

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Marco Túlio Bones Soares

BALANÇO ENERGÉTICO NULO EM EDIFÍCIOS UNIVERSITÁRIOS: o caso do
Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília

Brasília

2024

Marco Túlio Bones Soares

BALANÇO ENERGÉTICO NULO EM EDIFÍCIOS UNIVERSITÁRIOS: o caso do
Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Dr^a. Cláudia Naves David Amorim

Brasília

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO****Ata n. 123.**

Aos vinte e seis dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e quatro, instalou-se a banca examinadora de **defesa de dissertação de mestrado do aluno Marco Tulio Bones Soares, matrícula 220003408**. A banca examinadora foi presidida pela/o Dra. Cláudia Naves David Amorim (Presidente da banca examinadora, FAU/UnB) e composta pelas professoras Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza (membro externo, Universidade Federal de Minas Gerais), Dra. Joára Cronemberger Ribeiro Silva (membro interno, FAU/UnB), e Dra. Juliana Andrade Borges de Sousa (membro suplente, FAU/UnB). O(a) discente apresentou o trabalho intitulado **“Balanço energético nulo em edifícios universitários: o caso do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília”**. Concluída a exposição, procedeu-se a arguição do(a) candidato(a), e após as considerações dos examinadores o resultado da avaliação do trabalho foi pela **aprovação do trabalho**. Conforme os Artigos 34, 39 e 40 da Resolução 0080/2021 - CEPE, o(a) candidato(a) não terá o título se não cumprir as exigências acima.

Dra. Cláudia Naves David Amorim, FAU/UnB
(Presidente da banca examinadora)

Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza, UFMG
(Examinadora externa)

Dra. Joára Cronemberger Ribeiro Silva, FAU/UnB
(Examinador interna)

Dra. Juliana Andrade Borges de Sousa, FAU/UnB
(Suplente)

Marco Tulio Bones Soares

(Mestrando)



Documento assinado eletronicamente por **Marco Túlio Bones Soares, Usuário Externo**, em 27/11/2024, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Claudia Naves David Amorim, Professor(a) de Magistério Superior da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo**, em 27/11/2024, às 11:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Carolina Pescatori Candido da Silva, Coordenador(a) do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo**, em 27/11/2024, às 11:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Roberta Vieira Gonçalves de Souza, Usuário Externo**, em 27/11/2024, às 12:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Joara Cronemberger Ribeiro Silva, Professor(a) de Magistério Superior da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo**, em 27/11/2024, às 20:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.unb.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **12087495** e o código CRC **BDC831BC**.

“O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”

RESUMO

No Brasil, o setor de edificações é responsável por cerca de 50% do consumo de energia elétrica. Os edifícios universitários, incluídos nesse setor, apresentam um consumo energético elevado em razão de suas infraestruturas complexas e diversidade de uso. Esse consumo está diretamente relacionado ao uso de sistemas de climatização, iluminação e equipamentos, para atender às necessidades específicas de conforto térmico e visual dos usuários. Nesse contexto, a eficiência energética dos edifícios se torna uma questão central, especialmente pela crescente demanda por soluções que reduzam o impacto ambiental das edificações. Diversas pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de criar edifícios de balanço energético nulo (ZEB – *Zero Energy Buildings*), no qual um edifício gera, ao longo de um ano, a mesma quantidade de energia renovável que consome. No entanto, muitas dessas pesquisas se concentram em análises isoladas e/ou edifícios novos, sem considerar uma abordagem mais abrangente que explore as sinergias entre diferentes edificações existentes e as possibilidades de otimização que surgem quando edifícios funcionam em conjunto. O presente trabalho teve como principal objetivo investigar a viabilidade de transformar edifícios universitários em nZEB's, com foco no *Campus Darcy Ribeiro* da Universidade de Brasília. A seleção dos edifícios foi baseada na identificação e categorização tipológica do campus Darcy Ribeiro, considerando o uso, replicabilidade, monitoramento energético e potencial para estratégias passivas. Além disso, foi realizada uma análise morfológica com aplicação do "Diagrama Morfológico", na qual foram selecionados 40 edifícios não residenciais. A partir disso, um processo de amostragem aleatória e análise de *clusters* definiu uma amostra representativa para aprofundar o estudo, agrupando edifícios em categorias similares. A avaliação do desempenho termoenergético desses edifícios incluiu o estudo dos principais usos finais de energia, além de uma análise das condições de conforto térmico e da qualidade da iluminação natural. Além de avaliar o desempenho atual dos edifícios, a pesquisa também se concentrou em otimizar esse desempenho por meio da implementação de estratégias passivas e ativas, tendo em vista o clima de Brasília. A investigação foi realizada por meio de simulações computacionais, utilizando softwares como DesignBuilder, Rhinoceros e *Climate Studio*. Esses programas permitiram a criação de modelos detalhados dos edifícios, possibilitando uma análise de seu desempenho energético e suas condições de conforto térmico e lumínico ao longo do ano. As simulações também possibilitaram a avaliação do potencial de geração de energia solar fotovoltaica nos edifícios estudados. Os resultados da pesquisa indicaram que há um grande potencial de melhoria no desempenho energético dos edifícios por meio da adoção de estratégias passivas, especialmente no que se refere à otimização da iluminação natural. Além disso, a integração de módulos fotovoltaicos demonstrou ser uma solução viável para suprir a demanda energética, alcançando a meta de balanço energético nulo. O estudo concluiu que, com a aplicação das estratégias adequadas, como sombreamento adequado, redução do fator solar dos vidros por meio de aplicação de películas, aplicação de materiais frios na cobertura e sistema de controle da iluminação é possível transformar edifícios universitários em ZEBs, contribuindo para a redução do consumo de energia e melhoria nas condições de conforto térmico. Para todos os edifícios analisados, foi possível uma melhoria na qualidade ambiental, garantindo o conforto térmico de pelo menos 80% das horas ocupadas ao longo de um ano, além da redução na demanda energética em média de 15,60%, o que demonstra a eficácia das estratégias utilizadas.

Palavras-Chave: *campus* universitário, edifícios de balanço energético nulo, retrofit, conforto ambiental, eficiência energética

ABSTRACT

In Brazil, the building sector is responsible for approximately 50% of electricity consumption. University buildings, included in this sector, have high energy consumption due to their complex infrastructures and diverse usage. This consumption is directly related to the use of air conditioning, lighting, and equipment systems to meet the specific thermal and visual comfort needs of users. In this context, the energy efficiency of buildings becomes a central issue, especially given the growing demand for solutions that reduce the environmental impact of buildings. Several studies have been developed with the aim of creating zero-energy balance buildings (ZEB – Zero Energy Buildings), in which a building generates, over the course of a year, the same amount of renewable energy that it consumes. However, many of these studies focus on isolated analyses and/or new buildings, without considering a more comprehensive approach that explores the synergies between different existing buildings and the optimization possibilities that arise when buildings operate together. The main objective of this study was to investigate the feasibility of transforming university buildings into nZEBs, with a focus on the Darcy Ribeiro Campus of the University of Brasília. The selection of buildings was based on the identification and typological categorization of the Darcy Ribeiro campus, considering usage, replicability, energy monitoring, and potential for passive strategies. Additionally, a morphological analysis was conducted using the "Morphological Diagram," in which 40 non-residential buildings were selected. From this, a random sampling process and cluster analysis defined a representative sample for further study, grouping buildings into similar categories. The evaluation of the thermo-energy performance of these buildings included studying the main energy end-uses, as well as an analysis of thermal comfort conditions and natural lighting quality. In addition to assessing the current performance of the buildings, the research also focused on optimizing this performance through the implementation of passive and active strategies, taking into account the climate of Brasília. The investigation was carried out through computational simulations, using software such as DesignBuilder, Rhinoceros, and Climate Studio. These programs allowed the creation of detailed building models, enabling an analysis of their energy performance and thermal and lighting comfort conditions throughout the year. The simulations also allowed the evaluation of the potential for photovoltaic solar energy generation in the studied buildings. The results of the research indicated that there is great potential for improving the energy performance of the buildings through the adoption of passive strategies, particularly in optimizing natural lighting. Furthermore, the integration of photovoltaic modules proved to be a viable solution to meet energy demand, achieving the zero-energy balance target. The study concluded that, with the application of appropriate strategies such as adequate shading, reduction of solar heat gain through window film application, use of cool materials on the roof, and lighting control systems, it is possible to transform university buildings into ZEBs, contributing to energy consumption reduction and improved thermal comfort conditions. For all the analyzed buildings, an improvement in environmental quality was achieved, ensuring thermal comfort for at least 80% of occupied hours throughout the year, in addition to a reduction in energy demand by an average of 15.60%, demonstrating the effectiveness of the strategies used.

