

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

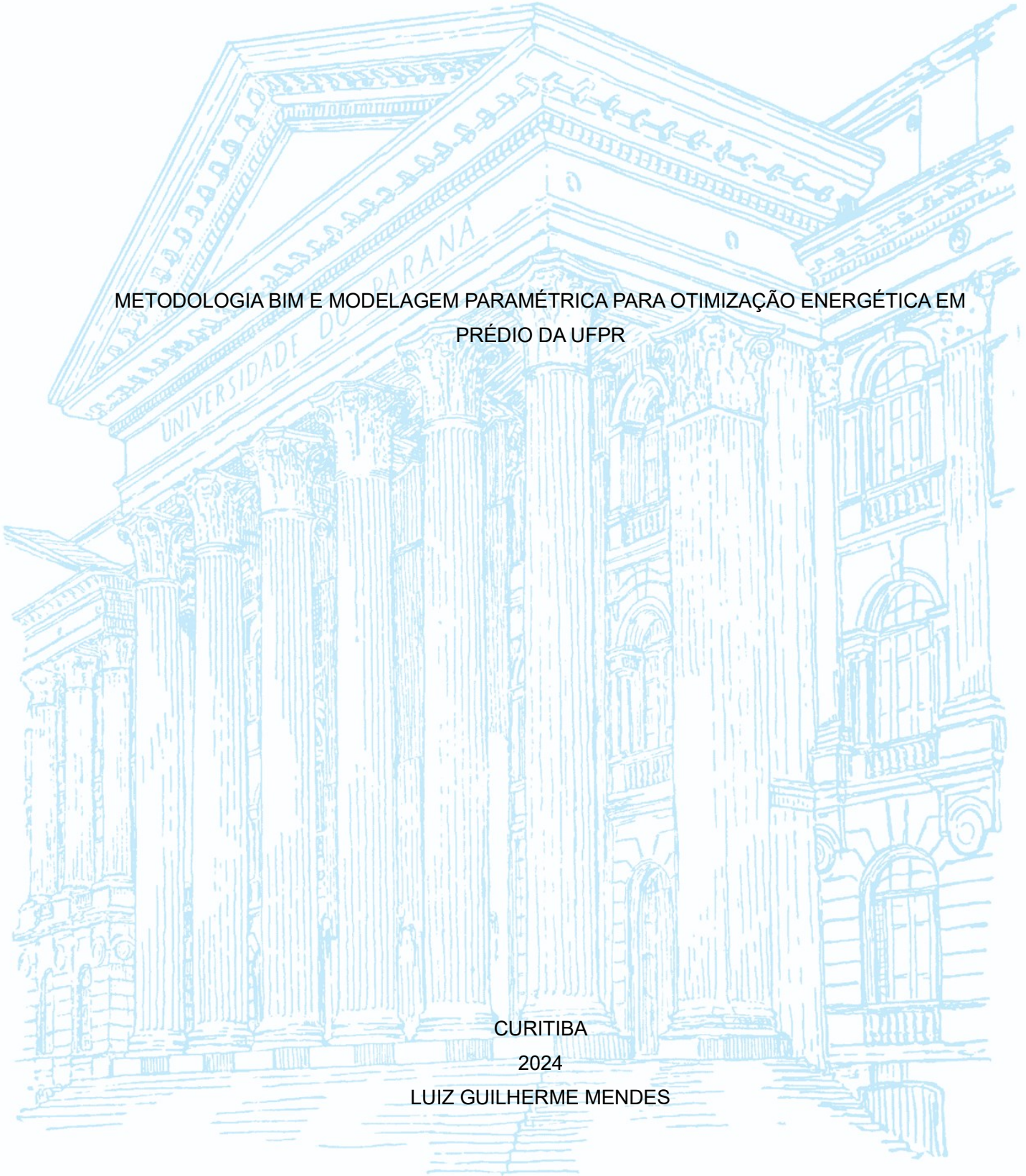
LUIZ GUILHERME MENDES

METODOLOGIA BIM E MODELAGEM PARAMÉTRICA PARA OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA EM
PRÉDIO DA UFPR

CURITIBA

2024

LUIZ GUILHERME MENDES



LUIZ GUILHERME MENDES

METODOLOGIA BIM E MODELAGEM PARAMÉTRICA PARA OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA EM
PRÉDIO DA UFPR

Trabalho apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica no curso de Engenharia Elétrica do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. ^o. James Alexandre Baraniuk, Dr.

CURITIBA

2024

TERMO DE APROVAÇÃO

LUIZ GUILHERME MENDES

**METODOLOGIA BIM E MODELAGEM PARAMÉTRICA PARA OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA EM
PRÉDIO DA UFPR**

Trabalho apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica no curso de Engenharia Elétrica do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Profº James Alexandre Baraniuk, Dr
Orientador

Professora
Dra. Juliana Luísa Müller lamamura

Professor
Dr. Jayme Passos Rachadel

Curitiba, 01 de dezembro de 2023

Dedico este trabalho àqueles que sonham com um mundo mais sustentável, onde a eficiência energética se torna a base para um futuro melhor. Que este estudo inspire soluções práticas e conscientes, e que cada escolha energética nos aproxime de uma convivência mais harmônica entre tecnologia e meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho representa o encerramento de uma jornada repleta de desafios, aprendizados e, sobretudo, crescimento pessoal e acadêmico. Este caminho não foi trilhado sozinho, e dedico estas palavras àqueles que caminharam ao meu lado.

Aos meus pais, tios, irmãos e a minha companheira, Michelli. Vocês acreditaram em mim quando duvidei do meu próprio potencial e também me ensinaram que persistir é tão importante quanto sonhar. O apoio de vocês foi o alicerce que sustentou cada etapa desta trajetória.

Ao meu orientador, Professor James Alexandre Baraniuk, agradeço pela sabedoria compartilhada, pelas reflexões instigantes e pela paciência em momentos de dúvidas. Suas orientações guiaram este trabalho e moldaram minha maneira de encarar problemas e buscar soluções.

Aos amigos que tornaram o percurso mais leve, minha gratidão eterna. Com vocês, as discussões nos corredores do bloco PK, PL e as noites intensas de estudos se transformaram em histórias que levarei para toda a vida. Obrigado pela parceria, pelas risadas e pela cumplicidade.

À Universidade Federal do Paraná, sou grato pela oportunidade de vivenciar um ensino público e de qualidade. Este trabalho é, também, um tributo ao impacto transformador que a educação pode ter na vida de alguém.

Por fim, dedico este TCC a todos que acreditam no poder do esforço coletivo e da curiosidade como motores para construir um mundo mais inovador e eficiente. Que este trabalho seja apenas o início de muitas contribuições para um futuro mais sustentável e consciente.

RESUMO

Diante da crescente necessidade de reduzir o consumo energético e melhorar o conforto térmico em edificações, este trabalho apresenta a aplicação integrada das metodologias Building Information Modeling (BIM) e modelagem paramétrica para a otimização energética do prédio PK da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Por meio da programação paramétrica em ferramentas avançadas como Rhino 3D, Grasshopper e a suíte Ladybug Tools, foram desenvolvidos modelos dinâmicos que permitiram simulações detalhadas, explorando cenários de eficiência energética e conforto térmico. O uso de Python foi essencial para a personalização e automação dos processos, possibilitando maior controle sobre as variáveis analisadas. A modelagem paramétrica permitiu criar diferentes cenários considerando desde as condições originais do edifício até a implementação de estratégias como brises solares, janelas de controle solar e telhas sanduíche com isolamento térmico. Foram avaliados impactos da radiação solar direta e difusa no desempenho energético, utilizando softwares como EnergyPlus e OpenStudio para calcular cargas térmicas e balanços energéticos. Os dados gerados foram processados e visualizados de forma integrada, permitindo uma compreensão clara das interações entre materiais, estratégias de design e consumo energético. Como principais resultados, verificou-se que a substituição das janelas por vidros de controle solar e a adoção de telhas sanduíche resultaram em uma redução significativa na carga térmica e no consumo de energia, sem comprometer a iluminação natural interna. Este trabalho demonstra como o uso de ferramentas computacionais e simulações podem orientar intervenções projetuais para a otimização energética de edificações existentes, promovendo eficiência energética e sustentabilidade. A abordagem proposta serve como referência para futuras aplicações em projetos acadêmicos e edifícios de alta complexidade.

Palavras-chave: Simulação Energética, modelagem paramétrica, edificações sustentáveis.

ABSTRACT

Given the growing need to reduce energy consumption and improve thermal comfort in buildings, this work presents the integrated application of Building Information Modeling (BIM) methodologies and parametric modeling for energy optimization of the PK building at the Federal University of Paraná (UFPR). Through parametric programming in advanced tools such as Rhino 3D, Grasshopper, and the Ladybug Tools suite, dynamic models were developed to enable detailed simulations, exploring scenarios of energy efficiency and thermal comfort. The use of Python was essential for process customization and automation, allowing greater control over the analyzed variables. Parametric modeling enabled the creation of different scenarios, ranging from the building's original conditions to the implementation of strategies such as solar shading devices, solar control windows, and sandwich panels with thermal insulation. The impacts of direct and diffuse solar radiation on energy performance were evaluated using software like EnergyPlus and OpenStudio to calculate thermal loads and energy balances. The generated data were processed and visualized in an integrated manner, allowing for a clear understanding of the interactions between materials, design strategies, and energy consumption. As key results, it was found that replacing windows with solar control glass and adopting sandwich panels led to a significant reduction in thermal loads and energy consumption without compromising the internal natural lighting. This work demonstrates how the use of computational tools and simulations can guide design interventions for energy optimization of existing buildings, promoting energy efficiency and sustainability. The proposed approach serves as a reference for future applications in academic projects and high-complexity buildings.

Keywords: Energy simulation, parametric modeling, sustainable buildings.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Etapas de criação do modelo de energia	23
FIGURA 2 – modelo final de energia – prédio PK	24
FIGURA 3 – Código Python para heatmap.....	28
FIGURA 4 – Heatmap do modelo existente.....	28
FIGURA 5 – Calor interno no modelo existente.....	30
FIGURA 6 – Radiação solar incidente do modelo existente	32
FIGURA 7 – Radiação Solar incidente em 1 m ²	33
FIGURA 8 – Radiação solar visível do modelo existente.....	35
FIGURA 9 – Distribuição média luminosa (lux) do modelo existente.....	36
FIGURA 10 – Fração de dimerização mensal do modelo existente	37
FIGURA 11 – Distribuição média luminosa (lux) do modelo original	38
FIGURA 12 – Imagem HDR entre 6h e 7h da manhã do modelo existente	39
FIGURA 13 – Imagem HDR entre 15h e 16h do modelo existente.....	40
FIGURA 14 – Imagem HDR as 19h do modelo existente	40
FIGURA 15 – Carga térmica do modelo existente.....	41
FIGURA 16 – Consumo de energia do modelo existente	43
FIGURA 17 – Heatmap do modelo com brises.....	45
FIGURA 18 – Temperatura operativa do modelo com brises	45
FIGURA 19 – Radiação incidente do modelo com brises	46
FIGURA 20 – Radiação visível do modelo com brises	47
FIGURA 21 – Distribuição média luminosa (lux) do modelo com brises.....	48
FIGURA 22 – Fração de dimerização mensal do modelo com brise	49
FIGURA 23 – Imagem HDR entre 6h e 7h da manhã do modelo existente	50
FIGURA 24 – Imagem HDR entre 15h e 16h do modelo existente.....	50
FIGURA 25 – Imagem HDR as 19h do modelo existente	51
FIGURA 26 – Carga térmica do modelo com brises.....	52
FIGURA 27 – Consumo de energia do modelo existente	53
FIGURA 28 – Heatmap do modelo eficiente.....	56
FIGURA 29 – Temperatura operativa do modelo eficiente	56
FIGURA 30 – Taxa de transferência de calor na cobertura do gab. 6 para o modelo existente	57

FIGURA 31 – Taxa de transferência de calor na cobertura do gab. 6 para o modelo eficiente	58
FIGURA 32 – Ganho de calor por uma janela da sala PK10 do modelo existente	59
FIGURA 33 – Ganho de calor por uma janela da sala PK10 do modelo eficiente	59
FIGURA 34 – Perda de calor por uma janela da sala PK10 do modelo existente	60
FIGURA 35 – Perda de calor por uma janela da sala PK10 do modelo existente	60
FIGURA 36 – Fração de dimerização mensal do modelo eficiente	61
FIGURA 37 – Imagem HDR entre 6h e 7h da manhã do modelo eficiente.....	62
FIGURA 38 – Imagem HDR entre 15h e 16h do modelo eficiente.....	62
FIGURA 39 – Imagem HDR das 19h do modelo eficiente	63
FIGURA 40 – Carga térmica do modelo eficiente	63
FIGURA 41 – Consumo de energia do modelo existente	64
FIGURA 42 – Modelo BIM de arquitetura do prédio PK	65
FIGURA 43 – Modelo BIM elétrico para a sala PK10	68
FIGURA 44 – Comparação de consumo energético final	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AIE Agência Internacional de Energia

ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

AVAC Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BIM Building Information Modeling

BEM Building Energy Modeling

CIE International Commission on Illumination

COP Coeficiente de Performance

EPW EnergyPlus Weather File

HDR High Dynamic Range

LBT Ladybug Tools

MDIC Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços

NBR Norma Brasileira Regulamentadora

OSM OpenStudio Model

PBE Programa Brasileiro de Etiquetagem

VRF Variable Refrigerant Flow

3D Três dimensões – Tridimensional

2D Duas dimensões - Bidimensional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo Geral.....	15
2.2. Objetivos específicos.....	15
2.2.1. Diagnosticar o desempenho energético atual do prédio PK ..	15
2.2.2. Desenvolver modelos paramétricos detalhados	15
2.2.3. Simular cenários de melhoria energética	15
2.2.4. Quantificar o impacto das intervenções propostas	16
2.2.5. Estabelecer uma base metodológica replicável	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. Panorama geral da eficiência energética em edificações.....	17
3.1.1. Brasil.....	17
3.2. Building Energy Modeling (BEM).....	17
3.3. Programação Paramétrica.....	19
3.4. Consumo de Energia e Simulação Energética	21
3.5. Análise e Integração de Ferramentas.....	21
4. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	22
4.1. Modelo de Energia.....	22
4.2. Código <i>Python</i> para mapa de calor desenvolvido no Google Colab	25
4.3. Modelo Existente	28
4.3.1. Heatmap do modelo existente	28
4.3.2. Análise de temperatura operativa do modelo existente	30
4.3.3. Análise de radiação solar incidente no modelo existente.....	31
4.3.4. Análise de radiação visível no modelo existente.....	34
4.3.5. Análise da iluminação natural média e dimerização no modelo	35
existente	35
4.3.6. Análise de carga térmica de pico do modelo existente	41
4.3.7. Análise de consumo de energia modelo existente.....	42
4.4. Modelo com a inserção de brises	44
4.4.1. Análise de temperatura operativa do modelo com brises	44
4.4.2. Análise de radiação e iluminação natural do modelo com brises	46
.....	46
4.4.3. Análise de carga térmica e consume energético do modelo com	52
Brises.....	52

4.5. Modelo eficiente com vidro de controle solar e telha com isolamento	54
4.5.1. Análise de temperatura operativa do modelo eficiente	55
4.5.2. Análise de materiais empregados no modelo eficiente	57
4.5.3. Análise de iluminação natural	61
4.5.4. Análise de carga térmica e consumo energético do modelo eficiente	63
4.5.5. Envio de informações ao Revit para criação do modelo BIM.	65
5. CONCLUSÃO	68
5.1. Desempenho do Modelo Existente	68
5.2. Impacto do Modelo com Brises.....	69
5.3. Resultados do Modelo Eficiente	69
5.4. Integração com o BIM e Implementação	71
5.5. Trabalhos futuros.....	71
REFERÊNCIAS.....	72

1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética em edificações tem se tornado uma preocupação central na engenharia e na arquitetura contemporânea, especialmente diante do crescente consumo de energia e dos impactos ambientais associados. Segundo dados da Agência Internacional de Energia (AIE), edificações representam cerca de 40% do consumo total de energia global, com grande parcela destinada a sistemas de climatização e iluminação. Nesse contexto, a implementação de metodologias avançadas para otimizar o desempenho energético de edificações existentes se apresenta como uma solução indispensável para reduzir o consumo energético, promover a sustentabilidade e garantir o conforto térmico dos ocupantes.

Este trabalho tem como foco o prédio PK, uma edificação acadêmica da Universidade Federal do Paraná (UFPR), construída na década de 1970. Caracterizado por soluções construtivas comuns à época, o prédio apresenta desafios significativos no que diz respeito ao desempenho energético, incluindo sistemas de fachada, cobertura e climatização que não atendem às exigências atuais de eficiência. O avanço das ferramentas computacionais nas últimas décadas, especialmente no campo do Building Information Modeling (BIM) e da modelagem paramétrica, possibilitou uma abordagem mais precisa e integrada para análise e otimização de edificações.

A metodologia deste trabalho combina a modelagem BIM com ferramentas avançadas de simulação energética, incluindo Rhino 3D, programação paramétrica utilizando Grasshopper, Ladybug Tools, EnergyPlus e OpenStudio. O processamento de dados utilizando Python, foi essencial para a criação de modelos dinâmicos e adaptáveis, permitindo o ajuste de variáveis para explorar cenários diversos de eficiência energética. Essa abordagem possibilitou a análise de fatores críticos como o impacto da radiação solar direta e difusa, o desempenho térmico de materiais e o comportamento do sistema de climatização, com o objetivo de propor soluções otimizadas.

As intervenções analisadas no prédio PK incluem: a substituição das janelas por modelos de controle solar com fatores U e coeficientes de sombreamento mais baixos; a implementação de brises solares para reduzir o ganho de calor interno; e a substituição da cobertura existente por telhas sanduíche com isolamento térmico em poliuretano. Foi incorporada a análise de sistemas de climatização mais eficientes,

como o uso de sistemas de fluxo de refrigerante variável (VRF), considerando sua capacidade de operar com altos coeficientes de desempenho em cargas parciais.

Por meio dessas simulações, foi possível estabelecer uma metodologia robusta para avaliar e propor soluções integradas, que vão desde a escala arquitetônica até os sistemas de climatização. Este trabalho não apenas busca contribuir para a redução do consumo energético do prédio PK, mas também serve como um exemplo prático de como ferramentas modernas podem ser aplicadas para promover a eficiência energética e a sustentabilidade em edificações acadêmicas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é otimizar o desempenho energético do prédio PK, pertencente ao Setor de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná (UFPR), por meio da aplicação de metodologias modernas de simulação energética e modelagem paramétrica. Busca-se reduzir o consumo de energia atual e com isso possibilitar a entrada de sistema de climatização eficiente para melhorar o conforto térmico dos usuários.

2.2. Objetivos específicos

2.2.1. Diagnosticar o desempenho energético atual do prédio PK

Inicialmente, será realizado um diagnóstico detalhado do desempenho energético atual do prédio PK, analisando suas características arquitetônicas e construtivas, bem como os sistemas existentes de ventilação, climatização e iluminação. Este levantamento busca identificar os elementos de maior impacto no consumo energético e no conforto térmico.

2.2.2. Desenvolver modelos paramétricos detalhados

A partir desse diagnóstico, serão desenvolvidos modelos paramétricos utilizando ferramentas avançadas como Rhino 3D, Grasshopper e Ladybug Tools, integradas ao BIM. A programação em Python será utilizada para automação de processos e ajuste de variáveis, permitindo simulações detalhadas de diferentes cenários que considerem fatores como tipo de materiais, condições climáticas locais e parâmetros operacionais.

2.2.3. Simular cenários de melhoria energética

As simulações explorarão cenários de melhoria energética, avaliando o impacto de intervenções como a substituição de janelas por modelos de controle solar, implementação de brises solares e utilização de telhas sanduíche com isolamento térmico. Além disso, será analisada a influência da radiação solar direta e difusa no comportamento térmico do edifício, propondo soluções que maximizem o desempenho energético.

2.2.4. Quantificar o impacto das intervenções propostas

Os impactos dessas intervenções serão quantificados utilizando softwares de simulação como EnergyPlus e OpenStudio, permitindo calcular cargas térmicas, balanços energéticos e consumo anual de energia da edificação. O cenário mais eficiente será identificado com base em indicadores como redução do consumo de energia, melhoria do conforto térmico e custo-benefício das soluções aplicadas.

2.2.5. Estabelecer uma base metodológica replicável

Por fim, busca-se estabelecer uma base metodológica replicável, que sirva de referência para projetos futuros de retrofit energético em edificações acadêmicas, promovendo a sustentabilidade e a eficiência energética no setor.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que irá orientar o desenvolvimento do trabalho.

3.1. Panorama geral da eficiência energética em edificações

3.1.1. Brasil

A eficiência energética em edificações é um tema de grande relevância na atualidade, especialmente em um contexto de crescente demanda por energia e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), os edifícios são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo global de energia e 33% das emissões de dióxido de carbono relacionadas à energia (AIE, 2019). Assim, a implementação de estratégias de eficiência energética em edificações é crucial para alcançar metas de sustentabilidade e mitigação das mudanças climáticas.

No Brasil, o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) desenvolvido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), estabelece critérios para a avaliação da eficiência energética de edifícios, incentivando práticas sustentáveis e a redução do consumo de energia (Inmetro, 2010). A etiquetagem de edificações permite aos consumidores identificarem os níveis de eficiência energética dos edifícios, promovendo a adoção de tecnologias e práticas mais sustentáveis.

3.2. Building Energy Modeling (BEM)

O Building Energy Modeling (BEM) é uma técnica avançada utilizada para simular e prever o desempenho energético de edificações. O BEM permite a criação de modelos virtuais que replicam o comportamento térmico e energético de um edifício real, permitindo a avaliação de diferentes cenários e estratégias de eficiência energética. De acordo com Crawley et al. (2008), o BEM é uma ferramenta essencial para o design e operação de edifícios sustentáveis, pois fornece dados precisos sobre consumo de energia, conforto térmico e impacto ambiental das edificações. Building Information Modeling (BIM)

O Building Information Modeling (BIM) é uma metodologia que integra todas as fases do ciclo de vida de um edifício, desde o planejamento e design até a construção e operação. O BIM utiliza modelos digitais tridimensionais que contêm informações detalhadas sobre todos os componentes do edifício, facilitando a coordenação entre

diferentes disciplinas e a tomada de decisões informadas. Eastman et al. (2011) destacam que o BIM melhora a precisão dos projetos, reduz erros e retrabalhos, e promove a eficiência e sustentabilidade nas construções.

O BIM proporciona várias vantagens ao longo do ciclo de vida de um edifício, como a detecção de conflitos e interferências entre sistemas construtivos antes da fase de construção. Isso é conseguido através da visualização tridimensional e da capacidade de realizar simulações e análises detalhadas. Azhar (2011) afirma que o uso de BIM pode reduzir significativamente os custos de construção e os prazos de entrega dos projetos, ao mesmo tempo que melhora a qualidade e a segurança das edificações. O BIM facilita a gestão de informações ao longo de todo o ciclo de vida do edifício, incluindo a operação e a manutenção. Segundo Gu e London (2010), a capacidade de acessar e atualizar dados precisos sobre o edifício em tempo real melhora a eficiência das operações de manutenção e prolonga a vida útil dos ativos. O uso de BIM para manutenção e operações permite uma gestão mais eficiente dos recursos e uma resposta mais rápida a problemas emergentes, resultando em economias de custo significativas ao longo do tempo.

No Brasil, a utilização do BIM tem sido incentivada pelo governo federal, com a implantação da Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modeling (Estratégia BIM BR), que visa promover o uso do BIM no setor da construção civil, aumentando a eficiência e a qualidade dos projetos e obras públicas (MDIC, 2018). A Estratégia BIM BR estabelece um conjunto de diretrizes e ações para fomentar a adoção do BIM em todo o país, incluindo a capacitação de profissionais, a normatização e a criação de uma infraestrutura adequada para suportar a implementação do BIM.

Um dos programas mais utilizados para a implementação da metodologia BIM é o Autodesk Revit, que é um programa que permite a criação de modelos detalhados de edificações. Uma das funcionalidades chave do Revit é a capacidade de gerar listas de materiais automaticamente, com base no modelo digital do edifício. Essas listas de materiais são essenciais para a estimativa de custos, planejamento de compras e controle de qualidade. Além disso, as listas de materiais extraídas do Revit garantem a precisão e a consistência das informações, conforme descrito por Krygiel e Nies (2008).

