Optimization of Building Atrium Design: A Case Study for a Sustainable and Comfortable Environment. **Sustainability**, v. 15, n. 5, p. 4362, 28 fev. 2023.

KIRIMTAT, A. et al. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 23–49, jan. 2016.

KISS, B.; SZALAY, Z. Modular approach to multi-objective environmental optimization of buildings. **Automation in Construction**, v. 111, p. 103044, mar. 2020.

Ladybug Primer. Disponível em: <<https://docs.ladybug.tools/ladybug-primer/>>. Acesso em: 20 ago. 2024.

LBNL (2014). WINDOW 7.3. Berkeley, CA, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory.

LEONE, M. F.; NOCERINO, G. Advanced modelling and digital manufacturing: Parametric design tools for the optimization of UHPFRC (ultra high-performance Fiber reinforced concrete) shading panels. **Automation in Construction**, v. 126, p. 103650, jun. 2021.

MADY, A. et al. A Generative Design Approach to Improving the Environmental Performance of Educational Buildings in Hot Arid Climates. (Assiut National University as a Case Study). **Future Cities and Environment**, v. 10, p. 2–2, 22 fev. 2024.

MANNI, M. et al. Parametric Design to Maximize Solar Irradiation and Minimize the Embodied GHG Emissions for a ZEB in Nordic and Mediterranean Climate Zones. **Energies**, v. 13, n. 18, p. 4981, 22 set. 2020.

MCNEEL R. **Features**. Disponível em: <<https://www.rhino3d.com/features>>. Acesso em: 23 fev. 2024.

NEOENERGIA. Composição Tarifária - Distribuidora Pernambuco - Neoenergia. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/web/pernambuco/sua-casa/composicao-tarifaria>>. Acesso em: 9 nov. 2024.

NOORZAI, E.; BAKMOHAMMADI, P.; GARMAROUDI, M. A. Optimizing daylight, energy and occupant comfort performance of classrooms with photovoltaic integrated vertical shading devices. **Architectural Engineering and Design Management**, p. 1–25, 29 maio 2022.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 10, n. 1, 29 mar. 2021.

QUEIROZ, Natália. **O projeto da envoltória guiado por desempenho: Método paramétrico interoperável com enfoque no desempenho térmico, visual e luminoso**. 2023. 287p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

R. M. SAKIYAMA, N. et al. Building Optimization through a Parametric Design Platform: Using Sensitivity Analysis to Improve a Radial-Based Algorithm Performance. **Sustainability**, v. 13, n. 10, p. 5739, 20 maio 2021.

RAFATI, N.; MORTEZA HAZBEI; EICKER, U. Louver configuration comparison in three Canadian cities utilizing NSGA-II. **Building and Environment**, v. 229, p. 109939–109939, 21 dez. 2022.

RATAJCZAK, J.; SIEGELE, D.; NIEDERWIESER, E. Maximizing Energy Efficiency and Daylight Performance in Office Buildings in BIM through RBFOpt Model-Based Optimization: The GENIUS Project. **Buildings**, v. 13, n. 7, p. 1790, 1 jul. 2023.

Rhino.Inside@Revit. Disponível em: <<https://www.rhino3d.com/inside/revit/1.0/getting-started>>. Acesso em: 23 fev. 2024.

RICCI, A. et al. Development of a self-sufficient dynamic façade within the context of climate change. **Architectural Science Review**, p. 1–11, 6 fev. 2020.

ROUDSARI, M. S.; PAK, M.; VIOLA, A. Ladybug: A Parametric Environmental Plugin For Grasshopper To Help Designers Create An Environmentally-conscious Design. **Building Simulation Conference proceedings**, 28 ago. 2013.

ROSSI-SCHWARZENBECK, M.; FIGLIOLA, A. Adaptive Building And Skin: An Innovative Computational Workflow To Design Energy Efficient Buildings In Different Climate Zones. **Journal of Green Building**, v. 14, n. 4, p. 1–15, set. 2019.