Keywords: university campus, zero energy buildings, retrofit, environmental confort, energy efficiency

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Participação setorial no consumo de energia elétrica.	15
Figura 2: Pilares fundamentais para um ZEB.	24
Figura 3: Consumo anual de energia elétrica por uso final estimado para cada cenário proposto.	29
Figura 4: Comprimentos de onda de refletividade e emissividade.	36
Figura 5: Diretrizes construtivas para a zona bioclimática 4.	39
Figura 6: Classificação da pesquisa.	46
Figura 7: Passos metodológicos.	48
Figura 8: Número ótimo de <i>clusters</i>	56
Figura 9: <i>Clusters</i>	56
Figura 10: Cálculo do tamanho da amostra.	58
Figura 11: Potencial de uso de estratégias passivas – edifícios do <i>Campus Darcy Ribeiro</i>	62
Figura 12: Fachadas dos edifícios selecionados.	63
Figura 13: Estratégias para otimização.	69
Figura 14: Planilha de dimensionamento básico de sistema fotovoltaico.	70
Figura 15: Representação do balanço energético de um edifício.	71
Figura 16: Esquema de simulações que será adotado para cada edifício.	72
Figura 17: Zoneamento bioclimático por desempenho térmico e umidade relativa.	73
Figura 18: Gráfico das temperaturas médias em Brasília/DF.	74
Figura 19: Gráfico das Rosa dos Ventos de Brasília/DF.	75
Figura 20: Carta Solar de Brasília/DF.	75
Figura 21: Mapa de Irradiação Horizontal Global.	76
Figura 22: Potencial de Geração de Energia Fotovoltaica.	77
Figura 23: Glebas A, B e C do <i>Campus Darcy Ribeiro</i>	78
Figura 25: Localização do edifício – BSAN.	80
Figura 26: Planta do Térreo e do Primeiro Pavimento – BSAN.	81
Figura 27: Sala de Aula do térreo com as janelas fechadas.	82
Figura 28: Sala de Aula do térreo com as janelas abertas.	82
Figura 29: Sala de Aula do segundo pavimento com as janelas fechadas.	82
Figura 30: Sala de Aula do segundo pavimento com as janelas abertas.	82
Figura 31: Localização do edifício – CDT.	83
Figura 32: Planta do Térreo e do Primeiro Pavimento – CDT.	84

Figura 33: Vista geral do edifício – Fachada.....	84
Figura 34: Vista lateral do edifício.....	84
Figura 35: Localização do edifício – PJC.....	85
Figura 36: Planta do Térreo – PJC.....	86
Figura 37: Vista geral da sala de aula [1].....	86
Figura 38: Vista geral da sala de aula [2].....	86
Figura 39: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês – BSAN (caso-base).....	89
Figura 40: Balanço térmico anual do edifício – BSAN (caso-base).....	90
Figura 41: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês – CDT (caso-base).....	91
Figura 42: Balanço térmico anual do edifício – CDT (caso-base).....	92
Figura 43: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês – PJC (caso-base).....	93
Figura 44: Balanço térmico anual do edifício – PJC (caso-base).....	94
Figura 45: Balanço térmico anual por fonte por sala (caso-base).....	95
Figura 46: Percentual da demanda energética simulada por uso final (caso-base).....	97
Figura 47: <i>Useful Daylight Illuminance</i> (UDI) – BSAN (caso-base).....	98
Figura 48: <i>Special Daylight Autonomy</i> (sDA) – BSAN (caso-base).....	99
Figura 49: <i>Spatial Disturbing Glare</i> (sDG) – BSAN (caso-base).....	99
Figura 50: <i>Useful Daylight Illuminance</i> (UDI) – CDT (caso-base).....	100
Figura 51: <i>Special Daylight Autonomy</i> (sDA) – CDT (caso-base).....	101
Figura 52: <i>Spatial Disturbing Glare</i> (sDG) – CDT (caso-base).....	101
Figura 53: <i>Useful Daylight Illuminance</i> (UDI) – PJC (caso-base).....	102
Figura 54: <i>Special Daylight Autonomy</i> (sDA) – PJC (caso-base).....	103
Figura 55: <i>Spatial Disturbing Glare</i> (sDG) – PJC (caso-base).....	103
Figura 56: Estratégias para otimização.....	104
Figura 57: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês e balanço térmico para “Sala 11” (BSAN): caso-base.....	105
Figura 58: E1 - Brise.....	105
Figura 59: E2 – Película – Vidro.....	105
Figura 60: E3 – Materiais frios na laje (remoção da telha).....	106
Figura 61: E4 – Materiais frios na telha.....	106

Figura 62: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês e balanço térmico para “Sala 11” (BSAN): otimizado.	106
Figura 63: Balanço térmico para cada cenário.	107
Figura 64: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês - otimizado – BSAN.	108
Figura 65: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês – otimizado – CDT.	109
Figura 66: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês – otimizado – PJC.	110
Figura 67: Balanço térmico anual para o edifício inteiro - otimizado.	112
Figura 68: Balanço térmico anual por fonte por sala – otimizado (kWh).	113
Figura 69: Impacto da aplicação dos materiais frios na carga térmica da cobertura.	114
Figura 70: Análise da Qualidade da Iluminação Natural – otimizado - BSAN.	118
Figura 71: Análise da Qualidade da Iluminação Natural – otimizado – CDT.	119
Figura 72: Análise da Qualidade da Iluminação Natural – otimizado – PJC.	120
Figura 73: Estimativa de geração de energia renovável (kWh).	121
Figura 74: Balanço energético dos edifícios.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Programas sustentáveis e voltados para eficiência energética em algumas universidades brasileiras.	18
Tabela 2: Estratégias para eficiência energética em edifícios universitários.	26
Tabela 3 – Estratégias passivas e ativas identificadas na literatura.	30
Tabela 4 – Tecnologias fotovoltaicas aplicadas em <i>campi</i> universitários.	40
Tabela 5: Resumo de algumas EUI relatados na literatura para <i>campi</i> e edifícios universitários.	43
Tabela 6 – Busca inicial.	49
Tabela 7 – Buscas complementares.	49
Tabela 8 – Categorização dos edifícios.	52
Tabela 9 – Escala quanto ao potencial de uso de estratégias passivas na edificação.	53
Tabela 10 – Organização dos edifícios nos <i>clusters</i>	57
Tabela 11 – Amostra com intervalo de confiança 70% e margem de erro 15%.	59
Tabela 12 – Relação dos edifícios selecionados para o estudo no projeto de pesquisa em desenvolvimento no LACAM/UnB.	61
Tabela 13 – Métricas analisadas e classificação.	67
Tabela 14 – Estratégias selecionadas para otimização dos edifícios.	68
Tabela 15 – Consumo de energia do <i>Campus Darcy Ribeiro</i>	79
Tabela 16 – Tabela resumo – edifícios do <i>cluster 2</i>	87
Tabela 17 – Demanda energética anual simulada por uso final para o caso-base (kWh/ano).	96
Tabela 18 – Intensidade de uso energético EUI do caso-base (kWh/ano.m ²).	97
Tabela 19 – Resumo dos resultados das simulações para qualidade da iluminação natural do caso-base.	98
Tabela 20 – Demanda energética anual simulada por uso final (kWh/ano) - otimizado.	115
Tabela 21 – Intensidade de uso energético - otimizado - EUI (kWh/ano.m ²).	116
Tabela 22 – Resumo dos resultados das simulações para qualidade da iluminação natural pós otimização.	116
Tabela 23 – Estimativa de geração de energia renovável anual por m ²	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASE - *Annual Sunlight Exposure*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BEN – Balanço Energético Nacional