A utilização de listas de materiais extraídas do Revit proporciona uma série de benefícios, incluindo a redução de erros e a melhoria da precisão das estimativas de custo. Segundo Hardin e McCool (2015), a capacidade de gerar listas de materiais diretamente do modelo BIM elimina a necessidade de cálculos manuais e reduz a probabilidade de erros. Isso resulta em estimativas de custo mais precisas e confiáveis, permitindo um melhor planejamento financeiro e a alocação de recursos.

3.3. Programação Paramétrica

O EnergyPlus é amplamente reconhecido como uma das ferramentas mais avançadas para simulação energética de edificações, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Este software possibilita a análise detalhada de elementos essenciais para o desempenho energético, como aquecimento, resfriamento, iluminação, ventilação e sistemas elétricos. Segundo o Manual do Usuário do EnergyPlus (2020), sua abordagem baseada em algoritmos avançados permite calcular transferências de calor, ganhos solares e consumo de energia com alta precisão, fornecendo resultados confiáveis para a tomada de decisões informadas.

A integração do EnergyPlus com ferramentas de modelagem paramétrica, como Rhino e Grasshopper, adiciona uma camada significativa de flexibilidade e precisão às análises. Rhino, um software de modelagem tridimensional amplamente utilizado em arquitetura e engenharia, aliado ao plugin Grasshopper, permite a criação de modelos paramétricos que facilitam a manipulação de variáveis de design. Essa combinação possibilita explorar múltiplos cenários de eficiência energética, ajustando parâmetros para atingir melhores resultados. Woodbury (2010) ressalta que a modelagem paramétrica, por meio dessa integração, é uma abordagem poderosa que promove a exploração rápida e eficiente de soluções de design. Além disso, Davis (2013) destaca como essa metodologia permite maior agilidade no processo de adaptação a novas condições e requisitos, essencial em projetos que demandam inovação constante.

A capacidade de integração do Rhino e do Grasshopper com plataformas como Ladybug Tools e EnergyPlus amplia ainda mais a eficácia dessas ferramentas, permitindo análises detalhadas do desempenho energético das edificações. Essa conexão promove uma abordagem mais holística, onde decisões de design podem ser diretamente vinculadas aos resultados das simulações, otimizando soluções

arquitetônicas e de engenharia. Ferramentas como o Ladybug Tools, por exemplo, possibilitam a análise de radiação solar, transmitância térmica e desempenho dos materiais, contribuindo para projetos mais informados e sustentáveis.

No contexto da programação paramétrica, a aplicação de algoritmos e variáveis para definir e manipular a geometria dos modelos digitais desempenha um papel central na construção e eficiência energética. Essa técnica permite a criação de modelos altamente adaptáveis, que podem ser ajustados para explorar diferentes opções de design e estratégias de eficiência. Kilkelly (2014) aponta que a programação paramétrica é crucial para integrar dados de desempenho energético ao processo de design, resultando em projetos de maior qualidade e sustentabilidade. Essa abordagem permite não apenas a automação de processos repetitivos, mas também a geração de soluções personalizadas que atendam a requisitos específicos de cada projeto.

A modelagem paramétrica, amplamente utilizada em arquitetura e engenharia, possibilita explorar rapidamente diferentes cenários de design e avaliar seus impactos no desempenho energético. Burry (2011) destaca que essa metodologia oferece uma abordagem iterativa e exploratória ao design, incentivando a inovação e a otimização de soluções arquitetônicas. Essa flexibilidade é essencial em projetos que demandam uma integração contínua entre estética, funcionalidade e eficiência energética. Ferramentas como o OpenStudio, desenvolvidas pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL), complementam essa abordagem ao fornecer uma plataforma de código aberto para modelagem energética. O OpenStudio integra vários componentes de software para facilitar a simulação detalhada de edifícios, oferecendo uma interface gráfica que simplifica a criação, edição e visualização de modelos energéticos. Parker et al. (2018) destacam que essa plataforma melhora a acessibilidade e a usabilidade das ferramentas de simulação, promovendo uma maior adoção de práticas sustentáveis em projetos arquitetônicos. A integração com o EnergyPlus é particularmente vantajosa, pois permite que análises abrangentes sejam realizadas de forma mais simplificada.

A combinação dessas ferramentas e metodologias – EnergyPlus, Rhino, Grasshopper, Ladybug Tools, OpenStudio e a programação paramétrica – proporciona uma abordagem robusta para a análise e otimização energética de edificações. Essa integração possibilita a identificação de soluções eficientes e,

também, a adaptação a diferentes cenários climáticos e arquitetônicos, promovendo um equilíbrio entre funcionalidade, sustentabilidade e desempenho térmico.

3.4. Consumo de Energia e Simulação Energética

O consumo de energia de um edifício é influenciado por diversos fatores, incluindo o clima, a orientação, os materiais de construção, os sistemas de iluminação e climatização, e os padrões de ocupação. A simulação energética é uma técnica que utiliza modelos computacionais para prever o consumo de energia e o desempenho térmico de um edifício sob diferentes condições. Esta abordagem permite identificar oportunidades de melhoria e avaliar o impacto de diferentes estratégias de eficiência energética. De acordo com Hensen e Lamberts (2011), a simulação energética é uma ferramenta essencial para o *design* de edifícios sustentáveis, pois fornece dados quantitativos que podem ser utilizados para otimizar o consumo de energia e melhorar o conforto térmico dos ocupantes.

A simulação energética permite a análise detalhada de diversos cenários, facilitando a identificação de soluções que podem reduzir o consumo de energia e melhorar o conforto térmico dos ocupantes. Segundo Lamberts et al. (2014), a utilização de ferramentas de simulação energética, como o *EnergyPlus* e o *OpenStudio*, é essencial para a avaliação e otimização do desempenho energético dos edifícios. Essas ferramentas permitem a simulação de diferentes estratégias de eficiência energética, como a utilização de materiais isolantes, sistemas de ventilação natural e tecnologias de controle automatizado, proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões informadas.

3.5. Análise e Integração de Ferramentas

A integração de diferentes ferramentas de modelagem e simulação, como BIM, BEM, *Rhino*, *Grasshopper*, *EnergyPlus* e *OpenStudio*, permite uma análise abrangente e detalhada do desempenho energético dos edifícios. Essa abordagem integrada facilita a coordenação entre diferentes disciplinas e promove a tomada de decisões informadas, com base em dados precisos e confiáveis. A utilização de algoritmos paramétricos e programação visual permite a exploração de múltiplos cenários de design e a otimização de soluções arquitetônicas e de engenharia. Como destacado por Eastman et al. (2011), a integração de ferramentas de modelagem e

simulação é fundamental para alcançar os objetivos de sustentabilidade e eficiência energética em projetos de construção.

4. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

O desenvolvimento deste trabalho foi estruturado em uma abordagem integrada, que combina a modelagem paramétrica com simulações energéticas avançadas. Essa integração possibilitou a análise detalhada do desempenho energético do prédio PK, considerando as interações entre materiais, sistemas e variáveis ambientais. A modelagem foi realizada no software Rhino 3D, com parametrização no Grasshopper e integração ao Ladybug Tools para geração de dados e visualização. O processo foi fundamental para avaliar diferentes cenários de eficiência energética e validar soluções otimizadas.

4.1. Modelo de Energia

A construção do modelo energético do Bloco PK foi realizada utilizando uma abordagem integrada que combina modelagem tridimensional, parametrização e simulações computacionais avançadas. O objetivo principal dessa etapa foi capturar de maneira precisa o comportamento térmico e energético do edifício, considerando suas características construtivas e condições climáticas locais.

O processo iniciou-se com a modelagem completa do edifício no software Rhino 3D, seguido da parametrização no Grasshopper, uma plataforma que permite a automação e a manipulação de variáveis em tempo real. A modelagem contemplou elementos fundamentais para a análise energética, como paredes externas e internas, pisos, janelas, portas e coberturas. Cada componente foi parametrizado com base em dados reais extraídos das plantas arquitetônicas, visita in loco e relatórios técnicos existentes.

Os materiais foram definidos de acordo com os padrões construtivos do edifício, seguindo as especificações levantadas nos relatórios. Por exemplo, as paredes externas foram modeladas como blocos cerâmicos duplos com câmara de ar, revestidas de argamassa e pintura branca, enquanto a cobertura foi configurada como telhas de fibrocimento de 8 mm, câmara de ar de 30 cm e laje de concreto de 15 cm. As propriedades térmicas desses materiais foram extraídas da NBR 15220, incluindo dados de condutividade térmica, densidade e calor específico.

A integração com o Ladybug Tools e o EnergyPlus foi essencial para as simulações térmicas e energéticas, permitindo calcular transferências de calor, ganhos solares e cargas térmicas ao longo do ano. Um arquivo climático específico para Curitiba, em formato EPW, foi utilizado para garantir a precisão das análises. As simulações consideraram 8.760 horas do ano, abrangendo variações sazonais e padrões de uso. O modelo incluiu a configuração das propriedades ópticas e térmicas das janelas, que possuem fator solar de 0,8 e espessura de 3 mm. Esses elementos foram cruciais para avaliar o impacto da radiação solar direta e difusa na carga térmica interna, destacando a importância da escolha de materiais de alta eficiência, como telhas sanduíche ou vidros de controle solar, sugeridos para futuras melhorias.

O detalhamento geométrico e térmico foi complementado com a inclusão de galerias subterrâneas, uma característica única do Bloco PK. Essas galerias permitem potencializar a ventilação natural, contribuindo para o conforto térmico sem a necessidade de sistemas mecânicos complexos. A simulação dessas galerias indicou sua capacidade de promover fluxos de ar ascendentes, mas também ressaltou a necessidade de estudos adicionais para maximizar seu desempenho. As propriedades térmicas dos materiais foram validadas no EnergyPlus, utilizando algoritmos que seguem as normas ASHRAE e ISO. Isso garantiu que os cálculos de transmitância térmica fossem representativos das condições reais do edifício.

Na figura abaixo é mostrado as etapas da criação do modelo de energia.

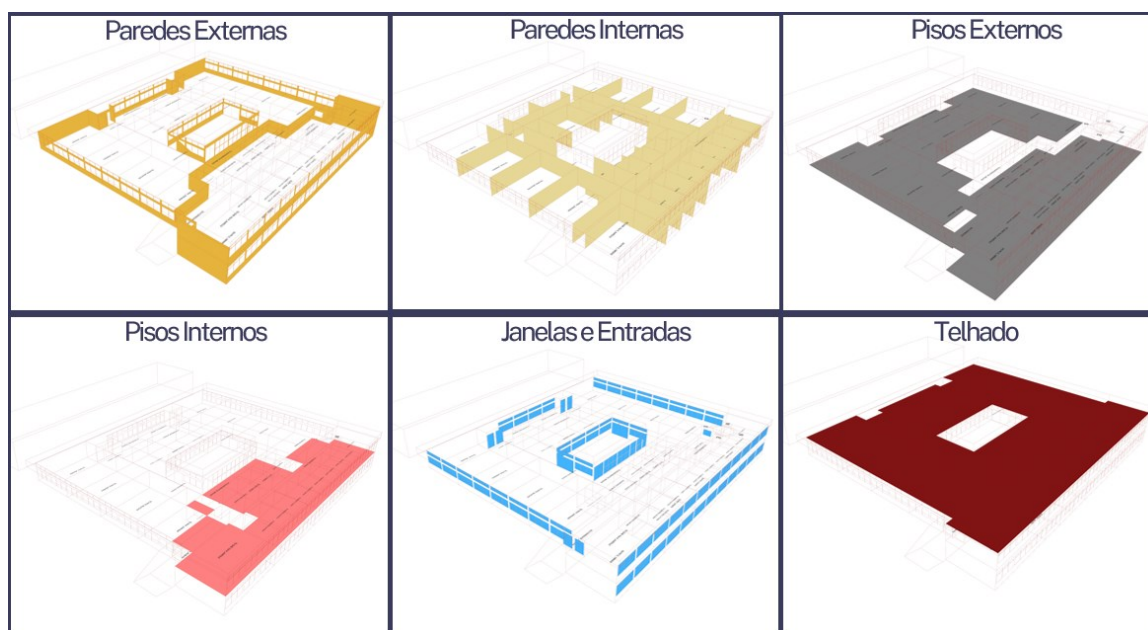


FIGURA 1 – Etapas de criação do modelo de energia

Fonte: O Autor (2024).

Cada ambiente foi criado com a volumetria e nomes originais. Na imagem abaixo é possível avaliar como ficou o modelo final para início das simulações.

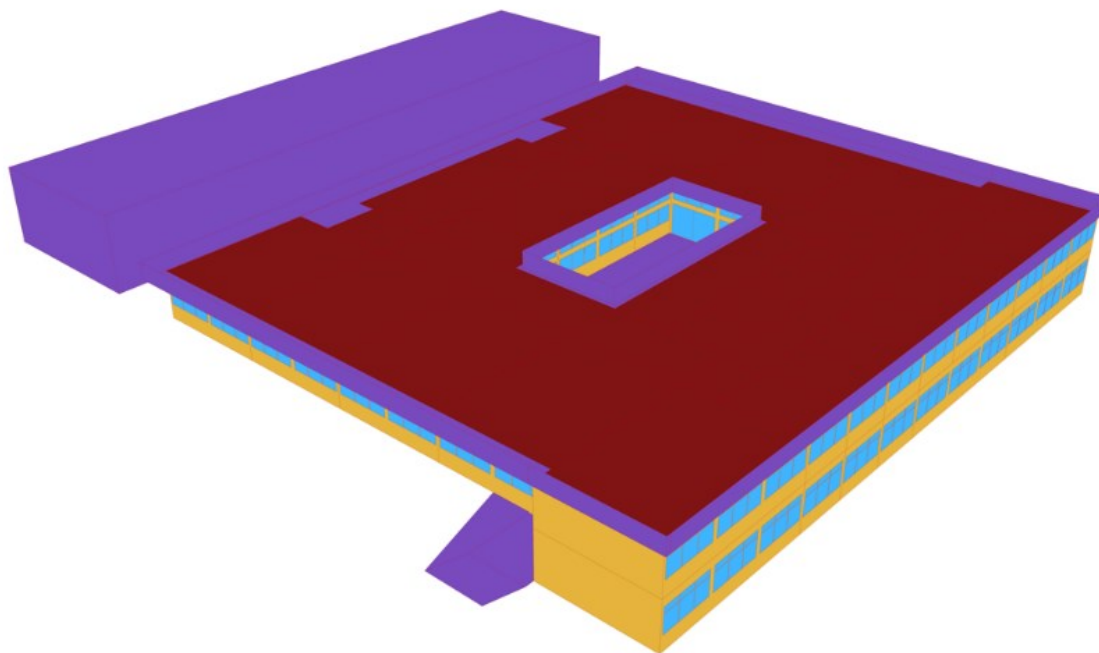


FIGURA 2 – modelo final de energia – prédio PK

Fonte: O Autor (2024).

Para a realização das simulações energéticas, foram desenvolvidos e analisados três modelos distintos do Bloco PK, cada um representando diferentes configurações de eficiência energética e estratégias de conforto térmico. O objetivo principal foi avaliar como intervenções arquitetônicas e melhorias tecnológicas poderiam otimizar o desempenho energético do edifício, mantendo ou melhorando a qualidade do ambiente interno.

O primeiro modelo representou a configuração atual do edifício, caracterizada por janelas amplas com vidro transparente de 3 mm e ausência de elementos de sombreamento ou isolamento térmico significativo. Este modelo serviu como referência para comparação, fornecendo uma base realista do comportamento energético e térmico do edifício na sua condição original. As simulações desse modelo evidenciaram a influência negativa da radiação solar direta e das altas taxas de transferência de calor sobre o consumo energético e o conforto dos ocupantes.

O segundo modelo incorporou a instalação de brises solares, elementos arquitetônicos projetados para mitigar a incidência direta da radiação solar nos ambientes internos. Esses brises foram configurados considerando ângulos ideais para a latitude de Curitiba, otimizando a redução da carga térmica sem comprometer significativamente a iluminação natural. Este modelo foi avaliado tanto em relação à melhoria do conforto térmico quanto à manutenção de níveis adequados de luz natural, evitando aumento desnecessário no uso de iluminação artificial. Os resultados mostraram uma redução moderada nas cargas térmicas internas, especialmente nas fachadas expostas à radiação direta, com impacto positivo na redução da necessidade de resfriamento.

O terceiro modelo apresentou uma abordagem mais abrangente e tecnologicamente avançada. As janelas existentes foram substituídas por modelos de alto desempenho, equipadas com vidro laminado Silver 32 de 6 mm da Guardian, conhecido por suas propriedades superiores de isolamento térmico e controle solar. Este vidro reduz a transmissão de calor solar sem prejudicar a entrada de luz visível, otimizando o balanço entre iluminação natural e ganho térmico. Além disso, o telhado foi substituído por um sistema tipo sanduíche, com isolamento em poliuretano de 50 mm, fornecendo uma barreira térmica altamente eficiente contra ganhos e perdas de calor. A adoção desse telhado foi baseada nos resultados das análises iniciais que demonstraram a significativa contribuição do telhado convencional para a carga térmica total do edifício. Adicionalmente, foi considerada a instalação de sistemas de climatização com tecnologia avançada, ajustáveis às demandas reais de ocupação e condições climáticas, otimizando o consumo energético e mantendo o conforto térmico.

4.2. Código *Python* para mapa de calor desenvolvido no Google Colab

Para cada modelo desenvolvido, foram gerados gráficos detalhados e mapas de calor, os quais ilustram o comportamento térmico dos ambientes ao longo das 24 horas do dia. Esses resultados foram obtidos a partir de dados das simulações energéticas processados com o auxílio de um código *Python* personalizado, desenvolvido especificamente para este trabalho. O objetivo foi explorar o comportamento térmico de cada espaço do edifício, identificando padrões de variação de temperatura que pudessem subsidiar decisões de projeto e estratégias de otimização energética.

O algoritmo desenvolvido utilizou o Ladybug Tools como base para as simulações energéticas iniciais. Essa ferramenta permitiu a geração de dados brutos detalhados sobre o desempenho térmico do edifício. Posteriormente, os dados foram exportados e processados por meio do código Python, que integrou técnicas avançadas de análise de dados e visualização gráfica. O código foi projetado para transformar essas informações complexas em relatórios e mapas de calor (heatmaps) de alta qualidade, os quais sintetizam grandes volumes de dados em representações visuais intuitivas.

Os heatmaps gerados permitem identificar rapidamente os padrões de comportamento térmico ao longo do dia, com análises específicas para cada ambiente do edifício. Por exemplo, o mapa de calor apresentado na figura demonstra a variação de temperatura em diferentes salas e horários, destacando períodos críticos de desconforto térmico e potenciais sobrecargas térmicas em determinadas áreas. Essa visualização detalhada facilita a avaliação do impacto das intervenções propostas em cada modelo, como a implementação de brises solares ou a substituição de materiais construtivos.

A abordagem integrada entre Ladybug Tools e Python possibilitou uma análise detalhada e permitiu personalizações específicas para este projeto, como a criação de relatórios que cruzam variáveis térmicas com o desempenho energético geral. Essa sinergia entre ferramentas computacionais garantiu maior precisão nas análises e clareza na apresentação dos resultados, estabelecendo uma base sólida para futuras melhorias no projeto e fornecendo subsídios valiosos para a otimização do desempenho térmico e energético de edificações similares.

A Figura 3 a seguir apresenta de maneira resumida os procedimentos metodológicos que serão descritos de maneira detalhada ao longo do capítulo.

```
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.colors import LinearSegmentedColormap
from io import StringIO

# Dados diretamente inseridos no código
dados_csv_texto = """
Hora,Ambiente,Temperatura
```

```

#nesse espaço é colocado o csv retirado da simulação energética
"""

# Carrega os dados diretamente da string
dados_csv = pd.read_csv(StringIO(dados_csv_texto))

# Converte a coluna 'Hora' para o formato desejado (0:00, 1:00,
..., 23:00)
dados_csv['Hora'] = dados_csv['Hora'].apply(lambda x:
f"{int(x)}:00")

# Ordena as horas para garantir a ordem correta
dados_csv['Hora'] = pd.Categorical(dados_csv['Hora'],
categories=[f"{i}:00" for i in range(24)], ordered=True)

heatmap_data = dados_csv.pivot_table(index='Hora',
columns='Ambiente', values='Temperatura', aggfunc='mean')

# Define a paleta de cores personalizada (utilizando RGB)
cores = [(0, 128/255, 0), (1, 1, 0), (1, 165/255, 0), (1, 0,
0)] # Verde, amarelo, laranja, vermelho
custom_palette =
LinearSegmentedColormap.from_list('custom_palette', cores)

# Ordena as colunas de acordo com a ordem das cores na paleta
personalizada
heatmap_data=heatmap_data.reindex(columns=["#aqui vai o nome dos
ambientes"])

# Ajusta do tamanho do gráfico
plt.figure(figsize=(2, 8))

# Plotagem do heatmap
sns.set()
sns.set_style("darkgrid") # Adiciona linhas de grade com cor
cinza escuro
heatmap = sns.heatmap(heatmap_data, cmap=custom_palette,
cbar_kws={'label': 'Temperatura (°C)', 'ticks': range(20, 50, 5)},
linewidths=0.5, linecolor='gray')

# Adiciona rótulos e título
plt.xlabel('Ambiente')
plt.ylabel('Hora do Dia')
plt.title('Heatmap de Temperaturas ao Longo do Dia por Ambiente')

# Define os rótulos dos ticks sem repetição e ajuste o tamanho
da fonte dos ambientes
heatmap.set_xticks(range(len(dados_csv['Ambiente'].unique())))

```

```

heatmap.set_xticklabels(dados_csv['Ambiente'].unique(),
rotation=90, fontsize=8) # Ajusta a rotação e o tamanho da fonte
conforme necessário
heatmap.set_yticks(range(len(dados_csv['Hora'].unique())))
heatmap.set_yticklabels(dados_csv['Hora'].unique(), rotation=0,
ha='right')

# Exibe o heatmap
plt.show()

```

FIGURA 3 – Código Python para heatmap

Fonte: O Autor (2024).