RORIZ, M. **Uma proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro**. ANTAC: São Carlos, 2012a. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Proposta_Revisao_Zoneamento_Bioclimatico.pdf

RORIZ, M. **Segunda Proposta de Revisão do Zoneamento Bioclimatológico do Brasil**. ANTAC: São Carlos, 2012b. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Zoneamento.pdf>

RORIZ, M. **Classificação de Climas do Brasil** – Versão 2. ANTAC: São Carlos, 2013. Disponível em: https://labeeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v2.pdf

RORIZ, M. **Classificação de Climas do Brasil** – Versão 3.0. ANTAC: São Carlos, 2014. Disponível em: https://labeeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf

RUTTEN, D. **Evolutionary Principles applied to Problem Solving**. I Eat Bugs For Breakfast, 4 mar. 2011. Disponível em: <https://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2011/03/04/epatps01/>>. Acesso em: 15 maio. 2024.

SEVERINO, ANTÔNIO JOAQUIM. Metodologia do trabalho científico. [s.l.] Cortez Editora, 2014.

SHEN, X.; YE, X. Environmental performance driven optimization of urban modular housing layout in Singapore. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, p. 1–14, 21 fev. 2024.

SILVA, M. A. DA; GARCIA, R. DE P.; CARLO, J. C. Performance assessment of RBFMOpt, NSGA2, and MHACO on the thermal and energy optimization of an office building. **Journal of Building Performance Simulation**, p. 1–15, 14 nov. 2022.

SOARES, N. et al. A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 845–860, set. 2017.

TEDESCHI, A. **AAD, Algorithms-Aided Design**: Parametric Strategies Using Grasshopper. Brienza, Italy: Le Penseur Publisher, 2014.

TOUTOU, A.; FIKRY, M.; MOHAMED, W. The parametric based optimization framework daylighting and energy performance in residential buildings in hot arid zone. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 4, p. 3595–3608, dez. 2018.

VALITABAR, M. et al. A dynamic vertical shading optimisation to improve view, visual comfort and operational energy. **Open House International**, v. 46, n. 3, p. 401–415, 9 jul. 2021.

VAZQUEZ, E.; DUARTE, J.; POERSCHKE, U. Masonry screen walls: a digital framework for design generation and environmental performance optimization. **Architectural Science Review**, p. 1–13, 10 abr. 2020.

WANG, S. et al. A Parameterized Design Method for Building a Shading System Based on Climate Adaptability. **Atmosphere**, v. 13, n. 8, p. 1244–1244, 5 ago. 2022.

WOODBURY, Robert. Elements of parametric design. Oxford: Routledge, 2010.

WORTMANN, Thomas. 2017. “OPOSSUM: Introducing and Evaluating a Model-Based Optimization Tool for Grasshopper. in **Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2017**, 283-293. © 2017, The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Hong Kong.

XUE, Y.; LIU, W. A Study on Parametric Design Method for Optimization of Daylight in Commercial Building's Atrium in Cold Regions. **Sustainability**, v. 14, n. 13, p. 7667, 23 jun. 2022.

YI, Y. K. et al. Multi-objective optimization (MOO) of a skylight roof system for structure integrity, daylight, and material cost. **Journal of Building Engineering**, v. 34, p. 102056, fev. 2021.

YU, C.-R. et al. Solving the comfort-retrofit conundrum through post-occupancy evaluation and multi-objective optimization. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 44, n. 4, p. 381–403, 5 mai. 2023.

ZHANG, J.; JI, L. Optimization of Daylighting, Ventilation, and Cooling Load Performance of Apartment in Tropical Ocean Area Based on Parametric Design. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, p. 1–11, 28 ago. 2021.

ZHANG, J.; LIU, N.; WANG, S. A parametric approach for performance optimization of residential building design in Beijing. **Building Simulation**, 23 set. 2019.

ZHAO, L.; ZHANG, W.; WANG, W. BIM-Based Multi-Objective Optimization of Low-Carbon and Energy-Saving Buildings. **Sustainability**, v. 14, n. 20, p. 13064, 1 jan. 2022.