BAPV - *Building Applied Photovoltaics*

BIPV - *Building Integrated Photovoltaics*

CB3E – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

DPI – Densidade de Potência Instalada

DPE – Densidade de Potência de Equipamentos

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas

GHI – *Global Horizontal Irradiation*

IEA - *International Energy Agency*

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

EUI - *Energy Use Intensity*

kWh - Quilowatt-hora

MME – Ministério de Minas e Energia

OIE – Oferta Interna de Energia

ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

PAF – Percentual de Abertura na Fachada

PV – *Photovoltaics*

PCM - *Phase change material*

sDA - *Spatial Daylight Autonomy*

U – Transmitância Térmica

UDI – *Useful Daylight Illuminances*

ZEB – *Zero Energy Building*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivos	21
1.1.1. Objetivo Geral	21
1.1.2. Objetivos Específicos	21
1.2. Estrutura da Dissertação	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.2. Indicadores de desempenho energético	42
3. MATERIAIS E MÉTODO	46
3.1. Revisão de Literatura	48
3.2. Objeto de estudo	50
3.3. Estudos de casos	51
3.3.1. Identificação e Mapeamento	51
3.3.2. Categorização tipológica	51
3.3.3. Critérios de seleção	53
3.3.4. Análise morfológica	53
3.3.5. Definição da amostra	54
3.3.6. Seleção dos edifícios	58
3.4. Análise dos edifícios	64
3.4.2. Otimização	68
3.5. Geração fotovoltaica	70
3.6. Balanço Energético	71
4. OBJETO DE ESTUDO	73
4.1. Caracterização climática de Brasília	73
4.2. A Universidade de Brasília	78
4.3.1. BSAN - Bloco de Salas de Aulas Norte	80
4.3.2. CDT – Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico	83
4.3.3. PJC – Pavilhão João Calmon	85
4.4. Tabela resumo	87
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
5.1. CASO-BASE	88
5.1.1. Conforto térmico	88
5.1.2. Desempenho energético	96
5.1.3. Qualidade da iluminação natural	97

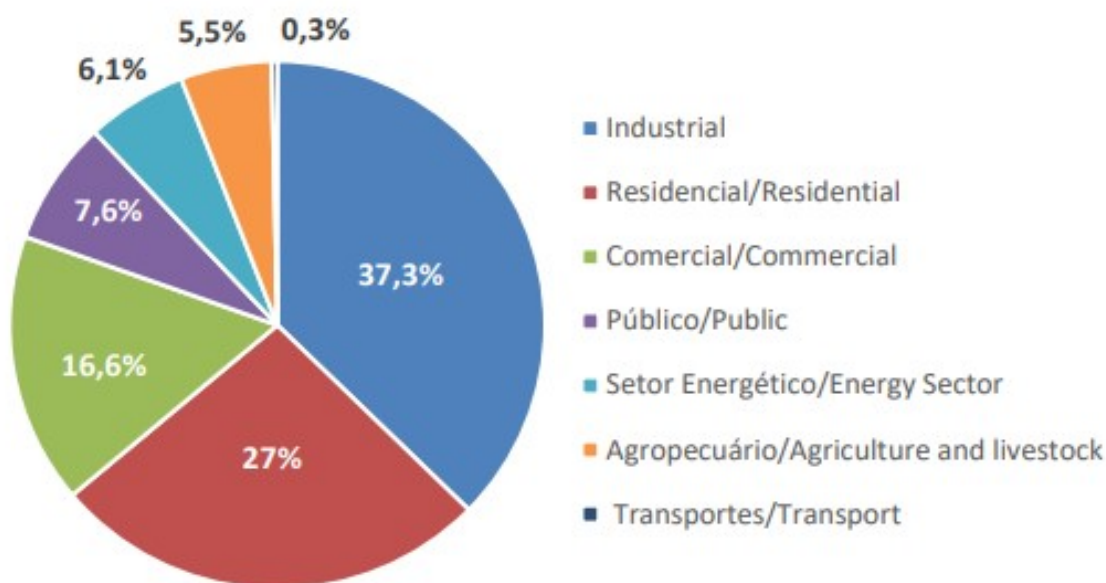
5.2. OTIMIZAÇÃO	104
5.2.1. Conforto térmico	104
5.2.2. Desempenho energético	115
5.3. GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA	121
5.4. BALANÇO ENERGÉTICO	123
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
7. REFERÊNCIAS	128
APÊNDICES E ANEXOS	136

1. INTRODUÇÃO

O setor de edificações impacta significativamente o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa, o que se relaciona diretamente com os efeitos do aquecimento global. Esse setor corresponde a aproximadamente 30% do consumo final de energia, estabelecendo-se como o principal consumidor em relação a outros setores (IEA, 2022a). Na Europa, por exemplo, os edifícios representam 40% do consumo final de energia (Eurostat, 2023). Além disso, projeções realizadas pela *International Energy Agency* (IEA) apontam que a demanda energética do setor mais que dobrará até 2050 (IEA, 2022b).

De forma semelhante, dados obtidos por meio de pesquisas realizadas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no Brasil indicam que o consumo final de energia no ano de 2022 cresceu 2,9% em relação ao ano anterior. Além disso, os edifícios (residenciais, públicos e comerciais) representam mais de 50% do consumo de energia elétrica no país (Figura 1) (EPE, 2023). Para modificar esse cenário, é fundamental adotar medidas que visem aprimorar a eficiência energética nos edifícios (Pazouki; Rezaie; Bozorgi-Amiri, 2021).

Figura 1: Participação setorial no consumo de energia elétrica.



Fonte: EPE, p. 14, 2023.

Nesse contexto, os edifícios universitários, objeto desta investigação, representam uma parcela do consumo de energia elétrica pelo setor de edificações. De acordo com Xing *et al.* (2022), o consumo de energia das universidades norte-americanas equivale a 13% do consumo total de energia final pelo setor de edificações. Kim *et al.* (2010) relataram que, na Coreia, o consumo de energia das universidades representa 13,8% do total de energia final consumida pelo setor de edificações. Alshibani (2020) destacou que, na Arábia Saudita, os edifícios universitários representam cerca de 13% do consumo total de energia final do país. Da mesma forma, na China, Liu e Ren (2020) relataram que as faculdades e universidades usam 8% da energia final consumida pelos chineses. No contexto brasileiro, os edifícios universitários estão categorizados nos grupos "público" e "comercial"; contudo, não há informações desagregadas sobre o consumo energético dessa tipologia de edificações no Balanço Energético Nacional (Garcia, 2022).