4.3. Modelo Existente

4.3.1. Heatmap do modelo existente

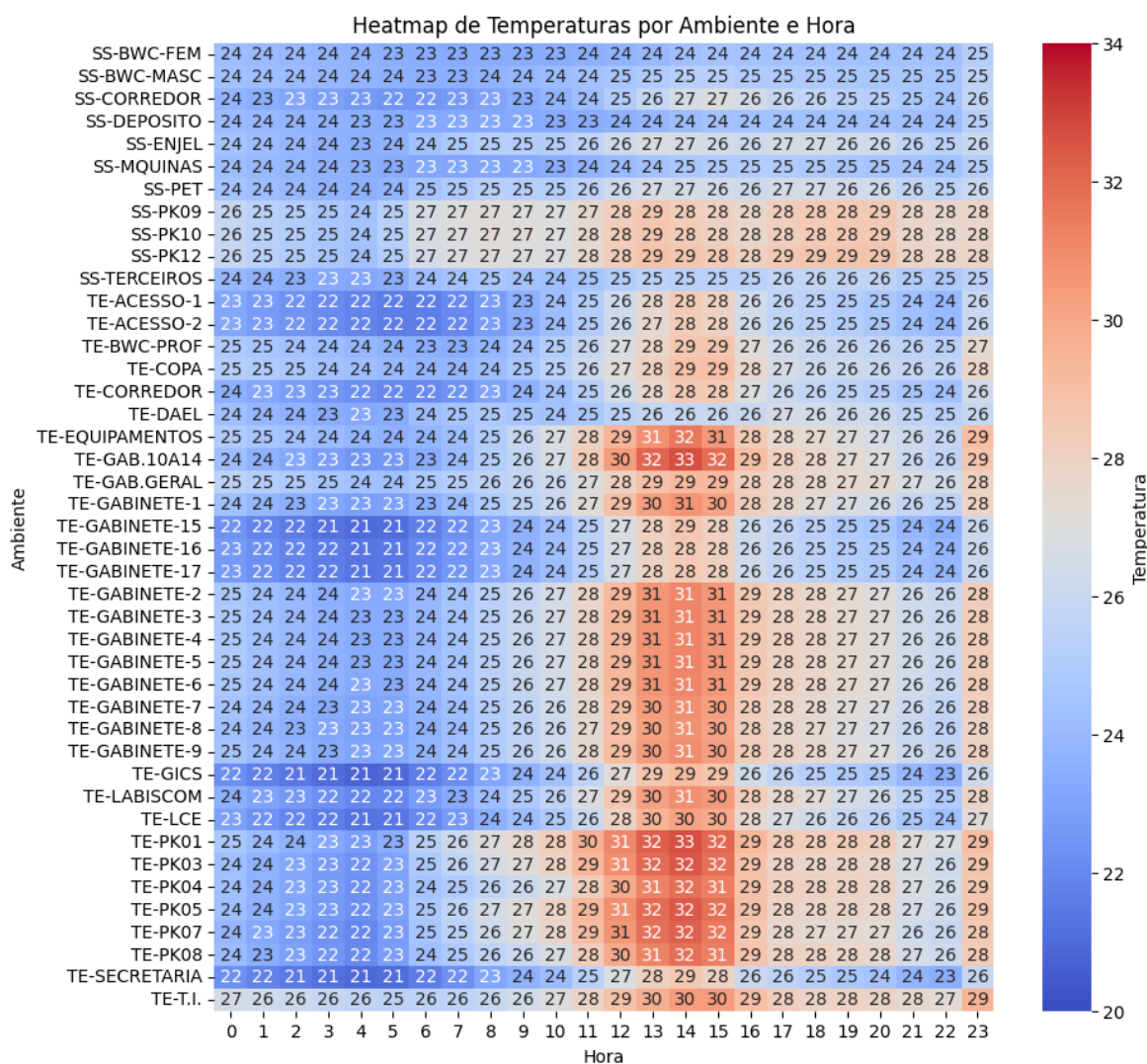


FIGURA 4 – Heatmap do modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

O heatmap ilustrado na figura evidencia a variação de temperatura nos diferentes ambientes do prédio PK ao longo das 24 horas do dia. Este modelo representa a configuração original do edifício, sem intervenções para melhoria de eficiência energética ou conforto térmico. A escala de cores utilizada vai do azul ao vermelho, correspondendo, respectivamente, a temperaturas mais baixas e mais elevadas, permitindo uma análise visual clara das zonas de maior e menor desconforto térmico.

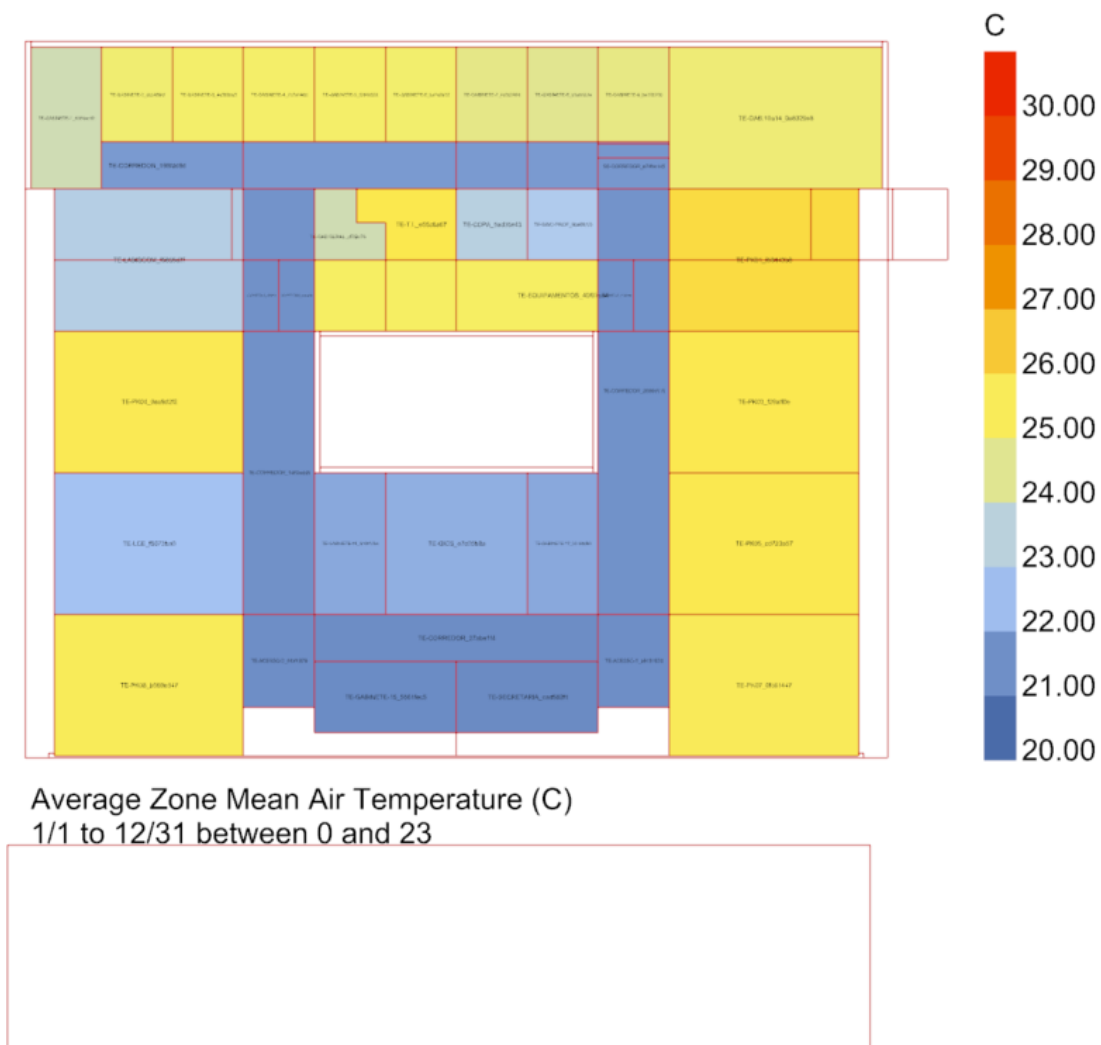
De maneira geral, observa-se que os ambientes permanecem dentro de uma faixa térmica moderada durante as horas noturnas e matutinas, predominantemente em torno de 23 a 25°C. Este comportamento é característico da ausência de cargas internas significativas e da redução da radiação solar incidente durante esses períodos. No entanto, à medida que o dia avança, especialmente a partir das 10h, há um aumento gradual das temperaturas em algumas zonas específicas do edifício.

Entre 12h e 16h, os ambientes voltados para regiões mais expostas à radiação solar direta, como os gabinetes e salas GABINETE-1 a GABINETE-9, apresentam um pico térmico com temperaturas que atingem até 34°C. Este aumento acentuado é influenciado por fatores como a orientação das janelas, a inexistência de sombreamento eficaz e o uso de vidros simples de 3mm, que possuem baixa capacidade de controle solar. Este fenômeno é ainda mais evidente em salas como GAB.10 ao 14, que demonstram valores superiores a 30°C durante o período mais crítico do dia, resultando em desconforto térmico significativo. Por outro lado, ambientes como corredores e áreas de menor exposição solar direta, como os banheiros e depósitos, mantêm temperaturas relativamente estáveis ao longo do dia, próximas de 24°C. Isso reflete a influência do sombreamento passivo e da menor carga térmica interna nesses espaços.

Outro aspecto relevante é a uniformidade térmica em locais como a SECRETARIA e LABISCOM, que apresentam flutuações de temperatura menos acentuadas devido à possível proteção proporcionada por paredes internas adjacentes e à redução da troca de calor com o ambiente externo. Esse comportamento ressalta a importância do isolamento térmico nas paredes e tetos, que, neste modelo, é limitado.

4.3.2. Análise de temperatura operativa do modelo existente

A figura 5 a seguir, demonstra como a temperatura interna média é percebida pelos ocupantes.



Planta Térmica do Térreo



Planta Térmica do Subsolo

FIGURA 5 – Calor interno no modelo existente
Fonte: O Autor (2024).

As imagens do térreo e do subsolo ilustram a distribuição da temperatura operativa média anual, um parâmetro crucial para avaliar o conforto térmico percebido pelos ocupantes. A temperatura operativa considera a média entre a temperatura do ar e a das superfícies internas, sendo particularmente relevante em análises de eficiência energética e conforto ambiental.

No térreo, os ambientes próximos às fachadas mais expostas à radiação solar, como os gabinetes voltados para o norte, apresentam temperaturas operativas mais elevadas ao longo do ano. Por outro lado, corredores e salas internas, menos expostos, mantêm temperaturas mais amenas, refletindo a menor influência da radiação direta e das trocas térmicas com o ambiente externo.

No subsolo, a parte frontal apresenta temperaturas operativas elevadas, comportamento semelhante aos gabinetes do térreo imediatamente acima. Essa área é influenciada por ganhos térmicos advindos da radiação solar direta na fachada. Em contraste, a região mais ao fundo do subsolo, coberta por terra, mantêm temperaturas significativamente mais estáveis e próximas ao conforto térmico, devido à inércia térmica natural proporcionada pelo isolamento do solo.

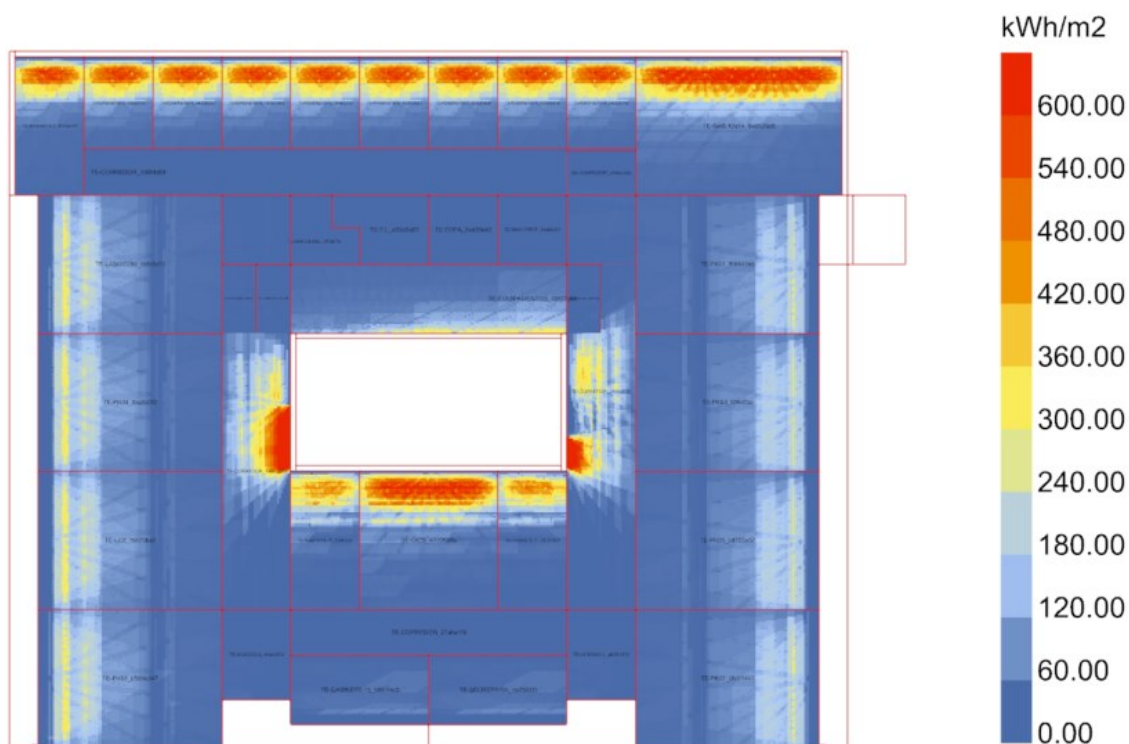
A análise dessas diferenças é crucial para entender como fatores como isolamento térmico, radiação solar e ventilação impactam o conforto dos ocupantes. A média anual permite identificar padrões, revelando onde intervenções são mais urgentes, como melhorias no isolamento térmico e inserção de equipamentos de climatização.

4.3.3. Análise de radiação solar incidente no modelo existente

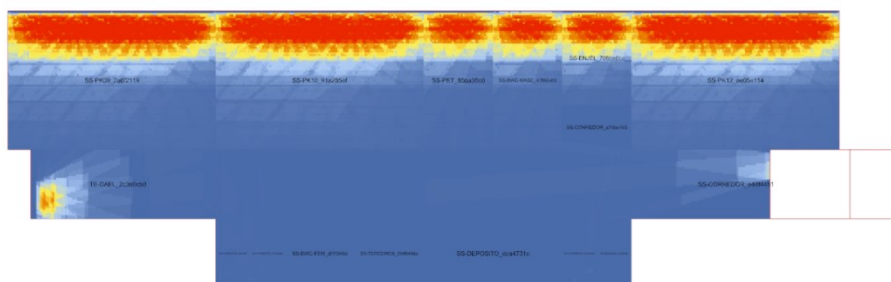
A figura 6 foi gerada a partir de uma análise técnica que utilizou uma matriz hemisférica de distribuição de radiação solar acumulada, baseada em dados climáticos específicos da localização do edifício. Esta matriz foi desenvolvida com o objetivo de calcular a radiação solar incidente sobre as superfícies do edifício ao longo do ano, utilizando dados climáticos extraídos de um arquivo EPW. A análise acumulativa identifica as áreas que recebem maior ou menor exposição solar, auxiliando no planejamento de estratégias de mitigação de cargas térmicas.

A radiação solar é um fator crucial para o desempenho energético e conforto térmico em edificações. A análise realizada fornece a distribuição anual da radiação incidente em kWh/m², permitindo identificar as zonas críticas de insolação. Isso auxilia

no desenvolvimento de soluções como brises, vidros de controle solar e telhas isolantes, promovendo maior eficiência energética e conforto ambiental.



Planta de Radiação Incidente do Térreo



Planta Radiação Incidente do Subsolo

FIGURA 6 – Radiação solar incidente do modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

Nas imagens apresentadas, o térreo do edifício (primeira figura) evidencia altas intensidades de radiação nas áreas próximas às janelas dos gabinetes próximos a fachada norte. Essas zonas apresentam níveis de radiação superiores a 600 kWh/m², indicando a necessidade de soluções de sombreamento ou vidros com propriedades de controle solar para minimizar o impacto térmico nesses espaços. Os ambientes internos, protegidos da radiação direta, mostram níveis significativamente mais baixos

de radiação, abaixo de 200 kWh/m², evidenciando menor exposição e, conseqüentemente, menor necessidade de intervenções.

Já no subsolo, os ambientes próximos às fachadas, como PK-09, PK10, PK12, PET e ENJEL recebem altos níveis de radiação, devido à proximidade com áreas envidraçadas que captam luz solar direta.

Esses padrões de radiação acumulada indicam a importância de soluções específicas para cada zona do edifício. Em áreas com alta radiação, como o térreo e partes do subsolo próximas a janelas, são recomendadas intervenções como brises solares ou vidros de alta performance.

Na geometria analisada, o total de radiação solar térmica incidente acumulada foi de 175.592,49 kWh.

De acordo com Myers (2003), em condições de céu claro, a irradiância solar direta ao meio-dia pode atingir aproximadamente 1 kW/m², sendo este um parâmetro amplamente utilizado em análises de energia solar e estudos de eficiência energética. Foi analisado o dia 15 de fevereiro, ao meio dia, em 1 m² de área da sala PK10 se os valores se aproximavam de 1 kWh/m². Os resultados são apresentados na Figura 7.



FIGURA 7 – Radiação Solar incidente em 1 m²

Fonte: O Autor (2024).

A análise de radiação solar incidente na sala PK10 foi realizada utilizando o componente "Incident Radiation" do Ladybug Tools, onde foi criada uma malha de 1

m². O objetivo foi validar a precisão do modelo em relação ao valor de referência de 1 kWh/m², frequentemente utilizado em simulações para dias claros com céu limpo. O resultado obtido foi de 0,9163 kWh/m², demonstrando uma boa correspondência com os valores esperados. Esse dado evidencia que o modelo computacional está corretamente configurado para representar as condições de radiação solar na edificação, respeitando os parâmetros climáticos e de posicionamento.

Esse resultado é essencial para comprovar a confiabilidade das simulações energéticas realizadas ao longo do trabalho. A validação com base em um parâmetro amplamente reconhecido, reforça a robustez do modelo ao simular os impactos da radiação solar nos balanços térmicos e no desempenho energético do edifício. A imagem gerada (Figura 7) evidencia como a radiação solar foi distribuída na sala, destacando a precisão da metodologia aplicada para simular as condições reais.

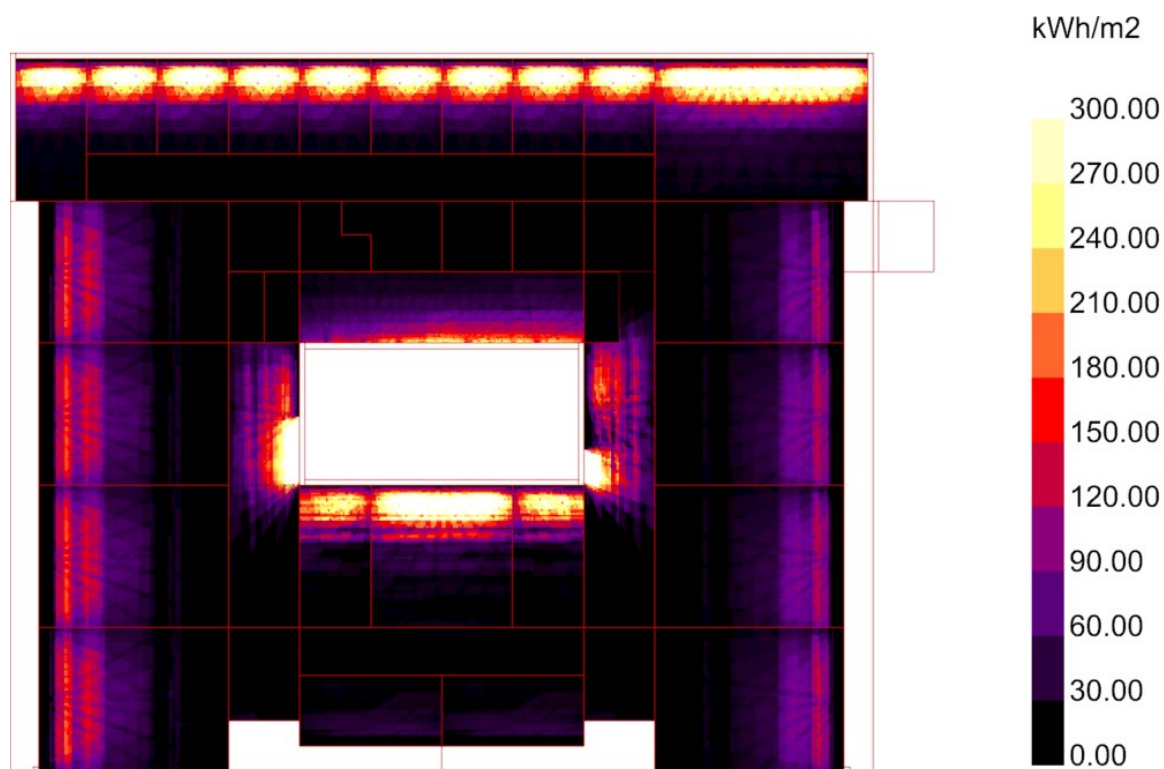
4.3.4. Análise de radiação visível no modelo existente

A radiação incidente visível representa a parcela do espectro solar que contribui diretamente para a iluminação natural nos ambientes internos. Este tipo de radiação é fundamental para garantir conforto visual e reduzir a necessidade de iluminação artificial durante o dia. Análise da radiação visível acumulada permite identificar áreas com maior exposição à luz natural e regiões que requerem intervenções para melhorar sua iluminação.

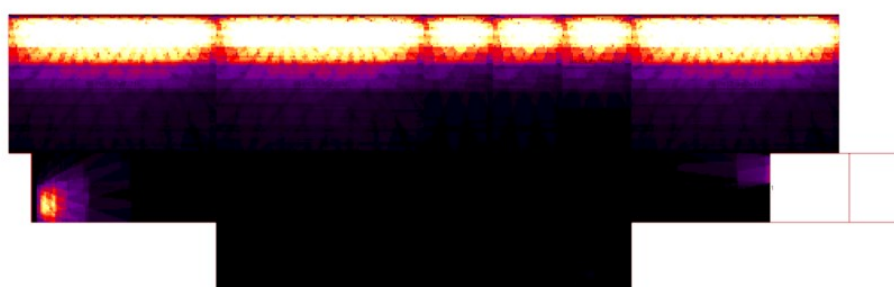
A imagem 7 mostra a radiação solar incidente acumulada ao longo do ano, destacando o potencial de iluminação natural do prédio. Sensores cobrindo 0,1 m² captaram os valores de radiação direta e difusa, com base na matriz climática local. O total acumulado de radiação foi de 110.045,63 kWh.

No térreo, as janelas em fachadas expostas acumulam até 300 kWh/m², concentrando a maior parte da radiação. Já áreas internas, sem contato direto com aberturas, registram valores abaixo de 150 kWh/m², indicando baixa iluminação natural nesses espaços.

No subsolo, as regiões próximas às aberturas superiores apresentam radiação de até 270 kWh/m², enquanto áreas internas e cobertas têm valores próximos de zero, reforçando a ausência de luz natural. Esses dados são essenciais para otimizar a distribuição de iluminação natural, avaliar sombreamento e melhorar o conforto visual interno.



Planta de Radiação Incidente Visível do Térreo



Planta Radiação Incidente Visível do Subsolo

FIGURA 8 – Radiação solar visível do modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

4.3.5. Análise da iluminação natural média e dimerização no modelo existente

A avaliação da iluminação natural no prédio existente foi realizada com base em simulações avançadas de comportamento lumínico anual. Estas simulações consideraram a quantidade de luz natural que penetra nos ambientes internos ao longo do ano, avaliando a intensidade luminosa média em lux. A iluminação natural é um fator essencial para ambientes como salas de aula, onde as normativas, como a NBR ISO/CIE 8995-1, recomendam níveis mínimos de 500 lux para salas de aulas e locais para leitura e escrita, enquanto para circulações foi adotado o valor de 300 lux.

As simulações foram conduzidas utilizando métodos que empregam o motor de cálculo Radiance, reconhecido pela precisão em análises de iluminação. Inicialmente, foi gerada uma análise anual de iluminação considerando o clima local e a geometria do edifício. Sensores virtuais foram dispostos a uma altura de 0,7 m do piso, representando a altura média de mesas em salas de aula, com uma malha de densidade de 0,2 m². Essa configuração permite avaliar a distribuição de iluminação natural em detalhes. Posteriormente, os resultados foram processados para calcular os valores médios anuais de iluminância em cada ambiente. Essa análise consolidada é essencial para identificar áreas que atendem aos requisitos normativos ou demandam ajustes no design arquitetônico.