De modo geral, o consumo energético nos edifícios universitários se deve a diversas necessidades operacionais, incluindo climatização, iluminação, uso de equipamentos e manutenção de condições ambientais adequadas para ensino e pesquisa. Nesse contexto, a climatização pode ser considerada o sistema que mais consome energia em edifícios universitários, especialmente em regiões de clima quente, onde a demanda por resfriamento pode-se tornar a maior fonte de consumo de energia em um edifício universitário, podendo representar até 40% do consumo total (Litardo *et al.*, 2021; Akthar; Sujod; Rizvi, 2022). Isso ocorre por conta do ganho de calor interno, resultante das altas taxas de ocupação, do uso intensivo de equipamentos e iluminação e do ganho solar através da envoltória dos edifícios, aumentando, conseqüentemente, a carga térmica do edifício. Esses fatores contribuem para uma maior demanda de resfriamento e, logo, afetam o consumo geral de energia do edifício (Abdul Fusi; Budaiwi, 2015). Na sequência, a iluminação artificial é o que mais consome energia nos edifícios universitários, representando entre 20% e 45% do consumo total (Litardo *et al.*, 2021). Apesar de seu papel essencial na criação de ambientes de estudo e trabalho confortáveis e produtivos, a iluminação artificial constitui uma significativa fonte de consumo energético (Quevedo; Geraldi; Melo, 2023).

Outro fator importante é a idade dos edifícios universitários, muitos dos quais são antigos e não foram projetados com princípios de eficiência energética. Esses edifícios frequentemente operam com sistemas de climatização e iluminação desatualizados, o que contribui para um desperdício significativo de energia (Nagpal; Hanson; Reinhart, 2019). A eficiência energética em edifícios universitários representa um desafio considerável devido à alta demanda de energia gerada pelo tamanho dos edifícios, pelo número de usuários e pelas

diversas atividades realizadas, além de outros fatores vinculados à idade dos edifícios e as características climáticas locais. Apesar das dificuldades, otimizar esses edifícios é crucial.

Entretanto, essa otimização deve considerar também questões relacionadas à qualidade ambiental (temperatura, umidade, qualidade do ar, iluminação, acústica etc.), visto que o baixo desempenho de um edifício afeta diretamente o conforto dos usuários, resultando na utilização excessiva de sistemas de climatização e de iluminação artificial e, conseqüentemente, um aumento no consumo energético (Maciel *et al.*, 2021). Qualidade ambiental, conforto e eficiência energética tornam-se, portanto, premissas de um modelo de edificação inserida no contexto da sustentabilidade, capaz de racionalizar o consumo de energia e evitar o desperdício sem comprometer a saúde, segurança, conforto e produtividade do usuário.

Nesse contexto, Tsantili, Koronaki e Polydoros (2023) defendem a renovação em larga escala, através da implementação de estratégias de eficiência energética e adoção de tecnologias modernas em um conjunto de edifícios. Isso não apenas melhora a eficiência operacional, mas conserva recursos energéticos, oferece benefícios sociais e econômicos, além de melhorar a qualidade ambiental dos edifícios. De acordo com os autores, a aplicação de estratégias de eficiência energética em edifícios universitários reduz significativamente o consumo energético. Nesse processo, é essencial realizar simulações computacionais que permitam analisar o comportamento energético dos edifícios e identificar oportunidades para a otimização das soluções arquitetônicas e dos sistemas existentes. Essas simulações ajudam a prever o impacto das alterações propostas e a garantir que as melhorias sejam eficazes.

Diante desse desafio, diversas abordagens podem ser adotadas para melhorar a eficiência energética e a qualidade ambiental de edifícios universitários. No contexto de *retrofit* ou reabilitação de construções existentes, as características intrínsecas, como a forma e a implantação dos edifícios, apresentam limitações para mudanças significativas, o que exige uma avaliação cuidadosa da viabilidade de adaptar essas estratégias. Elementos como a morfologia das edificações, o tratamento da envoltória e o zoneamento interno desempenham papel fundamental na capacidade de aproveitamento de recursos passivos, como ventilação e iluminação naturais, pois determinam o grau de permeabilidade e as possibilidades de controle desses fluxos (Amorim, 2007).

Além disso, a adoção de soluções técnicas específicas, como a modernização dos sistemas de iluminação, climatização e de equipamentos de alto consumo energético, é uma estratégia relevante (Sun; Luo; Liu, 2021). É importante destacar que a arquitetura ocupa um papel central ao integrar essas soluções, uma vez que aspectos de projeto e escolha de

materiais impactam diretamente o desempenho ambiental e energético dos edifícios (Sassi, 2006). Essas abordagens, que se complementam, visam não só a eficiência energética, mas também a qualidade ambiental dos edifícios. Nessa perspectiva, algumas universidades brasileiras estão empenhando esforços para aprimorar a eficiência energética em seus edifícios. A Tabela 1 apresenta alguns programas nesse sentido.

Tabela 1: Programas sustentáveis e voltados para eficiência energética em algumas universidades brasileiras.

UNIVERSIDADE	PROGRAMA	SITE
Universidade de Brasília – UnB	Programa de geração de energia fotovoltaica	https://noticias.unb.br/76-institucional/4740-unb-tera-maior-planta-de-geracao-de-energia-solar-entre-as-federais
Unicamp	<i>Campus</i> Sustentável	https://www.campus-sustentavel.unicamp.br/
Universidade Federal de Pelotas - UFPel	Proben – Programa do bom uso energético	https://wp.ufpel.edu.br/proben/
Universidade Federal de Goiás - UFG	Plano de eficiência energética	https://ufg.br/n/105472-ufg-implanta-plano-de-eficiencia-energetica
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM	UMA – Universidade Sustentável	https://www.ufsm.br/pro-reitorias/proinfra/uma
Universidade Federal de Minas Gerais	Projeto Oásis	https://www.ufmg.br/sustentabilidade/projetos/oasis/

Fonte: O autor, 2024.

Em suma, pode-se conceituar eficiência energética como “(...) sistema ou processo eficiente que possibilite a redução das perdas e otimize o uso da energia” (CGEE, 2017, p. 13) sem prejuízo ao bem-estar do usuário. Além disso, a eficiência energética está relacionada à possibilidade de reduzir o consumo de energia, preservar o meio ambiente, garantir a segurança energética, reduzir custos, promover a expansão econômica e criar empregos (CGEE, 2017). É importante considerar que o termo engloba diversas ações que visam reduzir o consumo de energia, mas deve ser levado em conta o potencial de conservação de energia elétrica, o que gera múltiplos benefícios à sociedade, como a redução dos impactos no meio ambiente e o estímulo à inovação tecnológica e social (CGEE, 2017; EPE, 2020).

Além disso, a morfologia dos edifícios, sua implantação, tratamento de envoltória e zoneamento interno exercem forte influência na possibilidade de aproveitamento dos recursos passivos, como ventilação e iluminação naturais, pois influenciam o grau de permeabilidade e possibilidade de controle. Características intrínsecas aos edifícios, como forma e implantação são de difícil modificação em um contexto pré-existente, ou seja, no edifício já construído, cabendo, portanto, no caso de propostas de *retrofit* ou reabilitação, a avaliação da viabilidade de proposição destas estratégias (Amorim, 2007).

Frente a isso, várias pesquisas têm sido realizadas para avaliar o desempenho dos edifícios, buscando aprimorar tanto a eficiência energética quanto a qualidade ambiental. Esse movimento tem impulsionado a adoção de conceitos inovadores na construção, reabilitação e *retrofit* dos edifícios. Dentre esses conceitos, destaca-se o edifício de balanço energético nulo ou quase nulo (*Zero Energy Building*, ZEB). Um ZEB objetiva reduzir o consumo de energia a partir do aproveitamento dos recursos passivos, inserção de sistemas ativos e de geração de energia renovável local (Al-Saadi *et al.*, 2023). Na literatura revisada vários estudos investigaram e propuseram estratégias para transformação de edifícios existentes em ZEBs. Um exemplo, é a iniciativa da *SHC Task 40 Net Zero Energy Solar Building* (IEA, 2013) que selecionou 30 edifícios para análise, na qual, cada edifício foi descrito de maneira consistente, abordando informações gerais, soluções passivas, soluções energeticamente eficientes e sistemas de energia renovável. Outro exemplo, é a pesquisa *SHC Task 59 Renovating Historic Buildings Towards Zero Energy* (IEA, 2021), que selecionou 73 edifícios para análise. Essa iniciativa se concentrou na documentação das melhores práticas de *retrofit*, visando apoiar os processos de planejamento em direção aos edifícios de balanço energético nulo (ZEBs).

Entretanto, a maioria das pesquisas tem se concentrado na otimização de edifícios isolados, o que pode resultar em uma subotimização do processo de renovação. Essa abordagem não leva em consideração o potencial de interações entre os edifícios, deixando de aproveitar os benefícios que podem ser obtidos em nível comunitário como um todo (Rose *et al.*, 2021). Nessa linha, trabalhar com um grupo de edifícios oferece a oportunidade de explorar as interações entre eles e acelerar o processo de redução do consumo energético no setor. Ao considerar o desempenho energético em escala de grupo – como um campus universitário, por exemplo – é possível identificar e implementar estratégias mais abrangentes e eficientes, que otimizem o uso de recursos e gerem benefícios sociais, econômicos e ambientais (Terés-Zubiaga *et al.*, 2020; Tsantilli; Koronaki; Polydoros, 2023).

Um exemplo disso é o projeto IEA EBC *Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables* (IEA, 2023), que se concentrou na renovação de edifícios em nível distrital, combinando eficiência energética com o uso de energias renováveis. A principal conclusão do *Annex* é que devem ser realizadas avaliações para cada projeto de renovação distrital, uma vez que não existem soluções prontas para esse fim. Observa-se, no entanto, que o estudo realizado possui algumas limitações que dizem respeito a) ao número relativamente pequeno de estudos de caso; b) e a complexidade da avaliação de aspectos qualitativos e quantitativos de uma variedade de países, antecedentes e objetivos socioeconômicos (Rose *et al.*, 2021). Além disso, é relevante enfatizar que todos

os estudos de caso escolhidos estão localizados em climas com demanda por aquecimento, especificamente na Europa, carecendo, portanto, da ampliação do estudo para outros cenários climáticos.

Até o ponto examinado na literatura revisada, não foram identificados estudos que abordem a integração de análises de edifícios individuais em direção ao conceito de balanço energético nulo (ZEB) e a aplicação dessas estratégias para um grupo de edifícios em um campus universitário, especificamente em regiões com características climáticas específicas, como Brasília. Esta lacuna na pesquisa destaca a necessidade de investigações que se concentrem na transição eficaz de edifícios individuais para um grupo de edifícios, levando em conta as características climáticas distintas da região. Esta pesquisa se insere, ainda, nas discussões contemporâneas dos ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, enquadrando-se nos ODS 7 – Energia limpa e acessível; ODS 11 – Cidades e comunidades sustentáveis; e ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima, e na pesquisa em desenvolvimento no Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética da Universidade de Brasília (LACAM/UnB), subsidiada pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF), denominada ZEB - Zero Energy Brasília: Plano estratégico de eficiência energética para parque construído de balanço energético nulo.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação é avaliar a viabilidade de transformação de edifícios universitários em edifícios de balanço energético nulo (*Zero Energy Buildings - ZEB*), por meio do estudo e aplicação de diferentes estratégias em edifícios representativos do *Campus Darcy Ribeiro* da Universidade de Brasília (Brasília-DF).

1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- I. Caracterizar o desempenho termoenergético de edifícios representativos do *Campus Darcy Ribeiro*, considerando os usos finais de energia, as condições de conforto térmico e a qualidade da iluminação natural;
- II. Analisar o potencial de diferentes estratégias passivas e ativas para a redução do consumo energético e melhoria do conforto térmico e da qualidade da iluminação natural, considerando o contexto climático de Brasília-DF e as características específicas dos edifícios estudados;

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo inicia-se com uma breve contextualização sobre o tema, destacando sua relevância, delineando os objetivos, o problema e a estrutura dos elementos textuais que compõem a dissertação. O segundo capítulo apresenta o referencial teórico utilizado para o desenvolvimento da pesquisa, trazendo explicações sobre edifícios de balanço energético nulo (ZEB). O terceiro capítulo apresenta os materiais e método empregados nesta pesquisa, fornecendo uma explicação minuciosa dos passos metodológicos e procedimentos adotados em cada fase da investigação, delineados com o propósito central de alcançar os objetivos predefinidos para este estudo. O quarto capítulo focaliza o objeto de estudo, a Universidade de Brasília, além de fornecer a caracterização climática da cidade de Brasília-DF e a caracterização detalhada dos edifícios estudos de casos. No quinto capítulo são exibidos os resultados relativos aos edifícios analisados. Isso envolve o diagnóstico da situação atual dos edifícios, bem como os resultados das simulações, resultando em uma análise do balanço energético dos edifícios. No sexto capítulo, estão apresentadas as conclusões derivadas da pesquisa, as dificuldades encontradas, e a identificação de lacunas no conhecimento, apontando possíveis direções para futuros estudos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, apresenta-se o referencial teórico-bibliográfico sobre os principais conceitos abordados neste estudo, como as legislações pertinentes e definição do recorte específico adotado para esta pesquisa.

2.1. EDIFÍCIO DE BALANÇO ENERGÉTICO NULO (ZEB – ZERO ENERGY BUILDING)

Um edifício de balanço energético nulo, ou *Zero Energy Building* (ZEB), tem como objetivo reduzir sua demanda energética por meio de estratégias de projeto e gerar localmente uma quantidade de energia renovável equivalente ao total consumido pelo próprio edifício ao longo de um ano. Isso é viabilizado a partir da combinação de estratégias passivas (ventilação e iluminação naturais, proteção solar, utilização de vidros eficientes etc.), ativas (sistemas de iluminação e condicionamento de ar eficientes, controles, automação etc.) e sistemas de geração de energia renovável (Rey-Hernández *et al.*, 2018; D'agostino; Mazzarella, 2019; Lohwanitchai; Jareemit, 2021; Ohene; Hsu; Chan, 2022).

Dessa forma, os ZEBs se destacam como construções de elevada eficiência energética, evidenciando-se pela capacidade de reduzir o consumo de energia elétrica em diversos sistemas, como iluminação, climatização, equipamentos e outros. Além dessa característica, os ZEBs se distinguem pelo seu papel como geradores de energia elétrica a partir de fontes renováveis, que são interligadas à rede de energia elétrica convencional. Essa abordagem estabelece um equilíbrio, onde a quantidade de energia importada desses edifícios da rede elétrica é praticamente nula ao longo de um ano de análise (D'agostino; Mazzarella, 2019; Feng *et al.*, 2019; Ohene; Hsu; Chan, 2022).

Nesse contexto, um estudo abrangente foi desenvolvido por Feng *et al.* (2019) sobre ZEBs em climas quentes e úmidos. Os autores investigaram 34 casos de ZEB em diversas regiões, a partir dos quais foram compiladas as principais estratégias de projeto, escolhas tecnológicas e desempenho energético desses edifícios. A conclusão do estudo indicou que as estratégias passivas como iluminação natural e ventilação natural são frequentemente adotadas para ZEBs em climas quentes e úmidos, associadas à geração de energia elétrica por meio de fontes de energia renovável (Feng *et al.*, 2019).