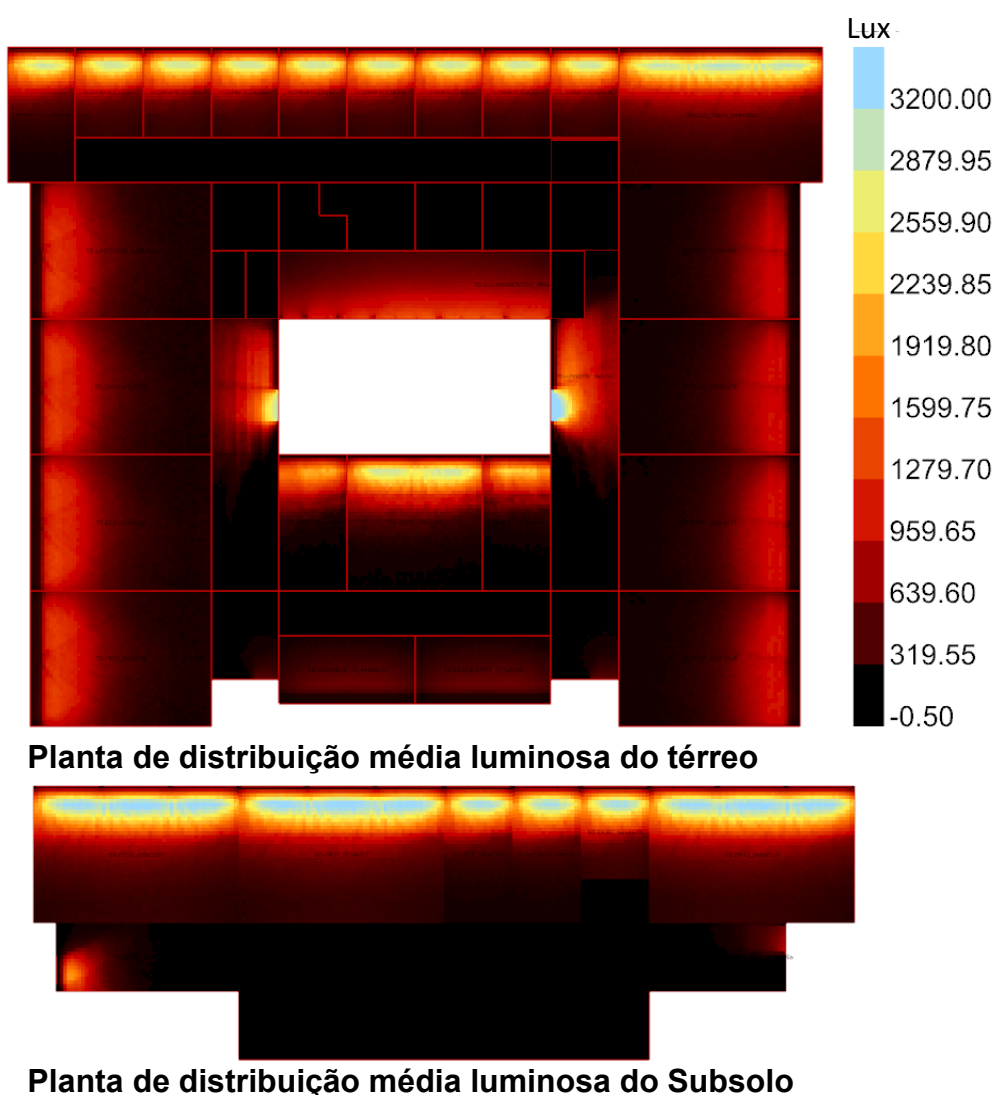


FIGURA 9 – Distribuição média luminosa (lux) do modelo existente
Fonte: O Autor (2024).

Para o dimensionamento da iluminação e realização da análise de dimerização, foi considerada a densidade de potência de iluminação recomendada pela norma ASHRAE 90.1, que estabelece o valor de $7,7 \text{ W/m}^2$ para edifícios educacionais em salas de aula típicas. Esse parâmetro foi adotado como base para simulações de eficiência energética e controle de iluminação natural, permitindo avaliar o impacto da dimerização sobre o consumo energético total do edifício.

Os resultados destacam que a fachada norte do edifício apresenta os níveis mais elevados de iluminação natural devido à sua exposição direta à radiação solar. No entanto, áreas internas e sombreadas possuem valores de iluminância abaixo do ideal, indicando maior dependência de iluminação artificial.

- Sem dimerização:
 - Potência total de iluminação anual: 59.680 kWh
 - Consumo médio por metro quadrado: $27,93 \text{ kWh/m}^2$
- Com dimerização:
 - Potência total de iluminação anual: 44.127 kWh
 - Consumo médio por metro quadrado: $20,65 \text{ kWh/m}^2$
 - Redução do consumo com dimerização: 26,06%

A dimerização ajusta automaticamente a intensidade da luz artificial, complementando a luz natural disponível, resultando em uma economia energética significativa.

Indo mais a fundo nas simulações, a figura 9 apresentada ilustra a variação fracionária de dimerização ao longo do ano para a sala modelo PK10. A metodologia utilizada considera a integração de estratégias de controle de luz natural, ajustando dinamicamente a intensidade da iluminação artificial com base na disponibilidade de luz natural.

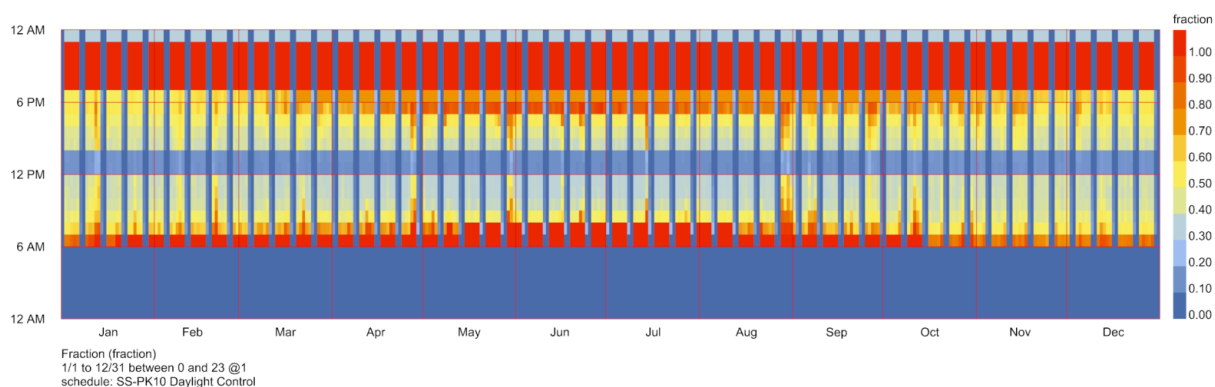


FIGURA 10 – Fração de dimerização mensal do modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

A simulação foi realizada considerando um método que modela o comportamento dos sistemas de controle de iluminação automatizados. Esse processo utiliza sensores virtuais distribuídos na sala, capturando a iluminância ao longo do dia. Com base nesses dados, os níveis de dimerização da iluminação artificial são ajustados, reduzindo o consumo de energia elétrica sempre que a luz natural atende parcialmente ou completamente às necessidades de iluminância.

O gráfico destaca a relação entre os horários de maior necessidade de iluminação artificial e os períodos em que a luz natural é suficiente para atender à norma técnica.

A análise evidenciou que, durante o período de maior incidência solar (meses de verão), há uma significativa redução na necessidade de iluminação artificial durante o horário letivo. No entanto, nos meses de inverno e em horários de baixa luz natural (manhãs e finais de tarde), o nível de dimerização aumenta proporcionalmente, indicando maior demanda por iluminação artificial.

Como forma de demonstrar ainda mais como a sala de aula PK10 se comporta em termos de iluminação natural e explicar melhor o gráfico supra apresentado, foi dado um zoom no mês de janeiro e feita a análise de iluminação da sala em três horários específicos durante o mês de janeiro: às 6h, 15h e 19h.

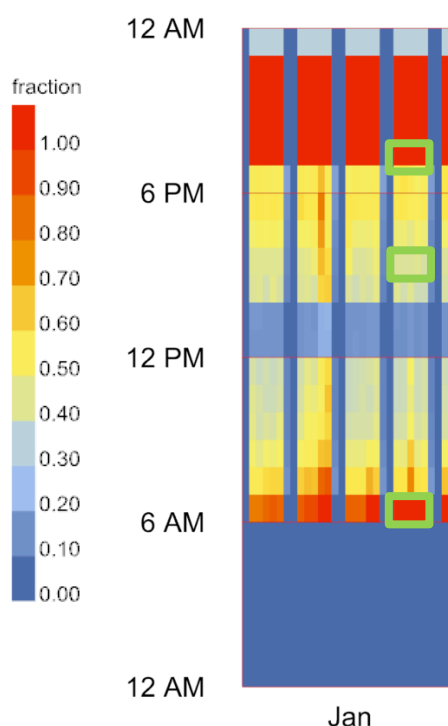


FIGURA 11 – Distribuição média luminosa (lux) do modelo original
Fonte: O Autor (2024).

Essa escolha permitiu avaliar a variação de iluminação natural ao longo do dia, considerando períodos de baixa incidência solar (manhã e início da noite) e de pico (meio da tarde). Para simular essas condições, foi utilizado um modelo de céu virtual padronizado, modelo “intermediário com sol”, que recria as condições de iluminação baseadas em normativas internacionais, como o CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), proporcionando precisão e representatividade na análise.

As imagens HDR (High Dynamic Range) foram geradas em perspectiva, permitindo uma visualização detalhada da distribuição da luz dentro da sala. Essa técnica é amplamente utilizada em simulações de iluminação para capturar uma ampla gama de valores de iluminação, desde áreas de alta exposição até regiões mais sombreadas. Para interpretar os resultados, as imagens foram processadas com um mapeamento de cores falso (false color), destacando as intensidades de iluminação em uma escala de lux. Essa abordagem facilita a identificação de regiões críticas e auxilia na avaliação do conforto visual dentro do ambiente.

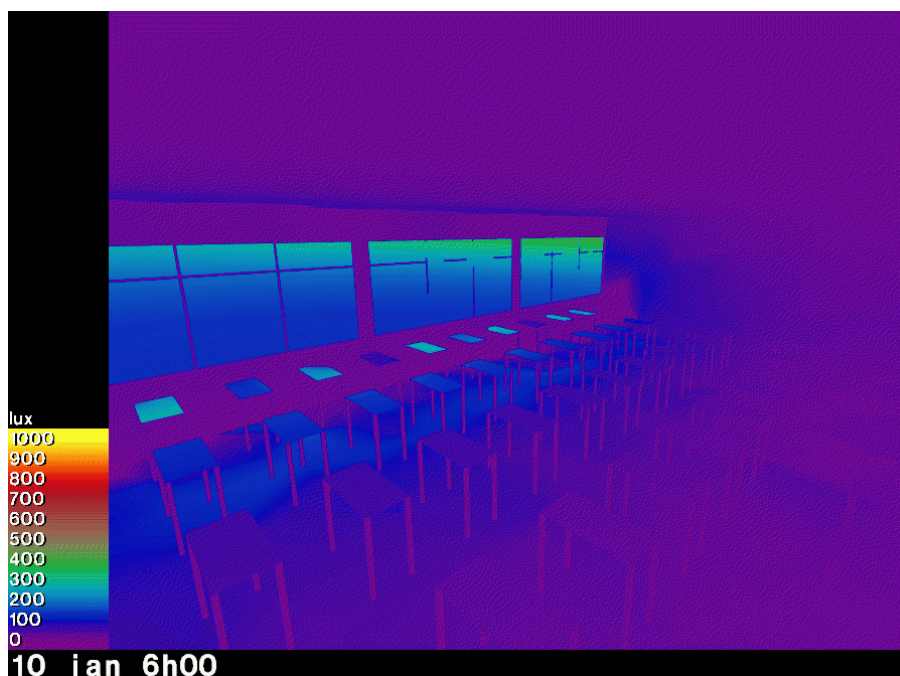


FIGURA 12 – Imagem HDR entre 6h e 7h da manhã do modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

No período da manhã (entre 6h e 7h), a simulação indicou níveis de iluminação mais baixos, com valores médios abaixo de 300 lux, concentrados próximos às janelas.

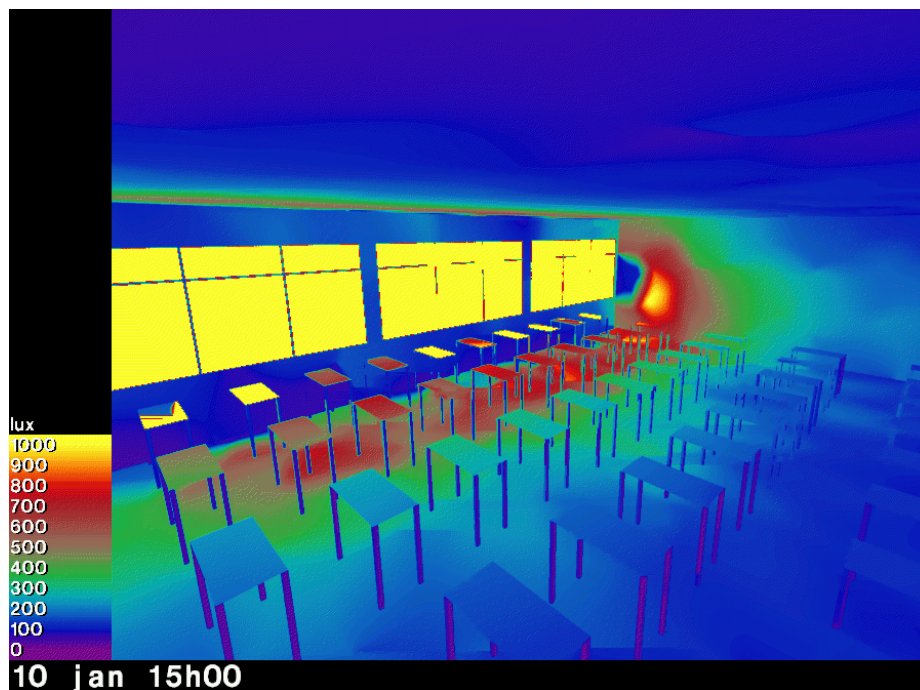


FIGURA 13 – Imagem HDR entre 15h e 16h do modelo existente
Fonte: O Autor (2024).

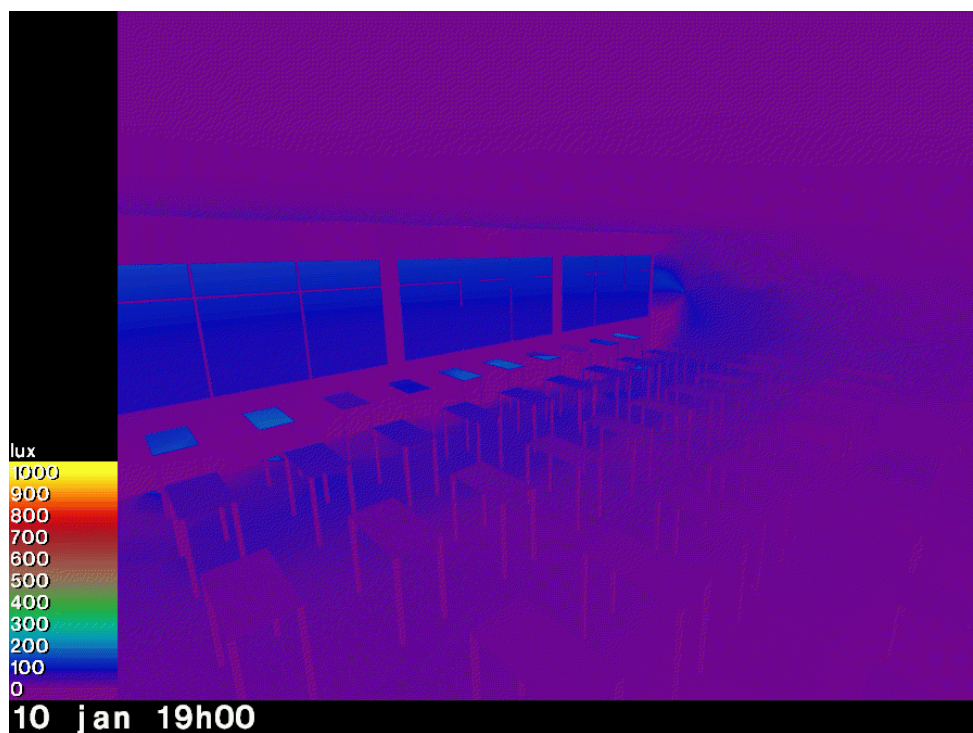


FIGURA 14 – Imagem HDR as 19h do modelo existente
Fonte: O Autor (2024).

Entre 15h e 16h, no pico de iluminação, a sala apresentou ampla distribuição de luz natural, com valores ultrapassando 900 lux em áreas próximas às janelas, atendendo e superando os requisitos normativos

À noite (19h), a iluminação natural é praticamente inexistente.

4.3.6. Análise de carga térmica de pico do modelo existente

A análise de cargas térmicas de pico, apresentada na figura 14, foi realizada utilizando uma metodologia que emprega o motor de simulação EnergyPlus. Este tipo de simulação depende diretamente do arquivo climático EPW (EnergyPlus Weather File) para gerar os dados climáticos necessários, incluindo o arquivo DDY (Design Day File), que define os dias representativos para condições extremas de aquecimento e resfriamento. Esses dias são usados para calcular as cargas térmicas máximas e determinar os requisitos de dimensionamento dos sistemas HVAC.

4.3.6.1. Funcionamento do cálculo de carga térmica de pico

O cálculo de cargas de pico considera o balanço térmico do edifício, analisando os principais fatores que contribuem para o ganho ou perda de calor em um dia de projeto extremo. Para resfriamento, o objetivo é identificar a capacidade máxima necessária para manter o conforto térmico, levando em conta elementos como radiação solar, iluminação, ocupação, equipamentos elétricos, infiltração e condução térmica através das superfícies do edifício. Este método permite determinar as condições críticas em que o sistema AVAC (Aquecimento, ventilação e ar condicionado) deve operar, garantindo um dimensionamento eficiente.

A figura 14 apresentada demonstra especificamente o balanço térmico para o resfriamento de pico, destacando como cada elemento impacta o desempenho energético do edifício ao longo de um dia típico de projeto.

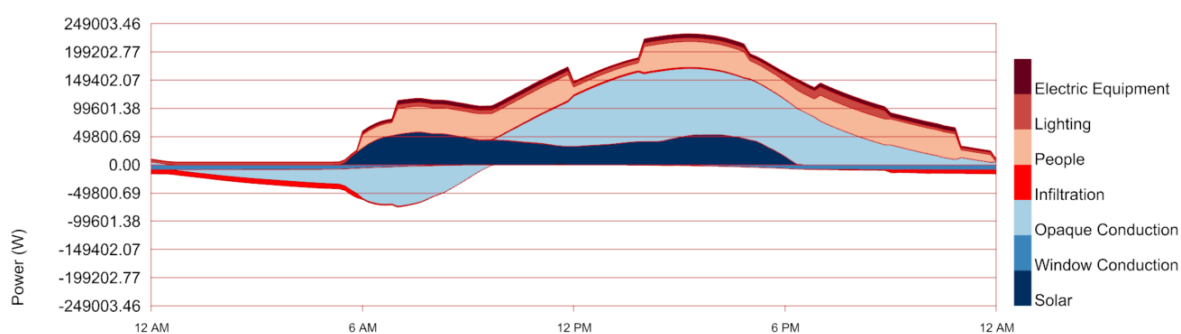


FIGURA 15 – Carga térmica do modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

O gráfico é segmentado em diferentes camadas de carga térmica, cada uma representando uma fonte específica de calor:

- **Equipamentos Elétricos:** Indicados em tons escuros, mostram o impacto significativo do funcionamento de dispositivos elétricos durante o dia, especialmente em horários de maior atividade.
- **Iluminação Artificial:** Representada em tons de laranja, contribui diretamente para o ganho térmico interno.
- **Ocupação:** Demonstrada em bege, evidencia o calor gerado pelos ocupantes, essencialmente em horários de maior ocupação, adicionando carga sensível e latente.
- **Infiltração de Ar:** Representada em vermelho fino, destaca o impacto da troca de ar não controlada com o ambiente externo.
- **Condução Opaca e de Janelas:** Em tons de azul, refletem as trocas térmicas pelas superfícies do edifício, influenciadas pela diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo, assim como pela radiação solar.
- **Radiação Solar Direta:** Na base do gráfico, mostra o ganho de calor solar ao longo do dia, sendo mais evidente durante o período diurno.

A carga de pico para resfriamento foi registrada como 166.890,00 kW (570.564,10 BTU/h), ocorrendo durante o período da tarde. Isso é atribuído à combinação de radiação solar, ocupação e operação de equipamentos.

Aquecimento de pico registrou um valor de 203.963,41 kW (697,310.80 BTU/h), observado durante as horas noturnas e matutinas, quando as perdas térmicas para o ambiente externo são mais significativas.

4.3.7. Análise de consumo de energia modelo existente

A análise do consumo elétrico anual do edifício existente foi realizada utilizando um método de cálculo baseado em balanço energético detalhado, empregando o motor de simulação EnergyPlus integrado. Este método considera todas as variáveis envolvidas no desempenho energético do edifício, desde a iluminação, aquecimento e resfriamento até o uso de equipamentos elétricos, resultando no gráfico apresentado na Figura 15.

Para os cálculos de consumo do sistema de ar condicionado foi considerado o equipamento do tipo VRF. Os sistemas VRF (Variable Refrigerant Flow) são

amplamente reconhecidos por sua alta eficiência em controle térmico. Essa tecnologia adapta o fluxo de refrigerante em tempo real, ajustando a capacidade do sistema de acordo com a carga térmica do ambiente. Isso resulta em:

- **Redução do Consumo Energético:** O sistema opera predominantemente em cargas parciais, onde o COP é mais elevado, diminuindo o consumo geral de energia elétrica.
- **Conforto Personalizado:** Permite controlar zonas individuais com diferentes requisitos térmicos.

Os equipamentos VRF (Volume de Refrigerante Variável) foram modelados com um COP de 4.0, representando uma média dos valores dos equipamentos disponíveis no mercado. O COP é definido como a razão entre a energia térmica gerada (em kW) e a energia elétrica consumida (em kW), expressa pela fórmula:

$$COP = \frac{\text{Energia Elétrica Consumida (kW)}}{\text{Energia Térmica Gerada (kW)}} \quad (4.1)$$

Essa métrica reflete a eficiência do equipamento em converter energia elétrica em energia térmica, sendo que valores mais altos de COP indicam maior eficiência. Durante o cálculo, o COP foi aplicado às cargas de aquecimento e resfriamento para ajustar o consumo elétrico total. Esse ajuste considera as condições climáticas do arquivo climático (EPW), que fornece as informações necessárias para calcular os dados horários de carga máxima (DDY), e também reflete as variações de eficiência do sistema ao longo do ano.

A ferramenta calcula o consumo anual com base na intensidade energética mensal, como mostrado na Figura 15. Cada barra do gráfico representa a energia consumida mensalmente por cada sistema.

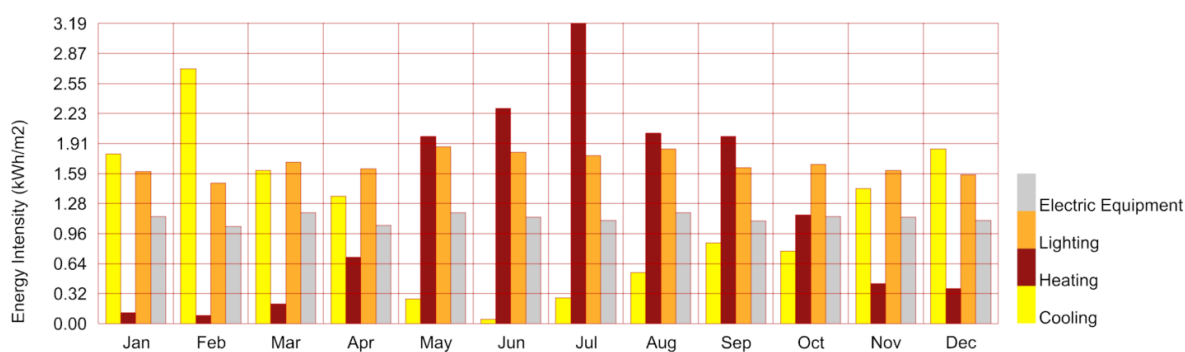


FIGURA 16 – Consumo de energia do modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

O consumo total de energia do edifício foi calculado como a soma dos subsistemas, considerando a eficiência energética de cada um.

Heating (Aquecimento):

Consumo Anual: 31.091,61 kWh

Intensidade Energética: 13,53 kWh/m²

Cooling (Resfriamento):

Consumo Anual: 28.914,40 kWh

Intensidade Energética: 13,53 kWh/m²

Electric Equipment (Equipamentos Elétricos):

Consumo Anual: 28.699,25 kWh

Intensidade Energética: 13,43 kWh/m²

Lighting (Iluminação):

Consumo Anual: 59.351 kWh

Intensidade Energética: 26,30 kWh/m²

4.4. Modelo com a inserção de brises

4.4.1. Análise de temperatura operativa do modelo com brises

A análise do modelo com brises apresenta uma significativa redução nas temperaturas máximas ao longo do dia, conforme o heatmap na figura 16 ilustra. A implementação de brises resultou em temperaturas mais homogêneas, evidenciando o controle da incidência solar direta nos ambientes. A temperatura média máxima dos ambientes foi reduzida, proporcionando maior conforto térmico em períodos de alta radiação solar. Essa estratégia também minimiza picos de calor, essencial para a eficiência do sistema de climatização.