Ohene, Hsu e Chan (2022) contribuíram para o cenário ao investigar a viabilidade e propor diretrizes de *retrofit* para atingir metas de balanço energético nulo em edifícios existentes em climas tropicais. A conclusão do estudo indicou que as estratégias passivas como ventilação natural, sombreamento e iluminação natural podem reduzir até 50% da

demanda total de energia do edifício, e que por meio da geração de energia renovável local é possível chegar a um ZEB (Ohene; Hsu; Chan, 2022).

Com base nesses estudos, torna-se evidente que para se alcançar um balanço energético nulo ou quase nulo é crucial levar em consideração três pilares fundamentais (Figura 2):

a) Implementação de estratégias passivas:

Abordagens que exploram as características do clima local para otimizar o desempenho térmico e lumínico da edificação, reduzindo a dependência de sistemas mecânicos ativos. Isso inclui o maior aproveitamento da ventilação e da iluminação natural, a aplicação de dispositivos de proteção solar e o uso de materiais eficientes, proporcionando a redução do consumo energético e a criação de ambientes mais confortáveis e agradáveis (Feng *et al.*, 2019; Duarte; Rosa-Jiménez, 2022; Ohene; Hsu; Chan, 2022);

b) Implementação de estratégias ativas:

Abordagens que envolvem intervenção direta e controle ativo para otimizar o uso e a produção de energia. Isso inclui a utilização de equipamentos de alta eficiência energética, juntamente com sistemas eficazes de controle e automação. Essas estratégias visam melhorar a eficiência operacional do edifício, reduzindo o consumo de forma proativa (Feng *et al.*, 2019; Duarte; Rosa-Jiménez, 2022; Ohene; Hsu; Chan, 2022);

c) Geração de energia a partir de fontes renováveis, como a energia solar fotovoltaica e eólica: Essas fontes sustentáveis não apenas fornecem eletricidade limpa, mas têm o potencial de compensar ou até mesmo superar o consumo de energia do edifício, possibilitando um balanço energético nulo ou positivo (Feng *et al.*, 2019; Duarte; Rosa-Jiménez, 2022; Ohene; Hsu; Chan, 2022).

Figura 2: Pilares fundamentais para um ZEB.



Fonte: Feng *et al.*, 2019; Ohene; Hsu; Chan., 2022; adaptado pelo autor.

A combinação eficaz dessas três estratégias não apenas reduz o consumo de energia de um edifício, mas assegura seu alto desempenho ambiental e energético. Além disso, a integração dessas estratégias não apenas minimiza a dependência de fontes não-renováveis, mas promove a resiliência energética e ambiental dos edifícios (Feng *et al.*, 2019; Ohene; Hsu; Chan, 2022).

Outros fatores relevantes nesse contexto dizem respeito à forma, ao tamanho e à orientação solar do edifício, visto que esses fatores desempenham papéis determinantes na demanda energética. No que diz respeito à forma arquitetônica, sabe-se que a forma ótima de um edifício é aquela que minimiza a perda de calor no inverno e a absorção de calor no verão (Cortinhas, 2022). A INI-C apresenta que o fator de forma (FF) representa a relação entre a área de envoltória e o volume total da edificação (PROCEL, 2021). Em climas predominantemente quentes, uma edificação com um fator de forma maior é favorecida, pois facilita a dissipação do calor. Nesse contexto, uma forma menos compacta se mostra mais eficiente (Moita *apud* Cortinhas, 2022). No que diz respeito ao tamanho do edifício, prédios de baixa altura, com quatro ou cinco andares, têm uma maior probabilidade de se tornarem ZEBs. Isso ocorre devido às limitações na produção de energia fotovoltaica na cobertura de edifícios de médio e grande porte, que muitas vezes não conseguem gerar energia suficiente para cobrir seu consumo total (Costa; Amorim; Silva, 2020). No que diz respeito a orientação do edifício, ela desempenha um papel crucial na eficácia das estratégias passivas, visto que essas estratégias são diretamente influenciadas pela forma como o edifício interage com as

condições climáticas locais, como a radiação solar, os ventos predominantes e a temperatura ambiente (Costa; Amorim; Silva, 2020). No entanto, em edifícios já construídos, a possibilidade de modificar esses fatores é limitada, uma vez que a forma, o tamanho e a orientação do edifício já estão consolidados. Nesses casos, é essencial analisar a viabilidade de propostas de *retrofit* (Amorim, 2007).

2.1.1. *Retrofit* de edifícios universitários em direção ao balanço energético nulo

Embora o conceito de balanço energético nulo seja mais comum em novas construções, onde a otimização energética pode ser considerada desde as primeiras etapas de projeto, é crucial não negligenciar os edifícios existentes ao buscar melhorias no desempenho energético (Gonçalves; Baker, 2015). Adaptar um edifício existente para se tornar um ZEB envolve mais do que apenas medidas ativas relacionadas ao uso de energia; é fundamental maximizar o uso das estratégias passivas, visando proporcionar maior conforto aos ocupantes e reduzir a demanda energética. Portanto, o foco dessas intervenções deve priorizar sempre as medidas passivas antes de recorrer a sistemas que consomem energia (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2015). Isso ressalta o papel central da arquitetura na busca por soluções que promovam edifícios mais sustentáveis, com melhor desempenho energético e maior conforto e saúde para seus ocupantes.

Por meio da revisão sistemática de literatura, identificou-se diversas estratégias voltadas para a eficiência energética em edifícios universitários existentes, algumas delas em direção ao ZEB. Para atendimento dos objetivos dessa dissertação, selecionou-se alguns trabalhos que utilizaram estratégias passivas e ativas visando alcançar eficiência energética. Essas estratégias abarcam a utilização de equipamentos energeticamente eficientes, substituição de vidros, troca de lâmpadas e luminárias, incorporação de proteção solar, e a maximização do uso de iluminação natural.

É importante acrescentar que os trabalhos selecionados não foram necessariamente realizados no mesmo contexto climático desta dissertação. No entanto, o intuito foi compreender as estratégias aplicadas, identificar os métodos utilizados e avaliar como essas abordagens podem ser extrapoladas para outros edifícios do *campus* universitário em situações análogas.

A Tabela 2 resume algumas abordagens e métodos utilizados na busca por eficiência energética e conservação de energia em edifícios universitários encontrados na literatura revisada.

Tabela 2: Estratégias para eficiência energética em edifícios universitários.

REFERÊNCIA	ABORDAGEM	MÉTODO
Elnagar, Munde e Lemort., 2021	Uso de estratégias ativas e passivas para eficiência energética	- Simulação computacional – <i>SketchUp</i> + plugin Sefaira para simular o consumo de energia; Polysun para simular a produção de energia (solar térmica e solar fotovoltaica)
Litardo <i>et al.</i> , 2021		- Simulação computacional – <i>DesignBuilder</i> + <i>Energy Plus</i> para simular o desempenho energético
Yildiz; Koçyiğit, 2020		- Simulação computacional – <i>DesignBuilder</i> + <i>Energy Plus</i> para simular o desempenho energético
Tsantili; Koronaki; Polydoros, 2023	Melhorias na envoltória (estratégias passivas), com análises de conforto térmico e eficiência energética	- Simulação computacional - <i>Software Autodesk Revit</i> para simular as cargas térmicas e de resfriamento; <i>Audodesk Insight</i> e <i>Green Building Studio</i> para simular o desempenho energético
Salvalai <i>et al.</i> , 2020		- Simulação computacional – <i>SketchUp</i> + plugin TRNSYS v.18 para simular o efeito da inércia térmica da envoltória
Sandhya, Anand, Prasad, 2019		- Simulação computacional – <i>Energy Plus</i> + DOE-2 para identificação da melhor configuração de envoltória
Rey-Hernández <i>et al.</i> , 2018	Análise energética de um edifício universitário nZEB	- Simulação computacional – <i>DesignBuilder</i> para simular o desempenho energético do edifício

Fonte: O autor, 2023.