O mapa de temperatura operativa no térreo, conforme mostra a figura 17, demonstra que a utilização de brises contribuiu para uma maior estabilidade térmica nos ambientes. A maior parte dos espaços operou dentro de faixas adequadas de conforto. Seguindo os mesmos resultados positivos do térreo, no subsolo, os brises tiveram impacto considerável na média de temperatura, dada a natureza protegida

deste pavimento em relação à incidência solar direta. As temperaturas operativas permanecem predominantemente estáveis.

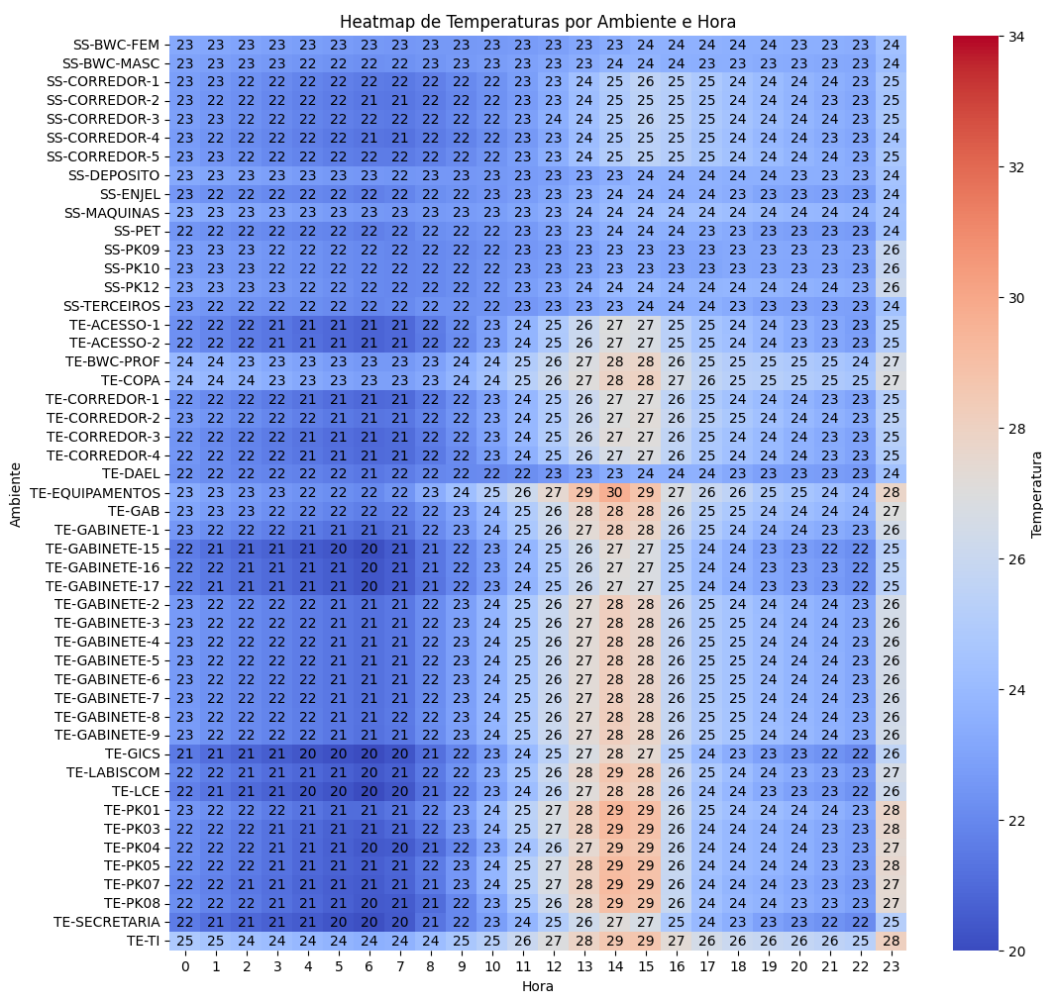


FIGURA 17 – Heatmap do modelo com brises

Fonte: O Autor (2024).

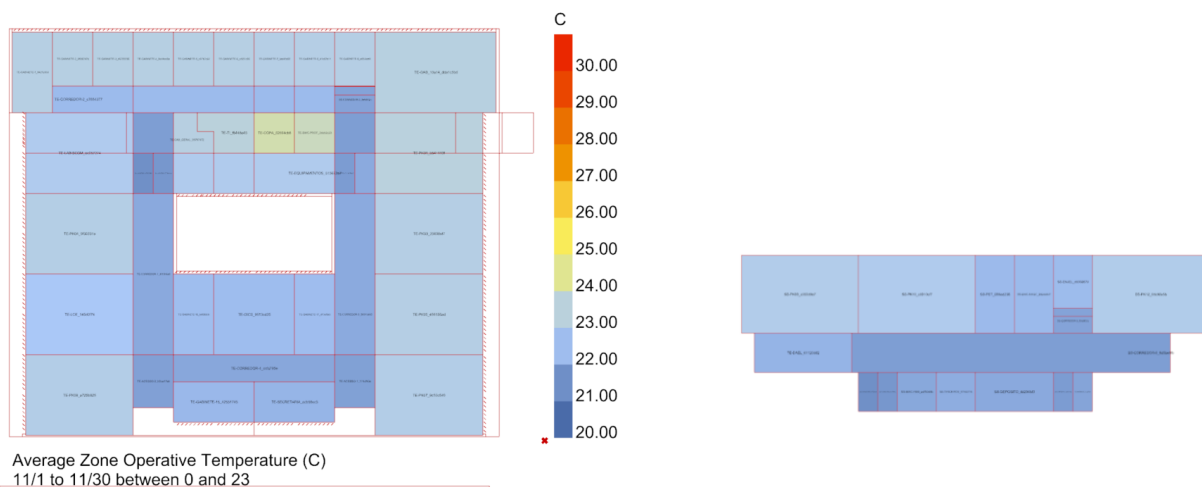
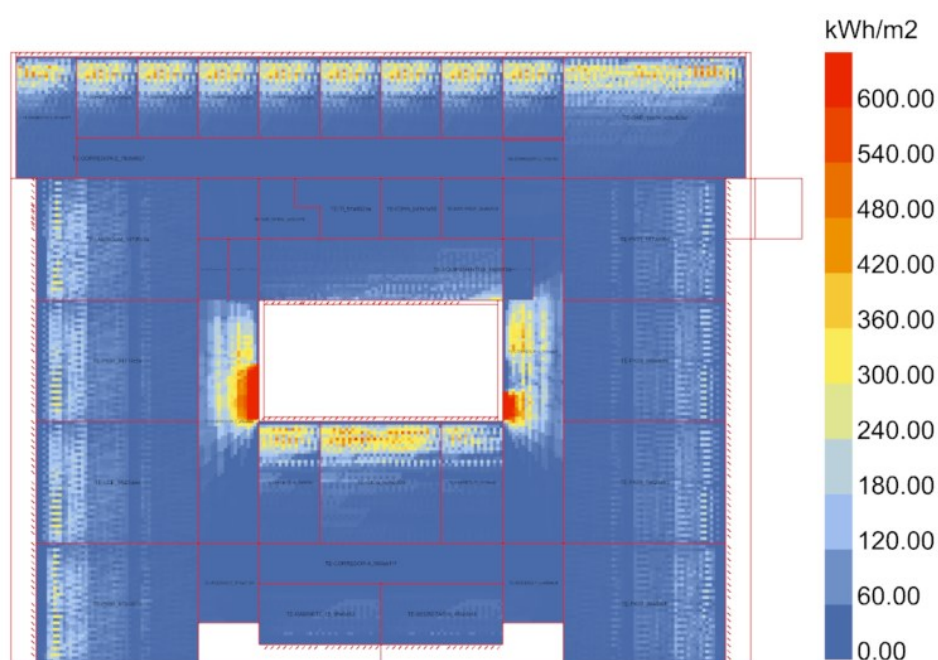


FIGURA 18 – Temperatura operativa do modelo com brises

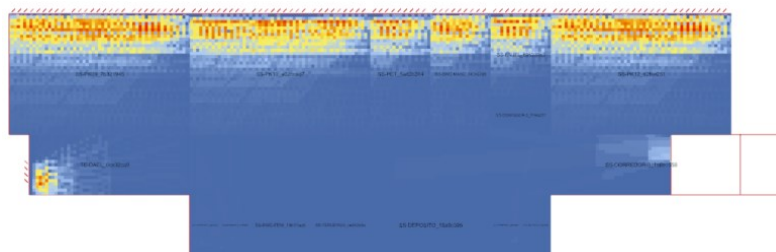
Fonte: O Autor (2024).

4.4.2. Análise de radiação e iluminação natural do modelo com brises

A implementação dos brises no modelo analisado trouxe benefícios expressivos na redução da radiação térmica incidente no edifício. Conforme apresentado na Figura 18, a radiação solar térmica acumulada caiu para 97.609,21 kWh, representando uma diminuição significativa em relação ao modelo original, que contabilizava 175.592,49 kWh. Essa redução está diretamente relacionada à função dos brises como bloqueadores da radiação direta, protegendo as fachadas mais expostas e minimizando o ganho térmico interno, o que impacta positivamente na carga térmica de resfriamento.



Planta de Radiação Incidente do Térreo

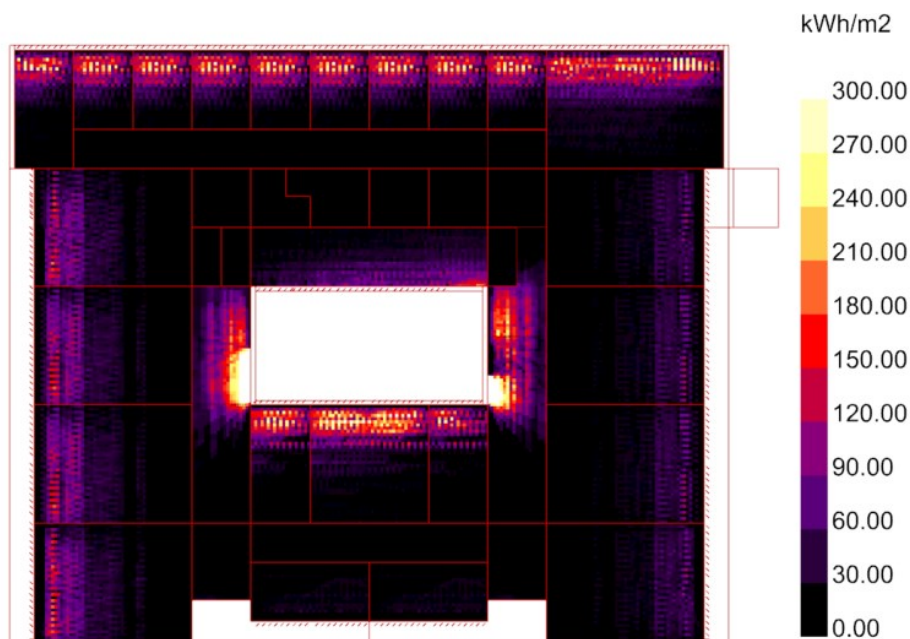


Planta de Radiação Incidente do Térreo

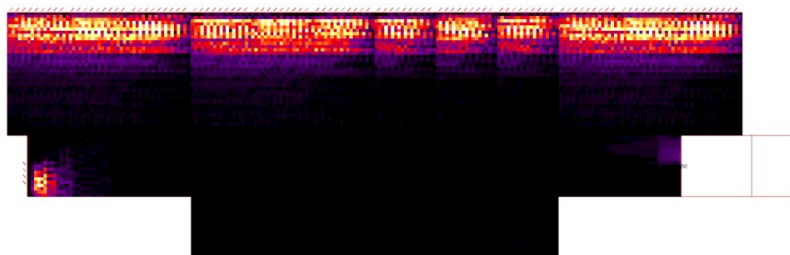
FIGURA 19 – Radiação incidente do modelo com brises

Fonte: O Autor (2024).

Por outro lado, a radiação visível sofreu uma queda proporcional, conforme ilustrado na Figura 19. A radiação total com potencial de aproveitamento para iluminação natural reduziu de 110.045,53 kWh no modelo original para 59.773,43 kWh no modelo com brises. Essa redução impactou diretamente os níveis de iluminação natural dentro dos ambientes, comprometendo a capacidade de atender aos níveis normativos de 300 a 500 lux necessários para leitura e escrita, conforme a NBR ISO/CIE 8995-1.



Planta de Radiação Incidente Visível do Térreo

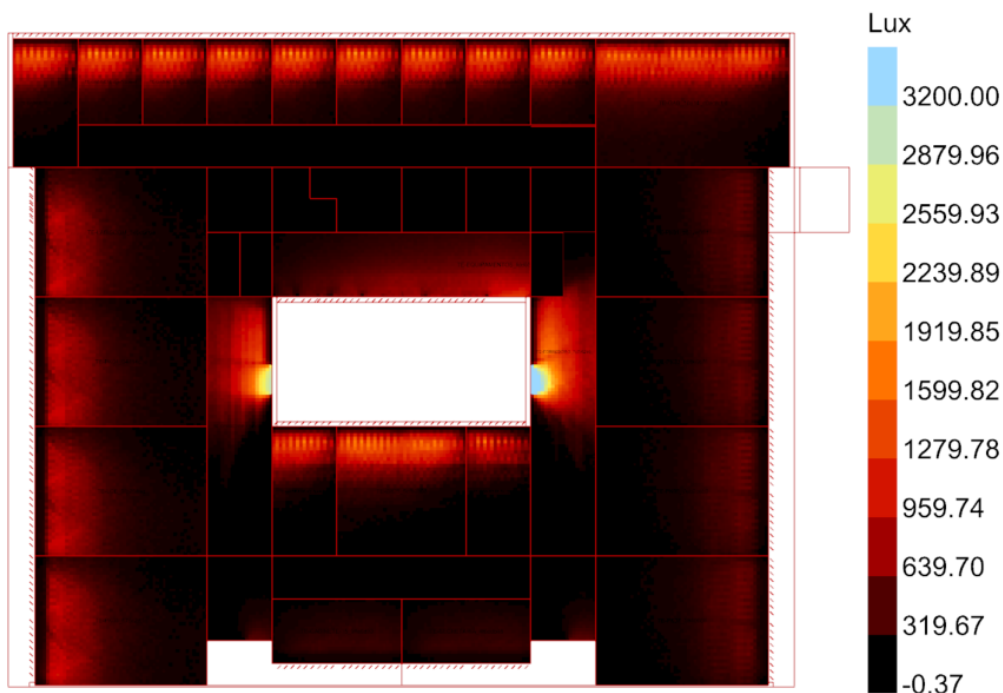


Planta Radiação Incidente Visível do Subsolo

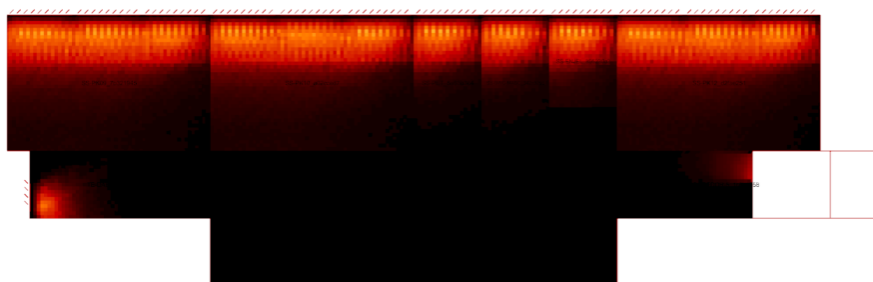
FIGURA 20 – Radiação visível do modelo com brises

Fonte: O Autor (2024).

Os níveis de lux médios nos ambientes com brises, conforme representados na Figura 20, reforçam a necessidade de complementação por iluminação artificial. O consumo anual de energia para iluminação aumentou para 63.570 kWh (29,75 kWh/m²) sem a utilização de sistemas de dimerização. Contudo, a aplicação de dimerização automatizada, adaptando a intensidade luminosa às condições reais de iluminação natural, reduziu o consumo para 44.226 kWh (21,93 kWh/m²), com uma eficiência energética de 26,29%.



Planta de distribuição média luminosa do térreo



Planta de distribuição média luminosa do subsolo

FIGURA 21 – Distribuição média luminosa (lux) do modelo com brises

Fonte: O Autor (2024).

A análise realizada no modelo com brises também incluiu a avaliação do controle de dimerização das salas, apresentado na Figura 21. Observa-se que a necessidade de complementar a iluminação com luz artificial é mais expressiva

durante os períodos matutinos e finais da tarde, quando a radiação solar visível é insuficiente para atender às normas de iluminação interna

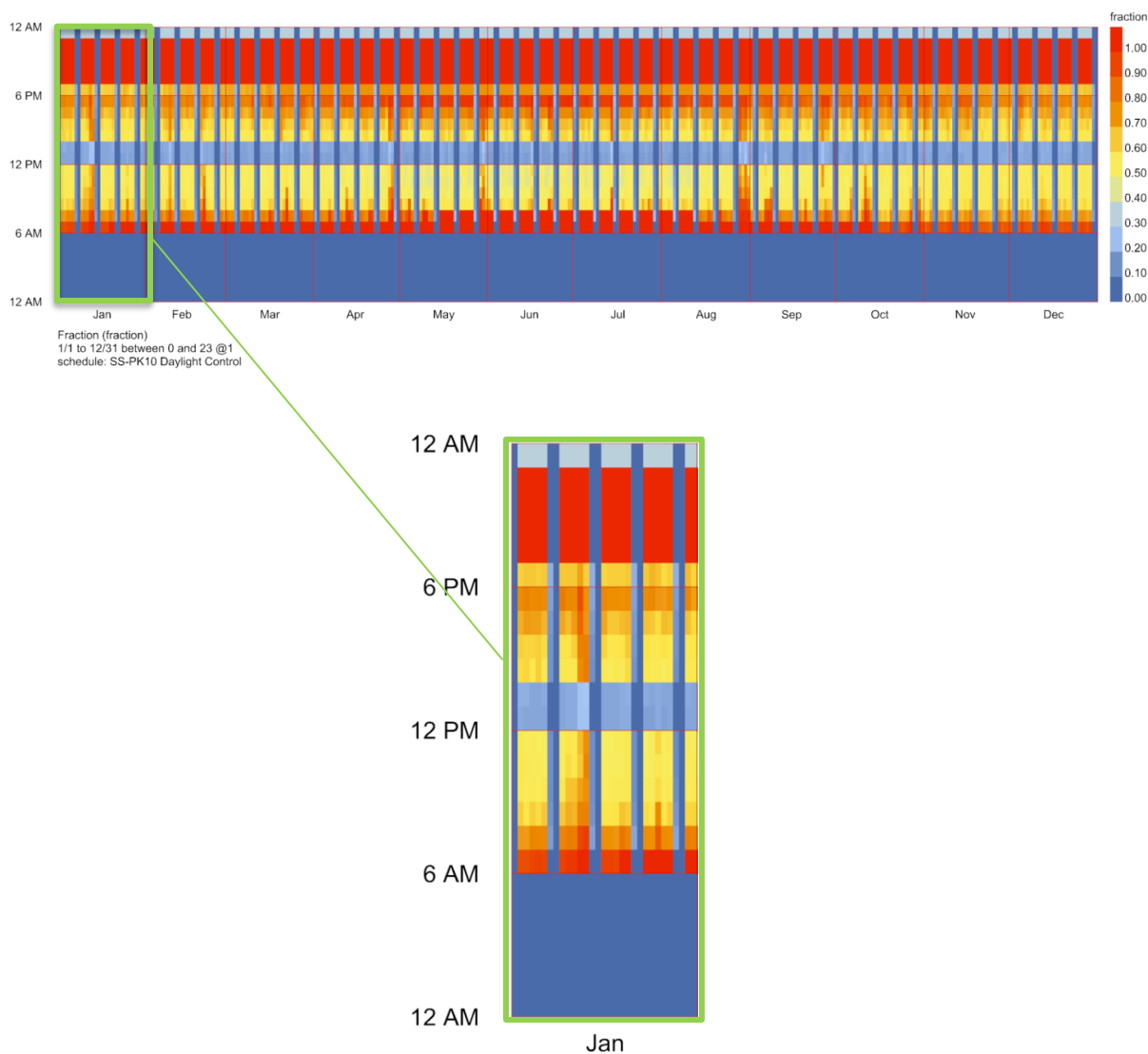


FIGURA 22 – Fração de dimerização mensal do modelo com brise

Fonte: O Autor (2024).

Com base na análise realizada na sala modelo PK10, as imagens HDR e o gráfico de fração de dimerização para o mês de janeiro destacam as implicações do uso dos brises no controle da iluminação natural. A figura 21 apresenta o gráfico de do dia. Já as figuras 22, 23 e 24 exibem as imagens HDR representando a distribuição fração de dimerização, que indica a variação da necessidade de luz artificial ao longo de iluminância entre 6h e 7h, 15h e 19h, respectivamente.

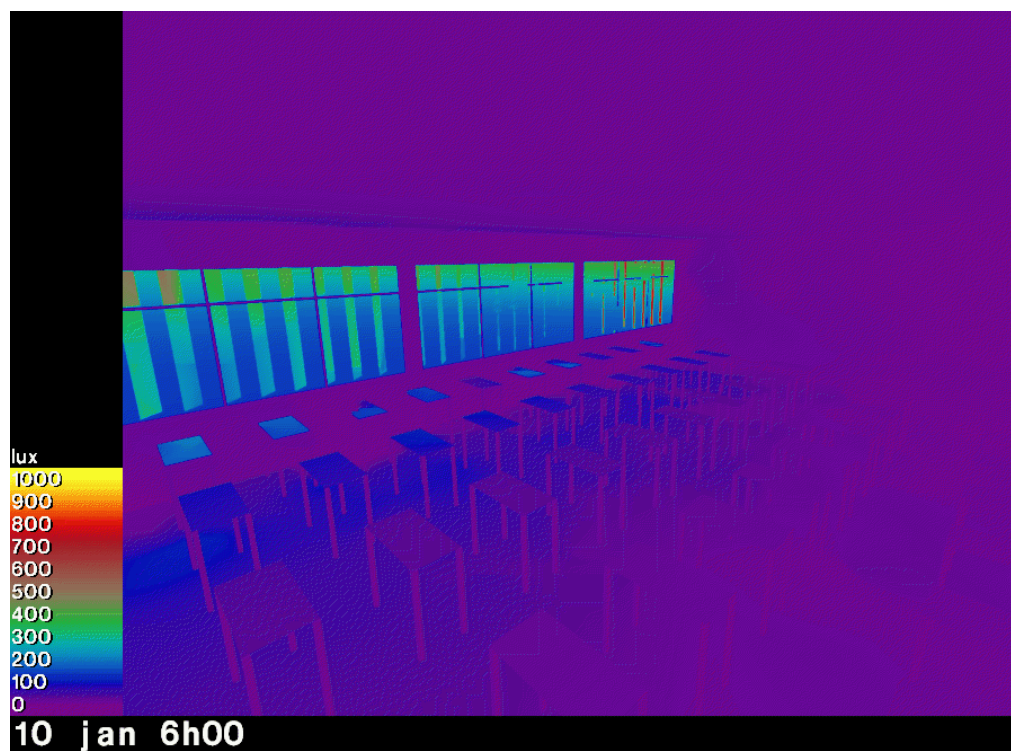


FIGURA 23 – Imagem HDR entre 6h e 7h da manhã do modelo existente
Fonte: O Autor (2024).

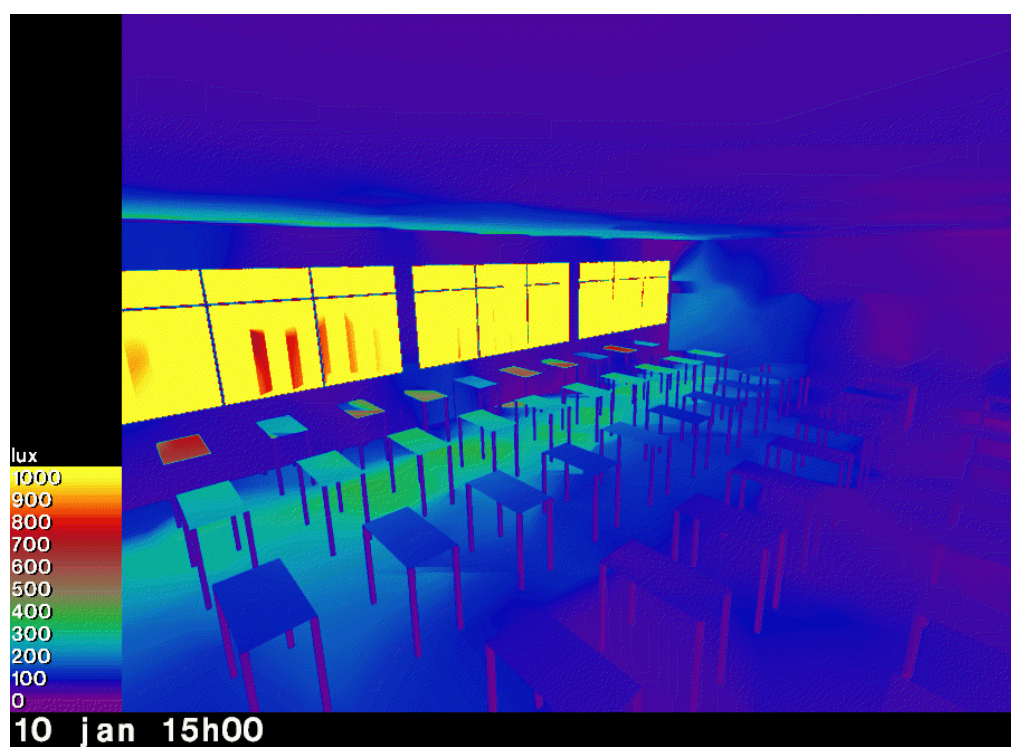


FIGURA 24 – Imagem HDR entre 15h e 16h do modelo existente
Fonte: O Autor (2024).

A análise indica que, às 6h e às 19h, o nível de iluminância na sala é insuficiente, exigindo um nível elevado de dimerização da iluminação artificial, como mostrado pelas altas frações do gráfico (Figura 21). Às 15h, no entanto, ocorre o pico de iluminação natural, reduzindo significativamente a necessidade de luz artificial. Entretanto, observa-se que, com os brises, os níveis de lux atingidos às 15h (Figura 23) são inferiores aos observados no modelo original, evidenciando uma diminuição na capacidade de aproveitamento da iluminação natural.

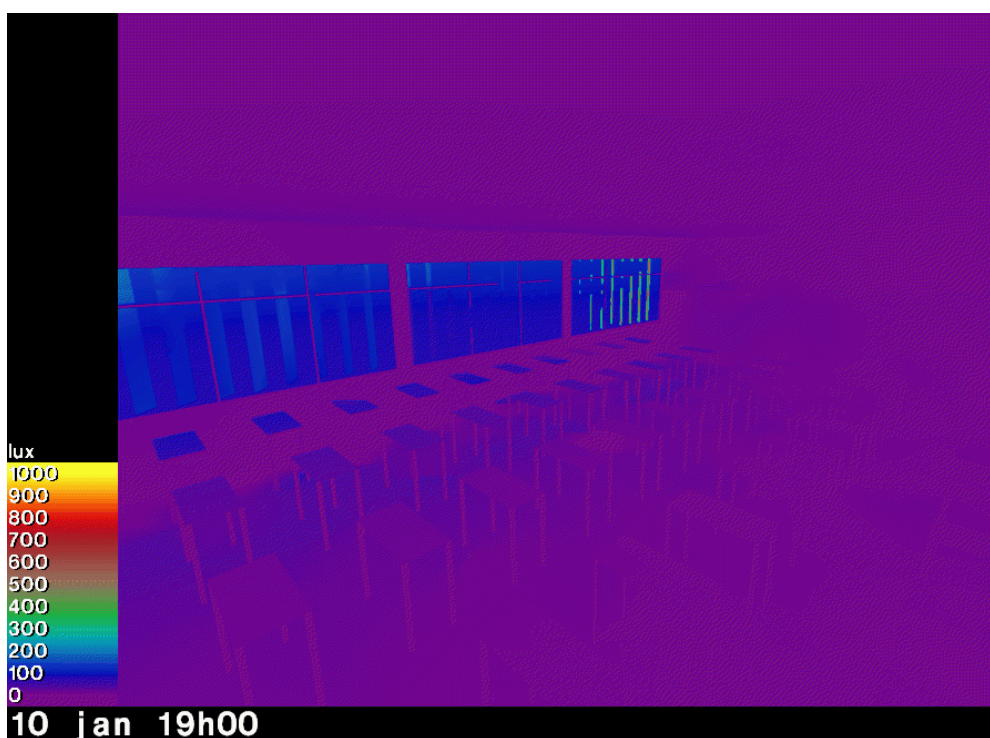


FIGURA 25 – Imagem HDR as 19h do modelo existente
Fonte: O Autor (2024).

Esse comportamento impacta diretamente o consumo energético, já que a redução na transmissão de luz natural aumenta a demanda por iluminação artificial, mesmo durante horários de maior insolação. Assim, enquanto os brises contribuem para melhorar o conforto térmico ao minimizar os ganhos solares diretos, há uma penalização na eficiência energética global devido à necessidade ampliada de iluminação artificial.

4.4.3. Análise de carga térmica e consume energético do modelo com Brises

A análise do modelo com brise revela um impacto significativo tanto na carga térmica quanto no consumo energético do edifício. O gráfico de balanço de carga térmica (Figura 25) indica que a adição dos brises resultou em uma leve redução no resfriamento de pico, que passou de 166.890 kW no modelo original para 158.932,30 kW. Essa redução é atribuída à diminuição da radiação solar direta incidente, evidenciada também nos mapas de radiação térmica apresentados anteriormente (Figura 18).

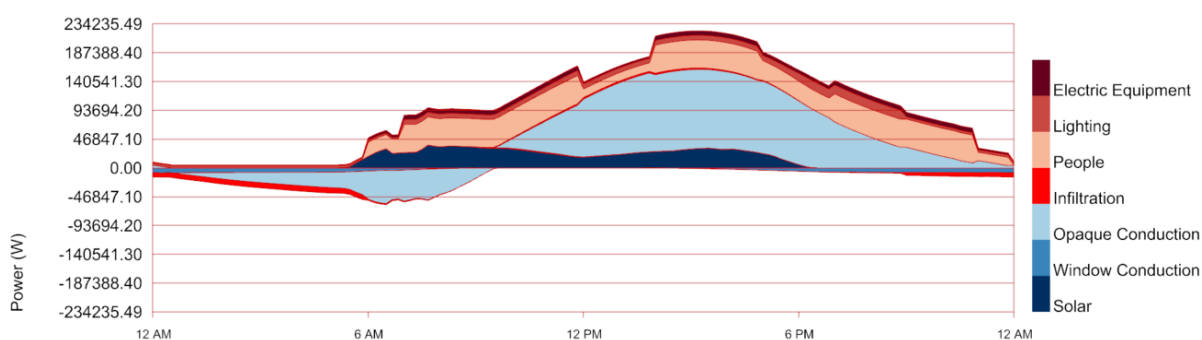


FIGURA 26 – Carga térmica do modelo com brises

Fonte: O Autor (2024).

No entanto, a carga de aquecimento de pico permaneceu praticamente inalterada, reduzindo-se de 203.963,41 kW para 203.201,95 kW, o que demonstra que os brises têm um impacto limitado no isolamento térmico durante os períodos mais frios. Essa diferença mínima indica que a presença dos brises não contribuiu significativamente para a redução da demanda de aquecimento. Isso é uma limitação importante, já que o objetivo ideal seria equilibrar a redução na carga de resfriamento com alguma melhoria ou, pelo menos, manutenção mais eficiente da carga de aquecimento.

A falta de impacto na carga de aquecimento pode ser atribuída ao fato de que os brises bloqueiam a radiação solar direta, que poderia ser utilizada como aquecimento passivo nos meses mais frios. Isso significa que, enquanto os brises são altamente eficientes para controlar o superaquecimento no verão, eles não proporcionam benefícios substanciais durante o inverno, quando a radiação solar direta seria desejável para compensar a necessidade de aquecimento artificial.

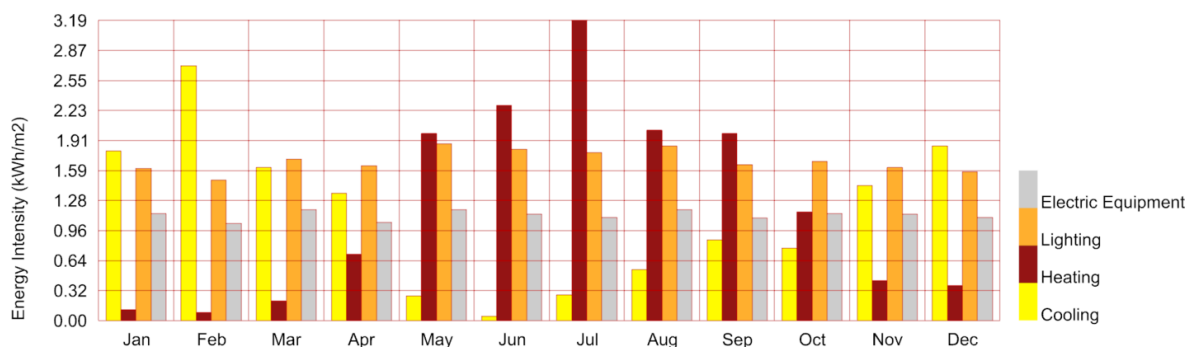


FIGURA 27 – Consumo de energia do modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

Segue o resumo de consumo energético para o modelo com brises:

Heating (Aquecimento):

Consumo Anual: 32.613,86 kWh

Intensidade Energética: 15,30 kWh/m²

Cooling (Resfriamento):

Consumo Anual: 27.098,70 kWh

Intensidade Energética: 12,68 kWh/m²

Electric Equipment (Equipamentos Elétricos):

Consumo Anual: 28.699,25 kWh

Intensidade Energética: 13,43 kWh/m²

Lighting (Iluminação):

Consumo Anual: 63.570 kWh

Intensidade Energética: 29,75 kWh/m²

Quanto ao consumo energético anual, a intensidade energética para iluminação aumentou de 26,30 kWh/m² no modelo original para 29,75 kWh/m² no modelo com brises (Figura 26). Isso se deve à redução da iluminação natural, obrigando o maior uso de iluminação artificial. Essa observação está diretamente correlacionada à diminuição da radiação visível apresentada na Figura 19 e à análise de lux, que evidenciou uma menor entrada de luz natural em horários críticos, como

demonstrado pelas imagens HDR. Por outro lado, o consumo energético para resfriamento apresentou uma leve redução, passando de 13,53 kWh/m² para 12,68 kWh/m², confirmando o efeito benéfico dos brises na mitigação do ganho de calor solar.

Embora a presença dos brises tenha contribuído para uma redução significativa na radiação térmica incidente e, conseqüentemente, na carga de resfriamento, a iluminação natural foi prejudicada de forma substancial, como demonstrado pela diminuição da radiação visível e da média de lux nas salas. O uso de brises, embora efetivo para o controle de cargas térmicas no verão, apresenta limitações significativas para um desempenho global eficiente. A redução no consumo de energia para resfriamento é compensada negativamente pela maior dependência de iluminação artificial e pela ausência de impacto relevante na carga de aquecimento. Isso demonstra que, para alcançar um desempenho energético mais equilibrado e eficiente, estratégias de sombreamento adaptativas ou soluções integradas que considerem a iluminação natural e a carga térmica ao longo do ano são indispensáveis.

4.5. Modelo eficiente com vidro de controle solar e telha com isolamento

Com base na análise realizada no modelo com brise, observou-se que, apesar de uma leve redução nas cargas térmicas de resfriamento, os resultados não foram suficientemente positivos devido ao aumento do consumo energético relacionado à iluminação artificial. Esse desempenho indicou que a estratégia de sombreamento externo não foi capaz de equilibrar de forma eficaz as necessidades térmicas e lumínicas do edifício.

Dessa forma, foi necessário implementar um modelo mais eficiente, que utilizasse materiais de alto desempenho para melhorar tanto o isolamento térmico quanto o controle da radiação solar. A estratégia adotada combinou vidros de controle solar, que reduzem significativamente os ganhos de calor solar, e telhas sanduíche com núcleo isolante de poliuretano, que oferecem excelente resistência térmica na cobertura. Esses materiais foram selecionados para equilibrar a redução das cargas térmicas e otimizar o aproveitamento de luz natural, minimizando o impacto no consumo de iluminação artificial. O modelo eficiente foi aprimorado com a utilização de soluções construtivas de alta performance, visando a melhoria do comportamento térmico e lumínico da edificação. Abaixo as informações dos materiais utilizados:

Vidros de Controle Solar: foi implementado o vidro laminado modelo Silver 32, da fabricante Guardian, que apresenta as seguintes características:

- Fator U: **5,6 W/m²K** (indica alta resistência à transferência de calor);
- Coeficiente de sombreamento: **0,46** (reduz os ganhos de calor solar);
- Transmitância visível: **0,33** (permite a entrada de 33% da luz visível).

Esse vidro é projetado para minimizar os ganhos de calor por radiação solar, contribuindo para a redução das cargas de resfriamento, ao mesmo tempo que limita a entrada de luz natural.

Cobertura com Telha Sanduíche: a cobertura foi substituída por telhas tipo sanduíche com núcleo isolante em poliuretano de 50 mm, que apresentam as seguintes propriedades:

- Condutividade térmica: **0,03 W/mK** (excelente isolamento térmico);
- Densidade: **43 kg/m³**;
- Calor específico: **1210 J/kgK**;
- Absorção de radiação térmica: **0,9**;
- Absorção de radiação solar: **0,7**.

Através destes dados inseridos no EnergyPlus, o cálculo para o Fator U da telha sanduíche foi de **0,532 W/m²K**

A adoção da telha sanduíche melhora significativamente o desempenho térmico da cobertura, reduzindo a transmissão de calor solar para o interior da edificação, o que impacta diretamente na diminuição das cargas de resfriamento.

4.5.1. Análise de temperatura operativa do modelo eficiente

O heat map de temperaturas por ambiente e hora do modelo eficiente, representado na **Figura 27**, demonstra a média das temperaturas internas durante o verão. Observa-se uma maior uniformidade térmica em comparação ao modelo original, com temperaturas estáveis entre 21°C e 24°C. Essa estabilidade é resultado do uso de materiais eficientes, que reduziram significativamente os ganhos de calor por radiação e condução.

Já a **Figura 28**, que apresenta a média anual da temperatura operativa nos ambientes, confirma a eficiência global do modelo ao longo do ano. Comparando com o modelo original, nota-se uma melhoria na uniformidade térmica, especialmente em ambientes críticos como salas de aula, que possuem alta densidade de ocupação.

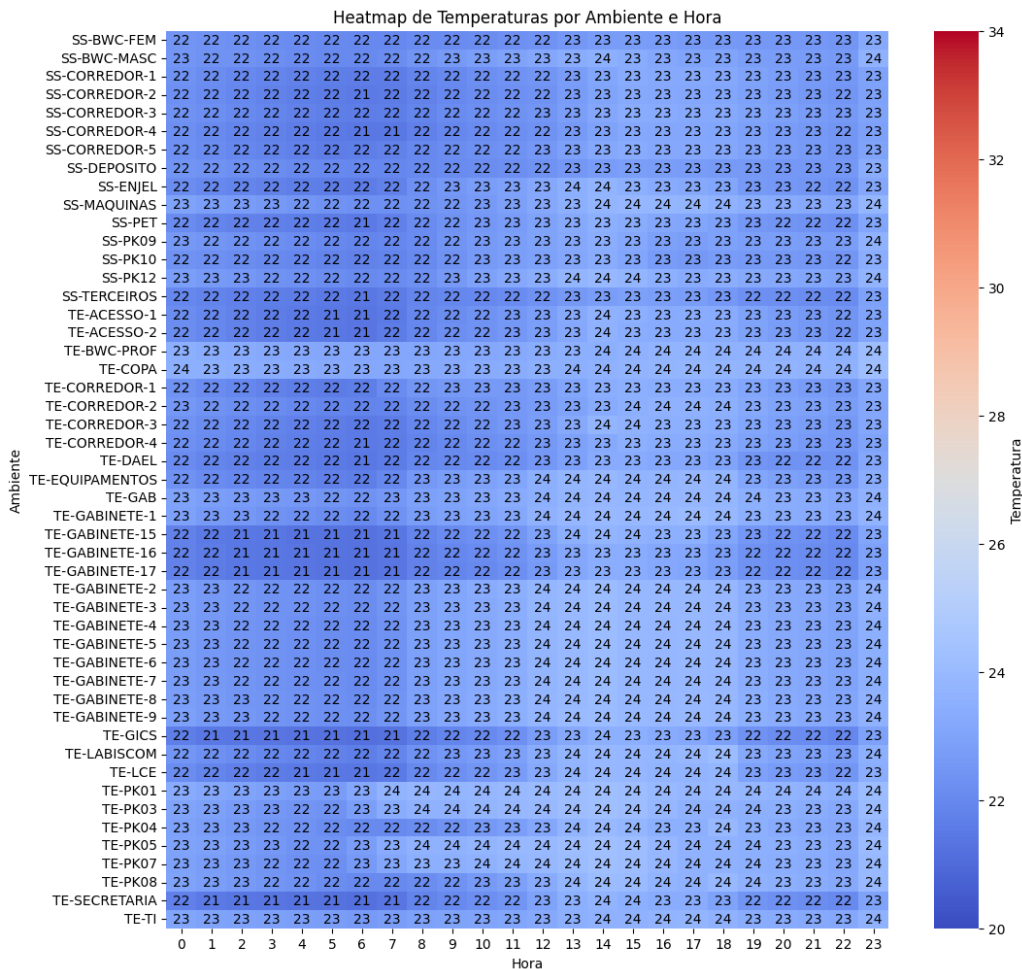


FIGURA 28 – Heatmap do modelo eficiente

Fonte: O Autor (2024).

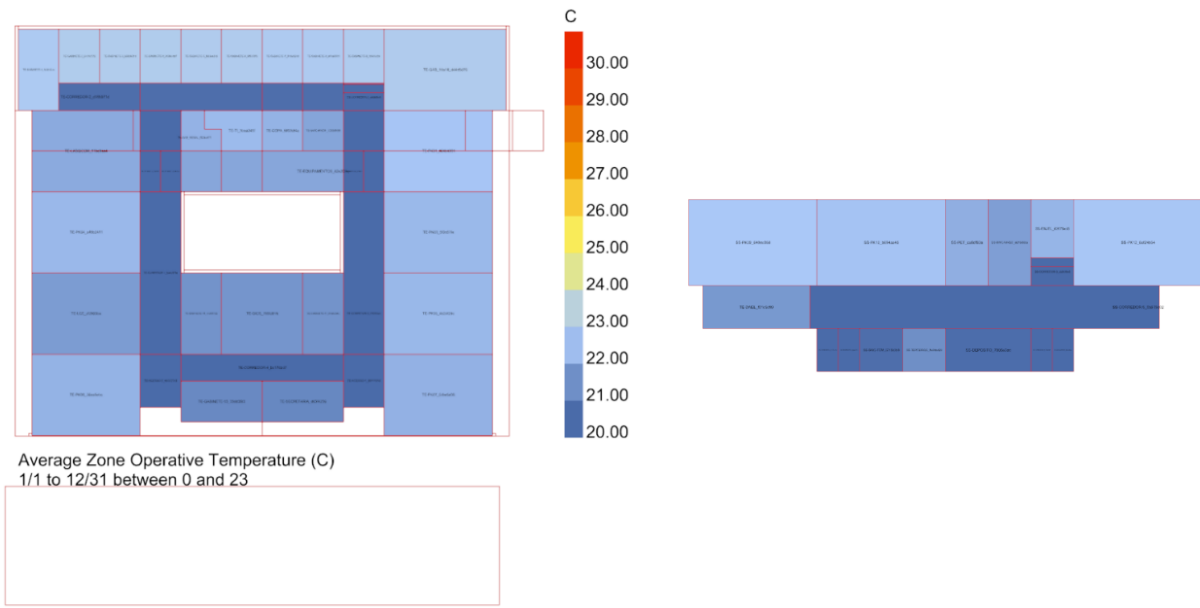


FIGURA 29 – Temperatura operativa do modelo eficiente

Fonte: O Autor (2024).

4.5.2. Análise de materiais empregados no modelo eficiente

4.5.2.1. Cobertura com telha sanduíche comparada à cobertura existente

No modelo eficiente, a análise focou-se no comportamento térmico dos materiais empregados, diferentemente dos modelos com brise e existente, nos quais a radiação direta foi avaliada como um dos principais fatores. Essa mudança de abordagem foi realizada para explorar como os materiais utilizados, como a telha sanduíche com isolamento em poliuretano e os vidros de controle solar, impactam a troca de calor ao longo do ano em comparação com o modelo original.

Em vez de observar a radiação direta no ambiente interno, foi analisada a transferência de calor pela superfície interna do telhado, utilizando a métrica "Surface Inside Face Conduction Heat Transfer Rate" gerada pelo EnergyPlus. Esse método permitiu uma avaliação detalhada do desempenho térmico do telhado e da capacidade dos materiais em reduzir os ganhos ou perdas de calor ao longo do ano.

O mapa de transferência de calor por condução interna para a telha do gabinete 6, apresentado nas Figuras 29 e 30, evidencia uma significativa diferença entre o modelo existente e o modelo eficiente. Para fins de comparação, os valores foram limitados entre 152,73 W e -516,59 W, abrangendo tanto os ganhos quanto as perdas térmicas por condução ao longo do ano.

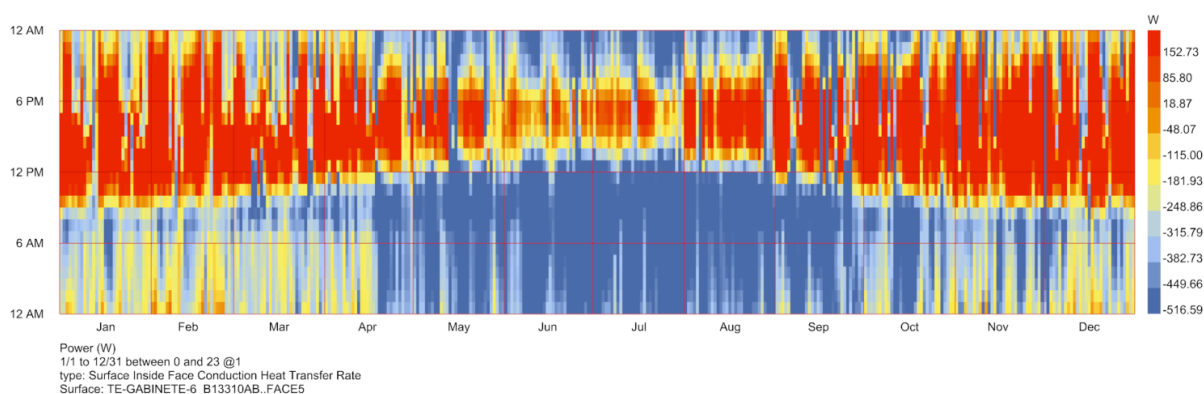


FIGURA 30 – Taxa de transferência de calor na cobertura do gab. 6 para o modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

No modelo existente, o total de transferência de calor é de -1.590.400 W. O gráfico apresenta predominantemente áreas com tons intensos de vermelho, indicando elevados ganhos térmicos durante o dia, especialmente nos meses de maior incidência solar. Durante a noite, observam-se áreas em azul claro e azul

escuro, representando perdas térmicas por condução. A variação de cores ao longo do ano reflete a baixa eficiência térmica do sistema de cobertura, que é incapaz de atenuar de forma consistente as flutuações térmicas.