O estudo conduzido por Elnagar, Munde e Lemort (2021) concentrou-se no *retrofit* de um pavilhão localizado no Otto Wagner Areal (OWA), o novo *campus* da Central European University (CEU) no oeste de Viena, visando sua transformação em um edifício de balanço energético positivo. O objetivo era melhorar seu desempenho energético e potencial de geração de energia preservando as características históricas do edifício. Para alcançar essa meta, foram realizadas intervenções na envoltória do edifício e adição de sistema de geração de energia renovável. Para as análises, todas as modificações foram simuladas utilizando a ferramenta Sefaira integrada ao modelo *SketchUp* (Elnagar, Munde e Lemort, 2021).

Por se tratar de uma região com demanda por aquecimento, as intervenções incluíram melhorias no isolamento térmico da cobertura, paredes e piso. Tais alterações resultaram em uma redução notável no consumo anual de energia, diminuindo de 235,3 kWh/m².ano para 54,3 kWh/m².ano, representando uma queda de 78,2%. Adicionalmente, um sistema

fotovoltaico foi implementado, contribuindo com 22,5% da demanda anual de energia do pavilhão renovado (Elnagar, Munde e Lemort, 2021).

Embora o contexto climático seja diferente do abordado nesta dissertação, o estudo de Elganar, Munde e Lemort (2021) selecionou um edifício representativo do *campus* como modelo para análise e proposta de *retrofit*. Considerando a similaridade entre os edifícios do *campus*, as estratégias testadas nesse modelo poderiam ser aplicadas aos demais, contribuindo para a criação de um *campus* energeticamente eficiente.

No estudo conduzido por Yildiz e Koçyiğit (2020), foram exploradas algumas estratégias de economia de energia em quatro edifícios localizados no *campus* da Universidade de Balikesir, na Turquia. A pesquisa focou na aplicação de medidas de eficiência energética, com o objetivo de investigar o potencial de redução do consumo de energia nesses edifícios. Todas as estratégias propostas foram submetidas a simulações, e os dados de faturamento de energia desempenharam um papel fundamental na calibração e adaptação dos modelos de simulação, os quais foram desenvolvidos utilizando o *software DesignBuilder*. As estratégias testadas incluem: a) isolamentos térmicos na envoltória, para limitar a transferência de calor pelas superfícies opacas; b) alteração do tipo do vidro, para melhorar a transmitância térmica e o fator solar; c) proteção solar nas aberturas; d) alteração na iluminação artificial e condicionamento do ar para equipamentos mais eficientes (Yildiz e Koçyiğit, 2020).

O resultado das simulações demonstrou que o isolamento térmico se mostrou capaz de diminuir o consumo de energia entre 14% e 31%, enquanto a substituição de janelas por vidros mais eficientes resultou em uma economia de 11%. Além disso, a troca das lâmpadas por modelos mais eficientes destacou-se como uma medida eficaz, possibilitando uma redução superior a 60% no consumo de energia para iluminação artificial em todos os edifícios estudados. Essas descobertas apontam para um considerável potencial de *retrofit* nos *campi* universitários, abrangendo estratégias que incluem tanto abordagens passivas quanto ativas, bem como combinações delas (Yildiz e Koçyiğit, 2020).

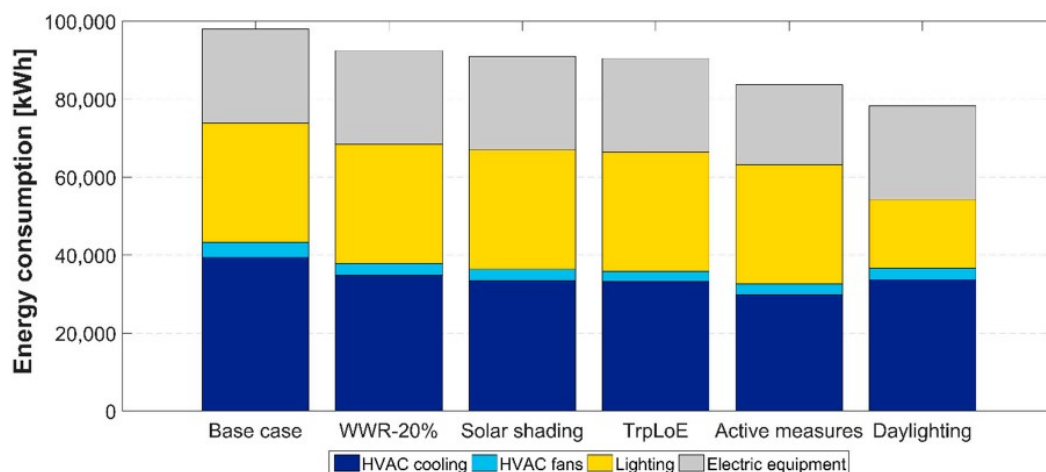
O estudo de Yildiz e Koçyiğit (2020) foi apresentado para elucidar possíveis intervenções em edifícios universitários. Embora os resultados das simulações sejam promissores, é importante considerar que a eficácia das estratégias de *retrofit* pode variar significativamente em função de fatores como o estado atual dos edifícios, o clima local e a viabilidade econômica das intervenções.

Além disso, é crucial destacar que a aplicação de isolamento térmico deve ser cuidadosamente planejada quando aplicada em climas quentes e tropicais. Em regiões com altas temperaturas, o uso inadequado de isolamento pode resultar em um aumento indesejado da carga térmica interna e, portanto, exigindo um controle adicional da ventilação e refrigeração. Portanto, a escolha de materiais e técnicas de isolamento deve levar em conta a dinâmica térmica específica do local para garantir que as intervenções realmente promovam um ambiente interno confortável e eficiente (Souza *et al.*, 2022).

No estudo realizado por Litardo *et al.* (2021), foi conduzida uma análise comparativa do potencial de economia de energia elétrica de várias estratégias, tanto passivas quanto ativas, juntamente com a implementação de um sistema fotovoltaico conectado à rede. O foco dos autores foi uma unidade de bem-estar estudantil (moradia universitária) localizada em um *campus* universitário na cidade tropical de Guayaquil, Equador. O objetivo do estudo foi identificar a estratégia mais eficaz para economia de energia elétrica em *retrofit* de edifícios em clima tropical. Para isso, a condição inicial do edifício foi modelada, e diversos cenários de economia de energia foram avaliados de forma independente: a) integração da luz natural com a iluminação artificial por meio de sistema de controle; b) redução de PAF; c) proteção solar nas aberturas; d) alteração do tipo de vidro; e) medidas ativas: melhorias nos aparelhos de ar-condicionado, alteração de *set-point* e substituição de equipamentos e aparelhos elétricos. As simulações de desempenho do edifício foram realizadas com o *software OpenStudio - Energy Plus*, enquanto a análise da geração de energia local foi feita com o *software Homer PRO* (Litardo *et al.*, 2021). Os resultados mostraram que a incorporação de controles de iluminação natural foi a estratégia mais eficaz em termos de economia de energia elétrica, com uma redução de cerca de 20% no consumo total do edifício, conforme apontado na Figura 3. Quando essa abordagem foi combinada com o uso de vidros triplos de baixa emissividade e medidas ativas, a economia de energia alcançou cerca de 35% no consumo total de energia e 43% nas cargas de resfriamento (Litardo *et al.*, 2021).

A Figura 3 apresenta o consumo anual de energia elétrica por uso final estimado para cada cenário proposto:

Figura 3: Consumo anual de energia elétrica por uso final estimado para cada cenário proposto.



Fonte: Litardo *et al.*, 2021.