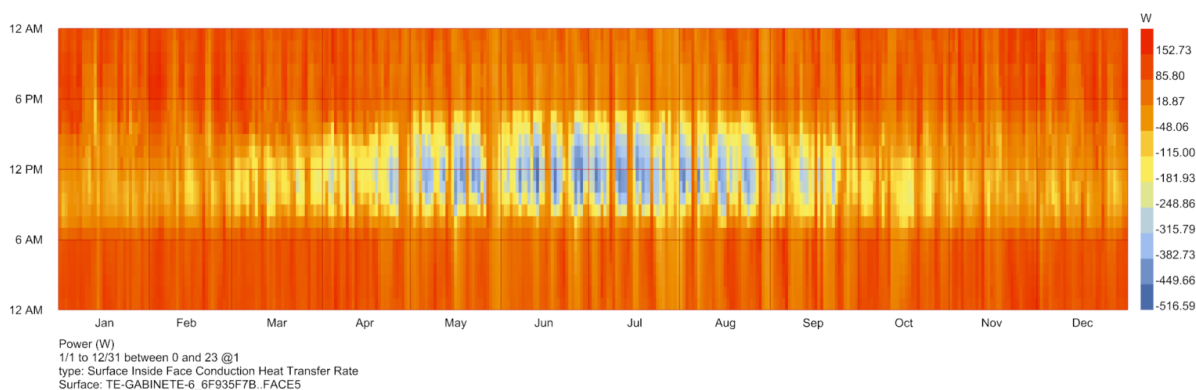


FIGURA 31 – Taxa de transferência de calor na cobertura do gab. 6 para o modelo eficiente

Fonte: O Autor (2024).

Já no modelo eficiente, o total de transferência de calor é drasticamente reduzido para $-174,42$ W, evidenciando a superioridade do isolamento térmico proporcionado pela telha sanduíche. O mapa apresenta tons muito menos intensos de vermelho, indicando uma considerável redução nos ganhos térmicos durante os períodos de maior exposição solar. As áreas em azul, representando perdas térmicas, são uniformes e menos acentuadas, destacando a capacidade do material de manter o equilíbrio térmico ao longo do dia e da noite.

No modelo existente, as cores mais azuladas predominam nos meses frios, especialmente durante a madrugada e as primeiras horas do dia. Isso indica uma perda significativa de calor interno, já que o telhado com menor isolamento térmico facilita a troca de calor entre o ambiente interno e o externo. Essa característica torna o ambiente interno mais suscetível às baixas temperaturas externas, exigindo maior consumo de energia para aquecimento. Já a telha com isolamento consegue manter melhor o calor acumulado no interior do edifício, minimizando a perda térmica durante a noite e os períodos mais frios do dia. Esse comportamento é crucial em climas frios, pois contribui para uma maior estabilidade térmica, reduzindo a necessidade de sistemas de aquecimento para compensar as perdas.

4.5.2.1. Vidro de controle solar comparado ao vidro existente

Os vidros de controle solar empregados no modelo eficiente desempenham um papel fundamental na melhoria do desempenho térmico do edifício, especialmente em relação à redução da carga térmica gerada pela radiação solar incidente. Esses vidros, com um fator U de $5,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ e coeficiente de sombreamento de $0,46$, são projetados para minimizar os ganhos de calor indesejados provenientes da radiação solar direta e difusa, ao mesmo tempo que permitem uma iluminação natural moderada.

Os gráficos apresentados refletem os dados de desempenho térmico de uma janela específica escolhida na sala PK10 para os modelos existente e eficiente, com destaque para o ganho de calor (Figuras 31 e 32) e a perda de calor (Figuras 33 e 34).

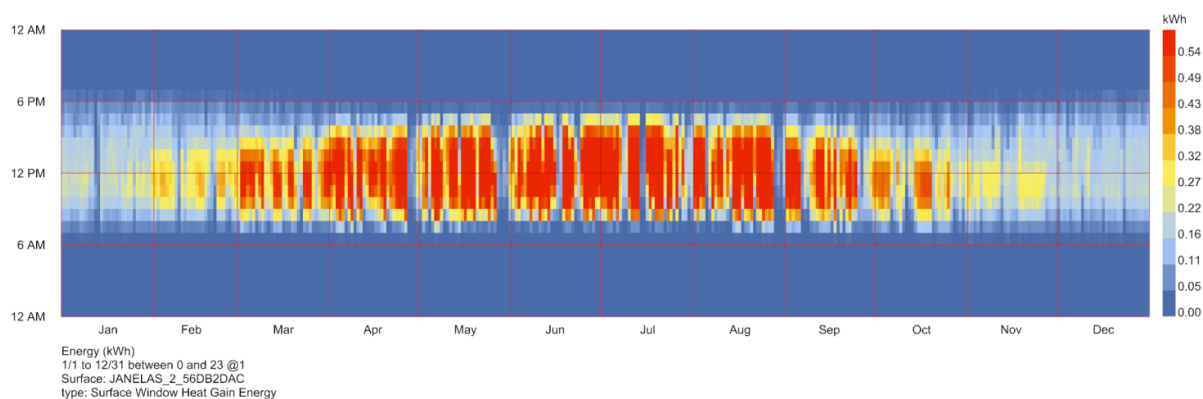


FIGURA 32 – Ganho de calor por uma janela da sala PK10 do modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 31, correspondente ao ganho de calor do modelo existente, é evidente a predominância de tons quentes, como vermelho e laranja, durante os meses de maior insolação (dezembro a março). Essa distribuição indica um ganho térmico elevado, com um total anual de $962,35 \text{ kWh}$ para a janela analisada.

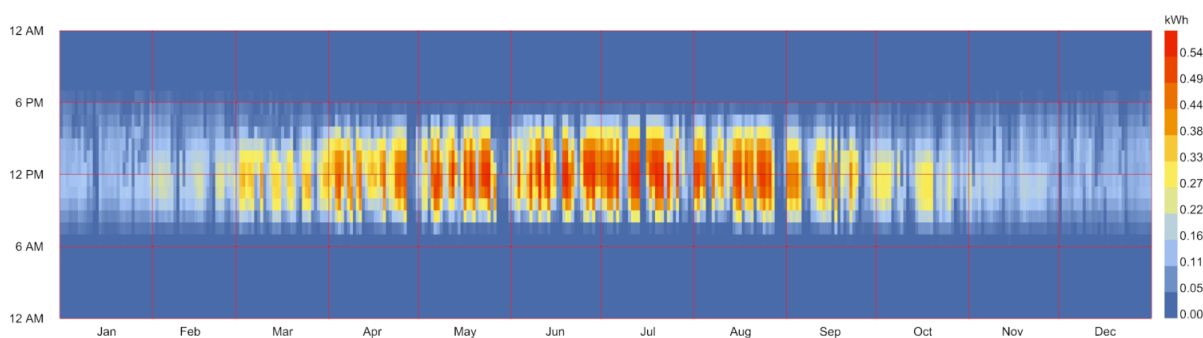


FIGURA 33 – Ganho de calor por uma janela da sala PK10 do modelo eficiente

Fonte: O Autor (2024).

Já a Figura 32, referente ao modelo eficiente, apresenta uma redução significativa nas áreas em tons mais quentes, destacando-se a eficiência do vidro de controle solar em limitar a entrada de radiação solar direta. O ganho de calor anual foi reduzido para 533,76 kWh, o que representa uma redução de 44,5% em relação ao modelo original. Essa redução é particularmente evidente nos meses de verão, onde o controle da radiação solar é crucial para o conforto térmico e a eficiência energética.

Quanto à perda de calor, a Figura 33 apresenta os dados do modelo existente, com tons azulados indicando perdas moderadas ao longo do ano, totalizando 161,30 kWh.

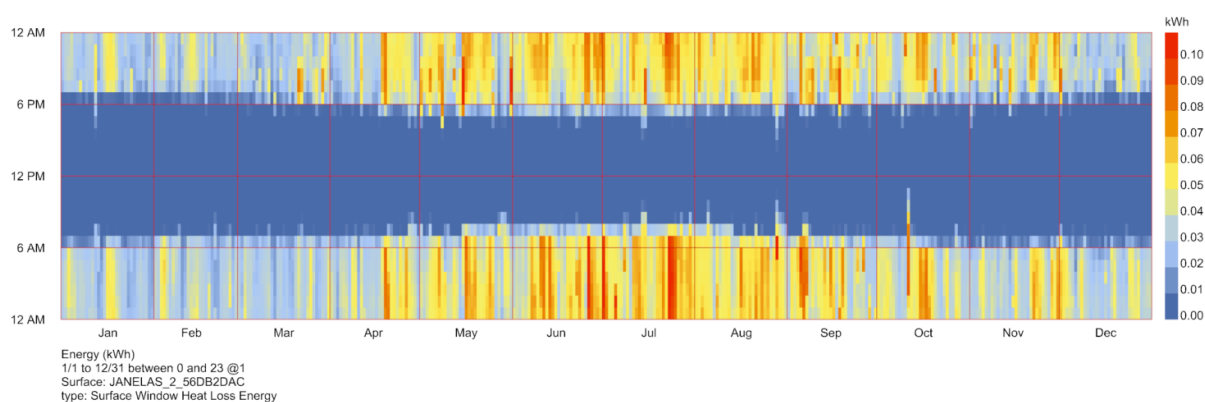


FIGURA 34 – Perda de calor por uma janela da sala PK10 do modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

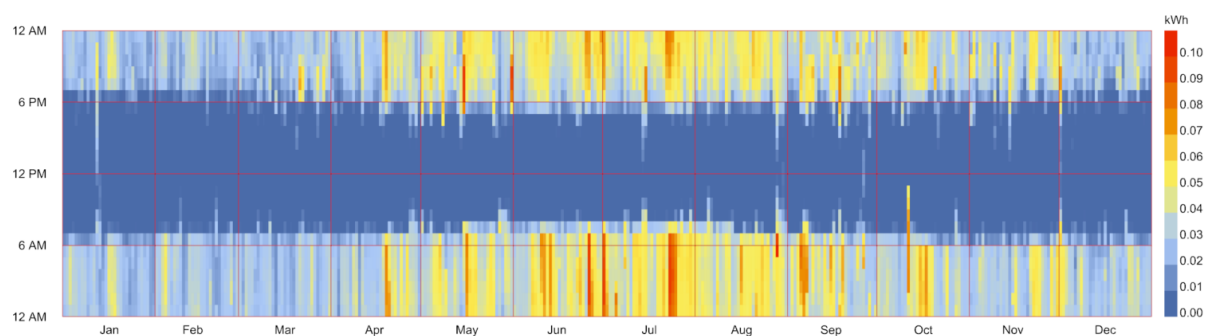


FIGURA 35 – Perda de calor por uma janela da sala PK10 do modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

A Figura 34, que representa o modelo eficiente, observa-se um leve aumento nas áreas azuladas, refletindo uma perda térmica anual de 171,06 kWh, um acréscimo de aproximadamente 6% em relação ao modelo original. Essa diferença pode ser atribuída às propriedades do vidro solar, que, embora eficiente na redução do ganho

de calor, apresenta maior transmissão térmica em comparação a materiais isolantes projetados especificamente para climas frios.

A limitação das escalas nos gráficos para 0 kWh a 0,54 kWh no ganho de calor e para 0 kWh a 0,10 kWh na perda de calor (aplicada em ambas as janelas) permitiu uma visualização padronizada e comparável dos dados. Essa abordagem facilitou a análise detalhada do comportamento térmico dos vidros nos diferentes cenários.

4.5.3. Análise de iluminação natural

No modelo eficiente, a análise da dimerização evidenciada na Figura 35 demonstra um comportamento muito similar ao observado no modelo existente. Isso indica que o vidro de controle solar, apesar de reduzir significativamente o ganho de calor interno, mantém condições adequadas de iluminação natural para o ambiente. Esse comportamento é essencial para evitar o aumento da dependência por iluminação artificial, preservando a eficiência energética global.

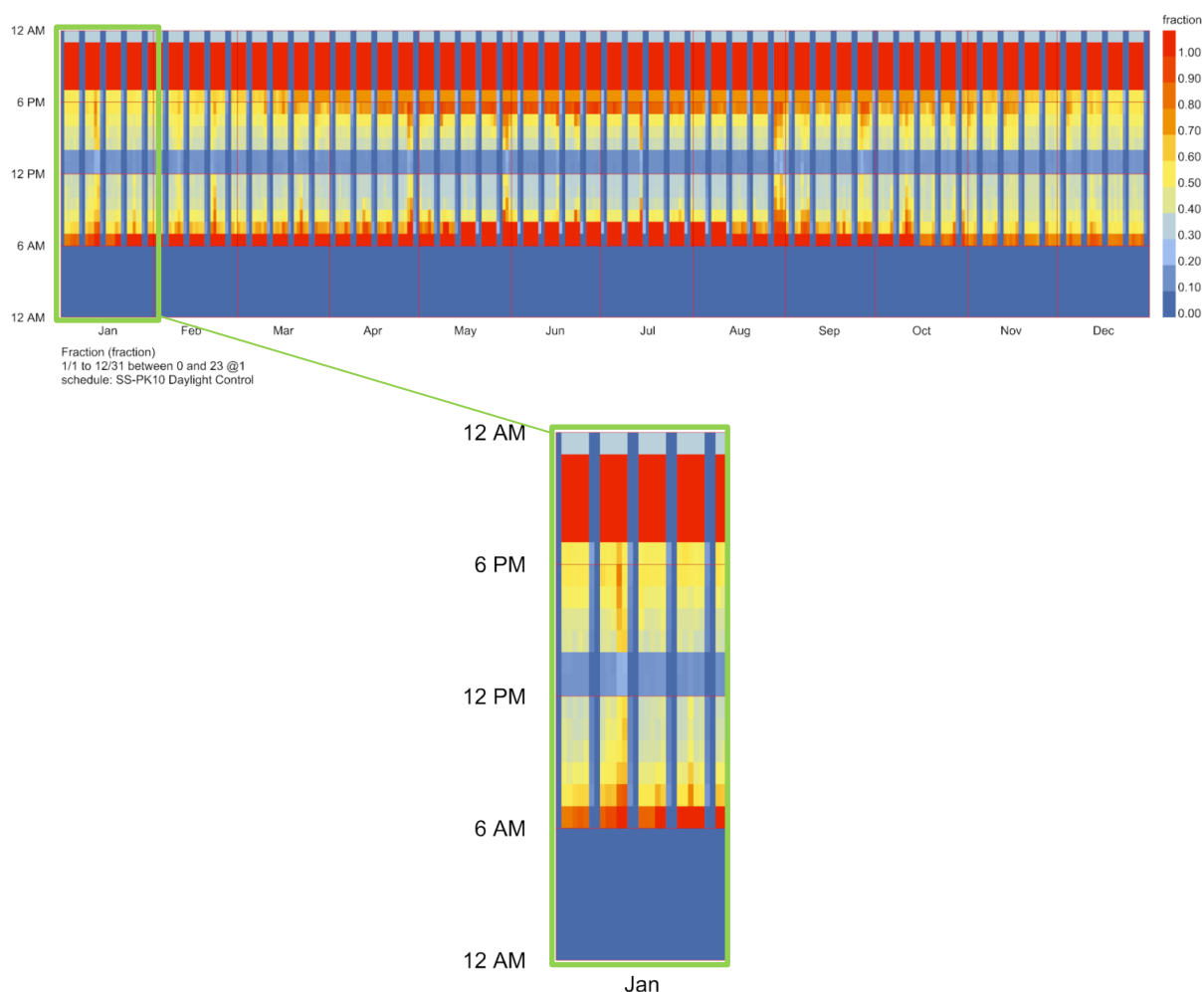


FIGURA 36 – Fração de dimerização mensal do modelo eficiente
Fonte: O Autor (2024).

Os mapas de iluminação em perspectiva, representados pelas Figuras 36, 37 e 38, reforçam essa conclusão. Nas condições analisadas, às 6h às 19h, 15h às 16h e 19h do dia 10 de janeiro, o ambiente apresenta uma distribuição luminosa bastante uniforme e funcional.

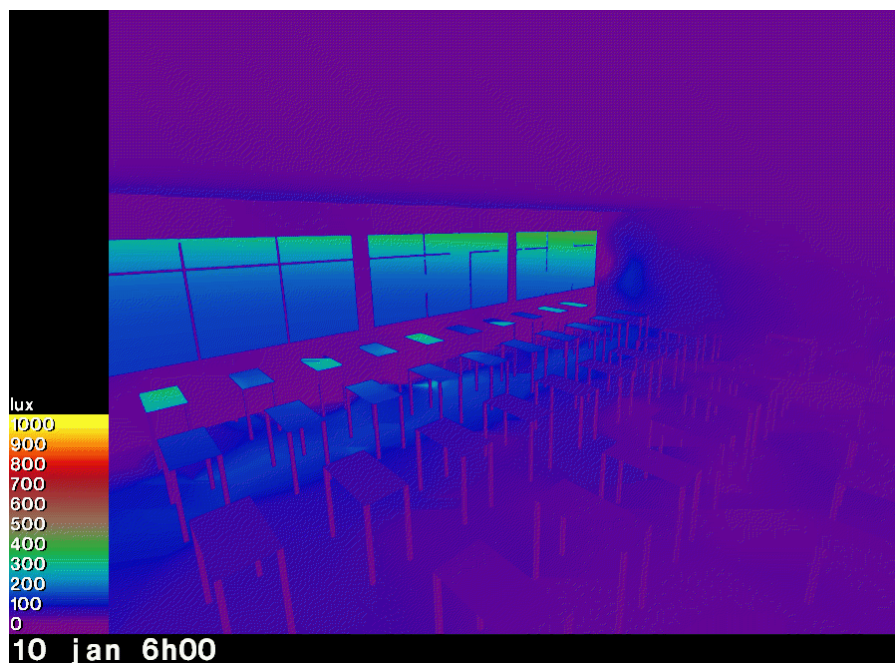


FIGURA 37 – Imagem HDR entre 6h e 7h da manhã do modelo eficiente
Fonte: O Autor (2024).

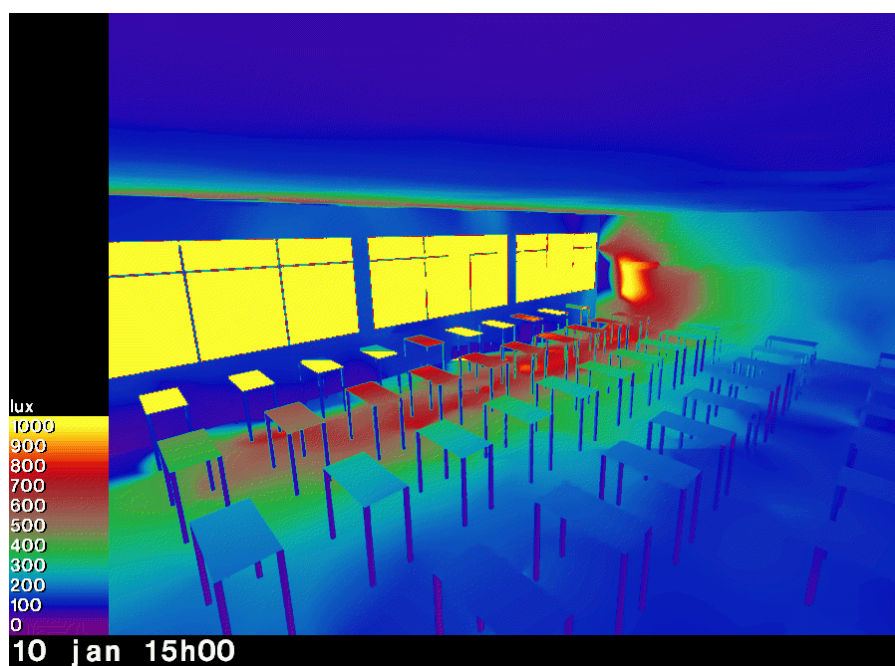


FIGURA 38 – Imagem HDR entre 15h e 16h do modelo eficiente
Fonte: O Autor (2024)

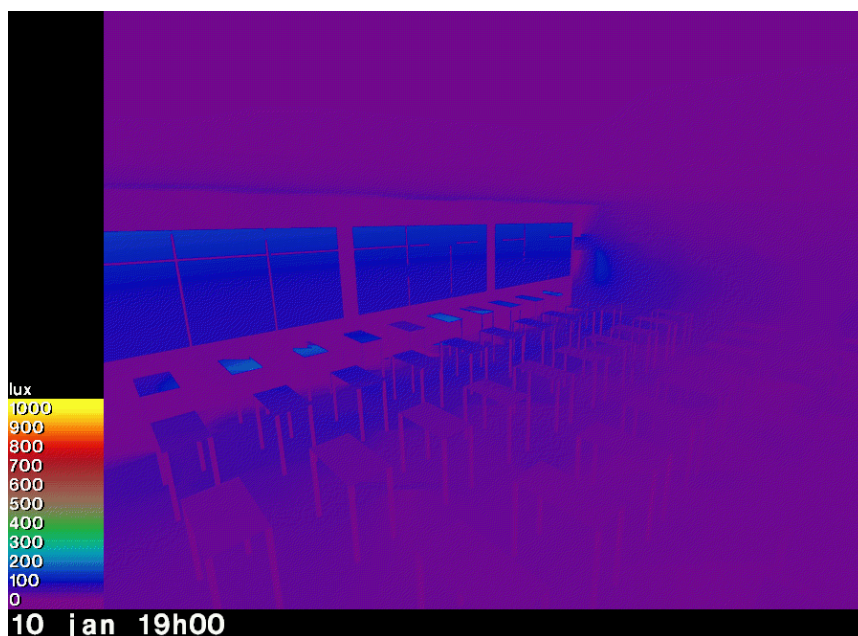


FIGURA 39 – Imagem HDR das 19h do modelo eficiente

Fonte: O Autor (2024)

4.5.4. Análise de carga térmica e consumo energético do modelo eficiente

4.5.4.1. Carga térmica de pico

No modelo eficiente (Figura 38), o pico de resfriamento foi reduzido de 158.932,30 kW (543.358,30 BTU/h) no modelo original para 89.458,05 kW (305.839,50 BTU/h), representando uma diminuição de aproximadamente 43,7%. Essa queda expressiva demonstra a eficácia dos materiais empregados em reduzir os ganhos de calor solar e as perdas térmicas por condução. No caso do aquecimento, o pico caiu de 203.201,95 kW (694.707,52 BTU/h) no modelo original para 143.996,83 kW (697.310,80 BTU/h), uma redução de cerca de 29,1%, evidenciando que os novos materiais também conseguem mitigar a perda de calor durante os meses frios.

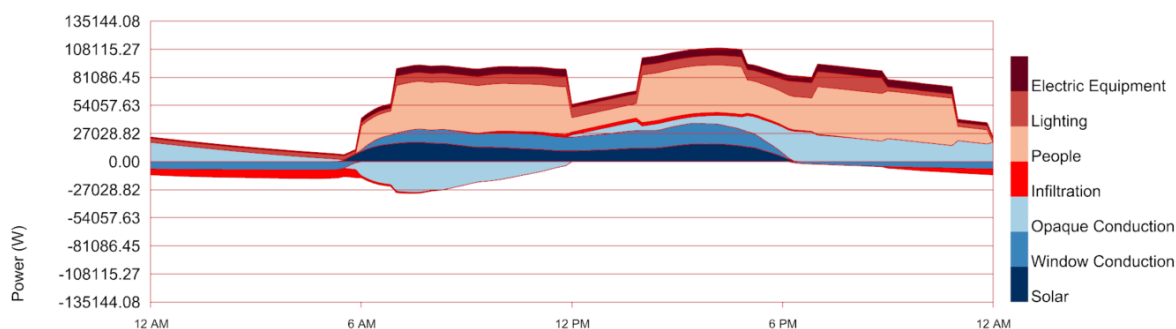


FIGURA 40 – Carga térmica do modelo eficiente

Fonte: O Autor (2024).

4.5.4.1. Consumo de energia

Por fim, no modelo eficiente, o consumo total anual para aquecimento, resfriamento, iluminação e equipamentos elétricos foi drasticamente otimizado em relação ao modelo original.

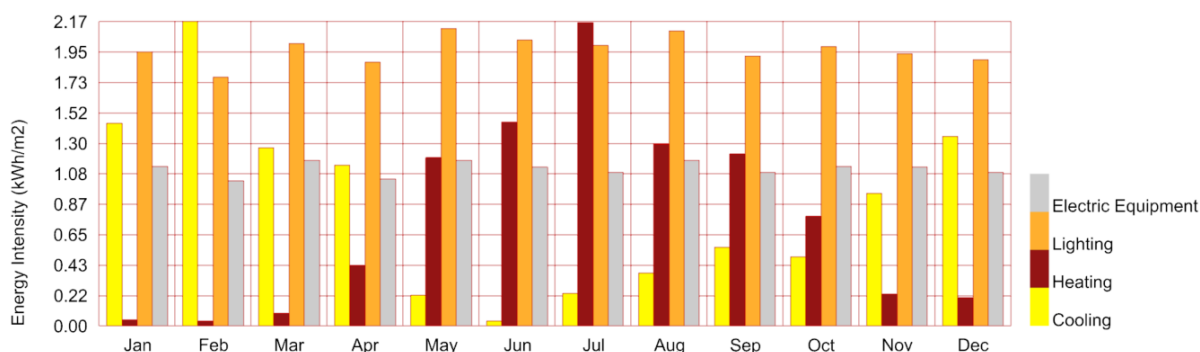


FIGURA 41 – Consumo de energia do modelo existente

Fonte: O Autor (2024).

Heating (Aquecimento)

- Modelo Original: 31.091,61 kWh (13,53 kWh/m²).
- Modelo Eficiente: 19.533,15 kWh (9,14 kWh/m²).
- Redução: Aproximadamente 37,2%.

Essa melhoria é atribuída à capacidade dos vidros e da telha sanduíche em minimizar a perda de calor em climas frios, reduzindo a demanda de aquecimento no edifício.

Cooling (Resfriamento)

- Modelo Original: 28.914,40 kWh (13,53 kWh/m²).
- Modelo Eficiente: 21.861,72 kWh (10,23 kWh/m²).
- Redução: Aproximadamente 24,4%.

O uso de materiais de alta eficiência, como os vidros de controle solar, foi crucial para reduzir os ganhos de calor solar, resultando em menor necessidade de resfriamento mecânico.

Lighting (Iluminação)

- Modelo Original: 59.351 kWh (26,30 kWh/m²).
- Modelo Eficiente com dimerização: 44.226 kWh (20,65 kWh/m²).
- Redução: Aproximadamente 25,5%.

Apesar da adição dos vidros de controle solar, a iluminação natural foi bem aproveitada, evitando perdas significativas de luz natural e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de iluminação artificial.

Electric Equipment (Equipamentos Elétricos)

- Modelo Original: 28.699,25 kWh (13,43 kWh/m²).
- Modelo Eficiente: 28.699,25 kWh (13,43 kWh/m²).
- Mudança: Nenhuma.

4.5.5. Envio de informações ao Revit para criação do modelo BIM

Inicialmente, foi desenhada a arquitetura completa do prédio PK no Revit, para que futuros projetos possam ser implementados em outras salas. Esse projeto foi feito com base na análise holística e através de plantas existentes.

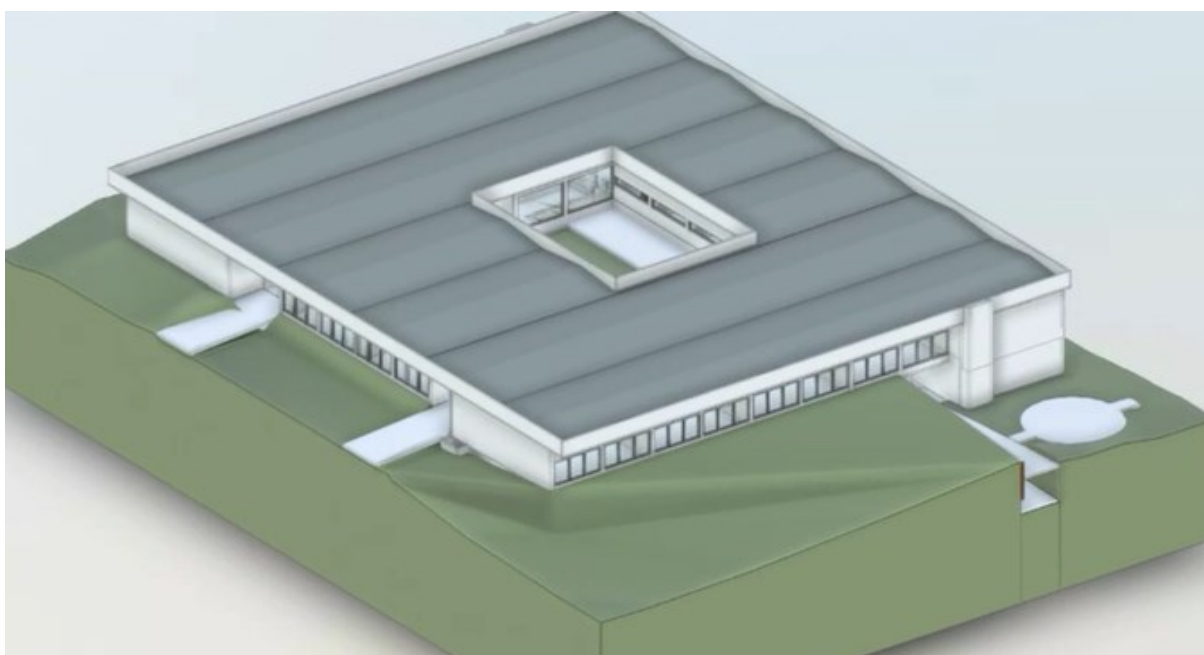


FIGURA 42 – Modelo BIM de arquitetura do prédio PK

Fonte: O Autor (2024).

O uso do Building Information Modeling (BIM) no desenvolvimento do projeto da sala PK10 foi essencial para garantir a integração das informações de todas as disciplinas envolvidas, alinhando a modelagem energética às necessidades práticas da execução do projeto. O modelo criado no Revit abrangeu desde a definição de luminárias e tomadas até os sistemas de eletrocalhas e interruptores, consolidando o planejamento detalhado do ambiente. Esse processo permitiu que as análises de

eficiência energética fossem diretamente aplicadas à configuração do espaço, garantindo coerência entre as simulações realizadas e as especificações do projeto final.

No contexto da iluminação, foram utilizadas luminárias com duas lâmpadas Tubo LED de 1200 mm base G13, totalizando 16 luminárias e uma carga de 640 W. Isso representa uma densidade de potência instalada de $7,9 \text{ W/m}^2$, levemente acima do valor recomendado pela ASHRAE de $7,7 \text{ W/m}^2$, mas dentro de uma margem aceitável para atender às necessidades específicas do ambiente. A intensidade luminosa mínima foi dimensionada para garantir conforto visual e compatibilidade com as simulações de iluminação realizadas previamente. A escolha das luminárias dimerizáveis permite maior controle sobre a intensidade luminosa ao longo do dia, otimizando o consumo de energia e mantendo o desempenho energético esperado.

Além disso, as luminárias foram instaladas como elementos de sobrepor, simplificando a manutenção e reduzindo os custos associados. As eletrocalhas utilizadas foram especificadas em aço galvanizado perfurado, na cor branca, para distribuição próxima ao teto, enquanto as eletrocalhas nas paredes seguem o padrão Dutotec, com tomadas e interruptores embutidos na própria eletrocalha. Essa configuração assegura praticidade e eficiência no uso do espaço, e possibilita que futuras manutenções ou adaptações sejam realizadas de forma simplificada.

O modelo BIM consolidou a coerência entre as especificações e as necessidades do ambiente. Como exemplo, a sala PK10, com aproximadamente 81 m^2 , foi dimensionada de forma a respeitar as características energéticas avaliadas nas simulações, garantindo que o desempenho do sistema de iluminação esteja alinhado com o consumo energético projetado. A integração do BIM com as análises realizadas através de ferramentas de simulação energética, como o EnergyPlus e o OpenStudio, possibilitou ajustes finos no dimensionamento das cargas térmicas e da iluminação, resultando em maior precisão e eficiência no projeto final.

Outro ponto fundamental é a contribuição do BIM na extração de informações para orçamento. O modelo tridimensional permite a geração automática de quantitativos detalhados, como o número de luminárias, comprimento de eletrocalhas, quantidade de tomadas e comprimento de cabos, reduzindo a probabilidade de erros manuais. Isso também assegura maior transparência e controle sobre os custos, facilitando o planejamento financeiro da obra. No caso da PK10, os materiais e

equipamentos especificados foram todos integrados no modelo, permitindo um acompanhamento preciso desde o projeto até a fase de execução.

O BIM, nesse cenário, não foi apenas uma ferramenta de representação gráfica, mas também um meio de conectar os resultados das simulações energéticas às decisões práticas do projeto. As cargas térmicas simuladas influenciaram diretamente as especificações de materiais e a disposição dos elementos no ambiente. Por exemplo, a definição de telhas sanduíche com isolamento de poliuretano e vidros de controle solar foi possível graças à análise detalhada de transferências de calor e ganhos solares no ambiente. Essas escolhas foram inseridas no modelo BIM, assegurando que a execução mantivesse a eficiência projetada. Dessa forma, o modelo Arquitetônico em BIM disponibilizado pelo levantamento de campo e plantas baixas em DWG permitem que a área de janelas e telhados sejam quantificadas futuramente para inserção desses materiais. O Building Energy Modeling (BEM) refere-se ao processo de modelagem e simulação do desempenho energético de edificações, enquanto o BIM é uma metodologia de trabalho que integra informações de diferentes disciplinas em um modelo digital centralizado. Embora o BEM não seja uma etapa do BIM, ele pode ser integrado ao BIM para criar um fluxo de trabalho mais eficiente. A integração ocorre quando o modelo digital gerado no BIM fornece informações como geometrias, materiais e sistemas para o software de simulação energética (BEM). Assim, o BEM pode ser considerado uma aplicação ou um complemento que se beneficia dos dados do BIM para realizar análises de energia mais detalhadas.

Por fim, o uso do BIM possibilitou uma abordagem integrada e altamente eficiente no desenvolvimento do projeto da PK10. Desde a simulação inicial até a modelagem detalhada no Revit, cada etapa foi planejada e validada com base em critérios técnicos claros e objetivos de eficiência energética. A aplicação dessa metodologia em um projeto piloto, como a PK10, demonstra a viabilidade de sua replicação em outros ambientes do edifício, promovendo maior economia, sustentabilidade e controle sobre as etapas do projeto e execução.

Na figura 41 é apresentado o modelo do sistema elétrico.

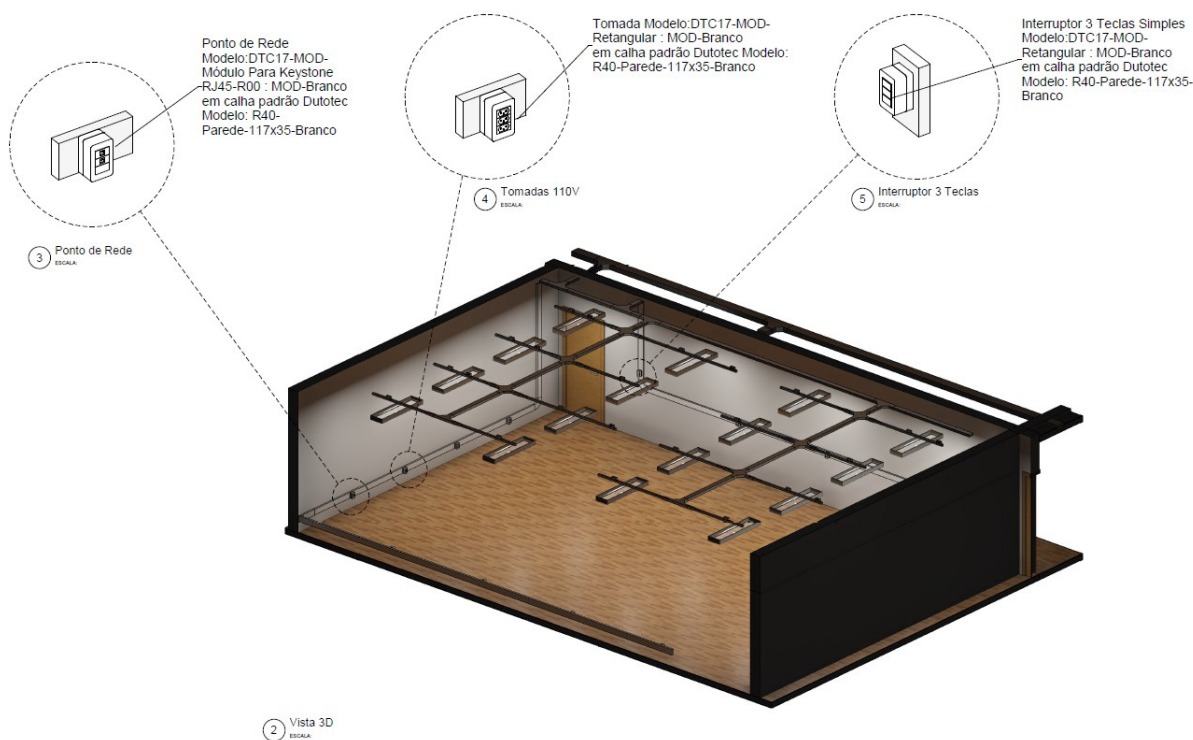


FIGURA 43 – Modelo BIM elétrico para a sala PK10

Fonte: O Autor (2024).

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o desempenho energético e térmico do edifício PK10, localizado no Setor de Engenharia Elétrica, por meio de simulações paramétricas utilizando ferramentas de análise de energia e modelagem de informações da construção (BIM). Para isso, foram analisados três cenários: o modelo existente, o modelo com brises e o modelo eficiente. Cada cenário foi estudado em detalhes, considerando diferentes aspectos, como radiação solar incidente, carga térmica, consumo energético e iluminação natural, culminando na implementação de um modelo digital no Revit. A seguir, apresentam-se as conclusões detalhadas, organizadas por etapa e com base nos resultados obtidos.

5.1. Desempenho do Modelo Existente

O modelo existente serviu como base comparativa para as simulações, revelando problemas significativos na eficiência energética do edifício. O calor

transmitido por superfícies opacas e janelas, associado à baixa eficiência térmica dos materiais, resultou em elevadas cargas térmicas de pico, tanto para aquecimento quanto para resfriamento. Os resultados demonstraram uma dependência excessiva de sistemas mecânicos para manter o conforto térmico.

O gráfico de balanço térmico evidenciou um grande impacto da radiação solar, com picos de ganho de calor superiores a 150 kWh ao longo do dia. As janelas apresentaram um desempenho crítico, com ganhos de calor anuais de 962,35 kWh, enquanto a perda de calor foi de 161,30 kWh. Esses números refletem a baixa resistência térmica do vidro, com um fator U elevado de 5,6 W/m²K.

Em termos de consumo energético, o modelo existente apresentou altos valores, com destaque para a iluminação (59.351 kWh) e resfriamento (28.914,40 kWh). A densidade de iluminação foi estimada em 7,7 W/m², alinhada à recomendação da ASHRAE 90.1 para edifícios educacionais, mas ainda havia potencial para otimização com a introdução de sistemas de dimerização.

5.2. Impacto do Modelo com Brises

O segundo cenário explorou a implementação de brises como estratégia passiva para controle de radiação solar. Embora tenha havido uma redução perceptível no ganho de calor por radiação direta, os resultados gerais indicaram que a eficiência global do modelo foi limitada. A iluminação natural foi prejudicada em algumas horas do dia, aumentando a dependência de iluminação artificial, o que comprometeu os ganhos esperados na redução do consumo energético.

O modelo com brises não trouxe mudanças significativas na carga térmica para aquecimento, o que foi um ponto crítico, especialmente nos meses frios. O impacto da radiação difusa continuou relevante. Essa limitação foi observada no gráfico de balanço térmico, onde os picos de ganho de calor solar não diminuíram tanto quanto esperado. O consumo energético total foi reduzido de forma marginal, evidenciando que estratégias passivas isoladas não são suficientes para alcançar resultados significativos.

5.3. Resultados do Modelo Eficiente

O modelo eficiente, que combinou o uso de vidros de controle solar e telhas tipo sanduíche, apresentou o melhor desempenho em todos os aspectos avaliados. O vidro escolhido, com um coeficiente de sombreamento de 0,46, transmitância visível

de 0,33 e fator U de 5,6 W/m²K, reduziu os ganhos de calor por radiação em 44,5% em comparação ao modelo existente, caindo para 533,76 kWh anuais. Por outro lado, as perdas de calor aumentaram ligeiramente para 171,06 kWh, mas ainda em níveis aceitáveis considerando o benefício global.

As telhas tipo sanduíche com isolamento de poliuretano de 50 mm, com fator U de 0,532 W/m²K, demonstraram excelente desempenho na retenção de calor interno nos meses mais frios, o que foi crucial para reduzir as cargas térmicas de aquecimento. A transferência de calor por condução nas superfícies opacas caiu drasticamente, como evidenciado nos gráficos de balanço térmico, que apresentaram curvas muito menos acentuadas, indicando maior estabilidade térmica ao longo do dia.

O consumo energético anual total também foi significativamente reduzido. A iluminação apresentou uma queda para 44.226 kWh, resultado da aplicação de sistemas dimerizáveis eficientes, e a densidade de carga luminosa foi ajustada para 7,9 W/m², alinhada às simulações realizadas. O resfriamento, por sua vez, foi reduzido para 21.861,72 kWh, representando uma diminuição de aproximadamente 24,4% em relação ao modelo existente. O aquecimento apresentou uma redução ainda mais expressiva, totalizando 19.533,15 kWh, com uma densidade energética de apenas 9,14 kWh/m², demonstrando o impacto positivo das melhorias nos materiais opacos.

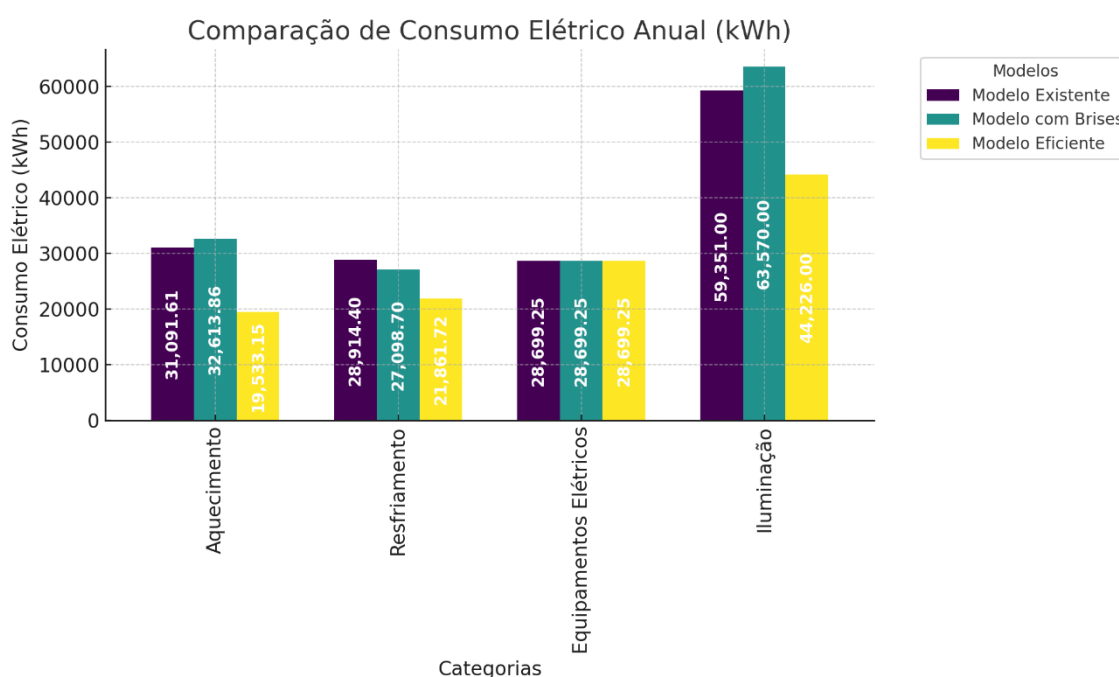


FIGURA 44 – Comparação de consumo energético final

Fonte: O Autor (2024).

Com o modelo final, foi possível utilizar os dados de energia para a construção do gráfico na figura 44, demonstrando o comparativo de consumo de energia total para cada modelo.

5.4. Integração com o BIM e Implementação

A etapa final do trabalho consistiu na integração dos dados de simulação com o modelo digital no Revit, consolidando os resultados obtidos. A modelagem tridimensional da arquitetura geral do prédio PK, e da sala PK10 incluiu a implementação de sistemas elétricos, de iluminação e de dimerização, além de eletrodutos e eletrocalhas projetados com base nos resultados das simulações. Cada luminária foi configurada para atender à densidade de carga luminosa otimizada.

O uso do BIM permitiu a visualização detalhada dos sistemas projetados e a extração precisa de quantitativos para orçamentos. Essa integração possibilitou que o processo de projeto fosse conduzido de forma mais eficiente e alinhada aos objetivos de desempenho estabelecidos durante as simulações. Além disso, a metodologia aplicada é escalável, podendo ser replicada para outras salas do edifício PK.

5.5. Trabalhos futuros

Como desdobramento, um passo essencial seria aprofundar a análise de materiais e soluções construtivas, explorando suas implicações energéticas. Simulações detalhadas de diferentes tipos de vidros, telhas e revestimentos externos, com variações no fator U, coeficiente de sombreamento e transmitância térmica, podem identificar alternativas ainda mais eficientes. Tais estudos podem ser direcionados para diferentes regiões climáticas, considerando a adaptação local como critério de seleção dos materiais.

Outra abordagem relevante seria a integração de sistemas de automação e sensores nos modelos simulados, especialmente para iluminação e climatização. Sensores de presença, sensores de iluminação dimerizáveis e estratégias de controle adaptativo podem ser analisados para verificar o impacto direto na redução do consumo energético, maximizando o uso da luz natural e adaptando a climatização às condições de ocupação e temperatura.

Trabalhos futuros podem também explorar estratégias híbridas que combinem sistemas passivos e ativos, como fachadas ventiladas e recuperação de calor, para

alcançar um equilíbrio entre conforto térmico e eficiência energética. A implementação de simulações mais detalhadas de ventilação natural e mecânica permitiria analisar como essas soluções podem reduzir as cargas térmicas de resfriamento e aquecimento, além de aumentar a qualidade do ar interno.

No âmbito do conforto térmico, simulações avançadas de temperatura operativa ao longo do ano podem ser utilizadas para identificar zonas de desconforto e testar intervenções específicas para mitigá-las. A modelagem de diferentes cenários de ocupação, horários de uso e variações sazonais também pode ajudar a refinar os sistemas implementados, ajustando-os de forma mais precisa às demandas reais do edifício.

Além disso, uma análise integrada de eficiência energética e custos operacionais deve ser considerada. Estudos que avaliem o retorno financeiro de investimentos em materiais mais eficientes e sistemas automatizados são cruciais para justificar a adoção de tecnologias avançadas em larga escala.

REFERÊNCIAS

AIE (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA). World Energy Outlook. 2019.

AZHAR, S. **Building Information Modeling (BIM):** Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241-252. 2011.

BURRY, M. *Scripting Cultures: Architectural Design and Programming*. Wiley. 2011.

CRAWLEY, D. B., Hand, J. W. Kummert, M., & Griffith, B. T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), 661-673. 2007. 2008.

DAVIS, D. **Modelled on Software Engineering:** Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture. *Architecture and Design*, 83(6), 58-63. 2013.

EASTMAN, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. **BIM Handbook:** A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. 2nd Edition. Wiley. 2011.

ENERGY PLUS. *EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations*. 2020.

GU, N., & London, K. Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. *Automation in Construction*, 19(8), 988-999. 2010.

HARDIN, B., & McCool, D. BIM and Construction Management: Proven Tools, Methods, and Workflows. 2nd Edition. Wiley. 2015.

INMETRO (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA). Programa Brasileiro de Etiquetagem. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. 2010.

KRYGIEL, E., & Nies, B. Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling. Wiley. 2008.

LAMBERTS, R., Dutra, L., & Pereira, F. O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. São Paulo: Elsevier. 2014.

MDIC. Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modeling. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. 2018.

PARKER, A., Long, N., Robertson, J., & Scheib, J. OpenStudio: A Platform for Building Energy Modeling. National Renewable Energy Laboratory. 2018.

MYERS, D. R. Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: data and model quality. **Energy**, v. 30, n. 9, p. 1517–1531, jul. 2005.