Em relação à geração de energia local, o sistema solar fotovoltaico conectado à rede produziu um total anual de 66.590 kWh de eletricidade, dos quais 48.497 kWh foram consumidos diretamente pelo edifício, com o excedente sendo injetado na rede elétrica (Litardo *et al.*, 2021). Embora o estudo forneça insights valiosos sobre a eficiência energética, algumas limitações e aspectos críticos merecem ser destacados.

Primeiramente, a escolha de vidros triplos de baixa emissividade como parte das soluções propostas levanta questões sobre a viabilidade econômica e prática em climas tropicais. Embora eficazes na redução de cargas térmicas, esses vidros são mais adequados para climas frios, onde a perda de calor é uma preocupação maior (Ballarini *et al.*, 2019). Em regiões tropicais, onde o foco principal é evitar o ganho de calor, o uso de dispositivos de controle solar poderia ser uma alternativa mais adequada e economicamente viável (Kunwar *et al.*, 2020).

Além disso, o estudo poderia ter explorado mais profundamente a interação entre as diferentes estratégias passivas e ativas. A abordagem isolada de cada estratégia não reflete completamente as complexidades e sinergias que podem surgir quando combinadas. Um modelo integrado que considerasse as interações entre todas as intervenções poderia fornecer uma visão mais holística e realista dos potenciais ganhos em eficiência energética.

Com base no exposto, esta dissertação priorizou o uso das **estratégias passivas**, com ênfase na **otimização da iluminação natural e no conforto térmico através do controle da radiação solar**, respeitando as condições climáticas locais, e aproveitando ao máximo os recursos naturais disponíveis sem recorrer a sistemas mecânicos que demandam energia.

2.1.2. Estratégias passivas e ativas

Na literatura revisada, identificou-se uma série de estudos dedicados à otimização da eficiência energética de edifícios existentes em direção ao balanço energético nulo. Esses estudos exploraram estratégias tanto passivas quanto ativas em diversos cenários. A Tabela 3 sintetiza as principais abordagens identificadas nesse contexto.

Tabela 3 – Estratégias passivas e ativas identificadas na literatura.

ABORDAGEM	ESTRATÉGIA	REFERÊNCIA
Passiva	Dispositivos de sombreamento <i>fixo ou móvel</i>	Al-Saadi, 2023 Albatayneh, 2021 Lohwanitchai; Jareemit, 2021 Yildiz; Koçyiğit, 2020 Kunwar <i>et al.</i> , 2020 Ballarini <i>et al.</i> , 2019
	Vidros de alto desempenho <i>redução e/ otimização de transmitância térmica, fator solar e transmissão luminosa</i>	Al-Saadi, 2023 Jia <i>et al.</i> , 2023 Albatayneh, 2021 Lohwanitchai; Jareemit, 2021 Rucińska; Trzaski, 2020 Litardo <i>et al.</i> , 2021 Kunwar <i>et al.</i> , 2020 Ballarini <i>et al.</i> , 2019 Lan; Wood; Yuen, 2019
	Relação Parede-Janela <i>percentual de abertura nas fachadas PAF</i>	Jia <i>et al.</i> , 2023 Lohwanitchai; Jareemit, 2021 Rucińska; Trzaski, 2020 Litardo <i>et al.</i> , 2021 Kunwar <i>et al.</i> , 2020 Ballarini <i>et al.</i> , 2019 Lan; Wood; Yuen, 2019
	Cores <i>paredes e/ou cobertura</i>	Lohwanitchai; Jareemit, 2021 Yildiz; Koçyiğit, 2020
	Materiais frios <i>paredes e/ou cobertura</i>	Castaldo <i>et al.</i> , 2018 Cabeza; Garcia; Pisello, 2018 Yildiz; Koçyiğit, 2020 Correia, 2024
Ativa	Sistema de iluminação eficiente <i>LED, controles e/ou automação</i>	Jia <i>et al.</i> , 2023 Lohwanitchai; Jareemit, 2021 Rucińska; Trzaski, 2020 Litardo <i>et al.</i> , 2020 Ballarini <i>et al.</i> , 2019
	Sistema de condicionamento do ar eficiente <i>equipamentos e/ou controle de setpoint</i>	Jia <i>et al.</i> , 2023 Tsantilli; Koronaki; Polydoros, 2023 Lohwanitchai; Jareemit, 2021 Litardo <i>et al.</i> , 2021 Ballarini <i>et al.</i> , 2019

Fonte: O autor, 2024.

Acerca da otimização da iluminação natural, primeiramente, recorda-se que o termo “iluminação natural” se refere à utilização da luz solar direta ou difusa como fonte para iluminar espaços internos ou externos. Esse tipo de iluminação é alcançado por meio da entrada direta ou indireta da luz solar através de aberturas, como janelas, portas, claraboias e outros dispositivos similares. A iluminação natural é apreciada por seus benefícios, incluindo a redução da dependência de iluminação artificial, a promoção de ambientes mais saudáveis e a contribuição para a eficiência energética nos edifícios. Sua eficácia está relacionada à orientação do edifício, projeto arquitetônico, percentual de aberturas nas fachadas e ao uso adequado de elementos como vidros, dispositivos de sombreamentos e materiais que permitam a passagem da luz solar (Ballarini *et al.*, 2019; Feng *et al.*, 2019; Ohene; Hsu; Chan, 2022).

A iluminação natural é importante na vida das pessoas, pois é necessária para a visão, é importante para a saúde e bem-estar do indivíduo, e pela sua disponibilidade em abundância (Knoop *et al.* 2020). Além disso, a exposição à iluminação natural desempenha um papel crucial na regulação do ciclo circadiano, marcando os ritmos naturais do amanhecer e anoitecer. Isso é essencial para sincronizar o ciclo sono-vigília, vinculando-se diretamente à qualidade do sono, à saúde, ao humor, às habilidades cognitivas e ao bem-estar (Knoop *et al.*, 2020; Krusselbrink; Dangol; Rosemann. 2018).

No que diz respeito à arquitetura, a iluminação natural pode afetar diretamente a percepção dos espaços e objetos pelos indivíduos, devido a questões como direcionalidade, intensidade, distribuição e difusão. O excesso de luz em um ambiente, por exemplo, pode resultar em ofuscamento, prejudicando o desempenho visual e causando fadiga. Por esse motivo, a qualidade da iluminação natural é extremamente importante, pois desempenha um papel crucial na satisfação e bem-estar geral (Knoop *et al.*, 2020; Turan *et al.*, 2020).

Nesse contexto, Kunwar *et al.* (2020) realizaram uma análise que envolveu a utilização de dispositivos de sombreamento, dois tipos de vidro e sistemas de controle de iluminação em uma sala de teste. Os autores observaram que os dispositivos de sombreamento podem reduzir o consumo de energia de um edifício e criar um ambiente interno mais confortável. Da mesma forma, os controles de iluminação contribuem para a redução do consumo energético da iluminação e das cargas internas. A pesquisa utilizou duas estratégias de controle diferentes, em três orientações distintas (leste, oeste e sul) e sob três condições de céu variadas (claro, nublado e encoberto). Os dispositivos de sombreamento (persianas dinâmicas) foram combinados com dois tipos de vidro.

Os testes foram realizados no *Energy Resource Station (ERS)* do *Iowa Energy Center*, em Iowa (EUA), entre 28 de março de 2017 e 14 de setembro de 2017, abrangendo duas estações intermediárias e uma estação de verão. Foram avaliados o desempenho em economia de energia, controle de ofuscamento e disponibilidade de luz natural. A economia de energia na iluminação foi semelhante em todas as orientações, independentemente dos tipos de vidro, enquanto diferenças significativas foram encontradas na economia de energia para resfriamento (Kunwar *et al.*, 2020).

O sistema integrado proporcionou uma economia diária média de 2,55 kWh para resfriamento e 2,54 kWh para iluminação, resultando em uma economia média de 25,4% para resfriamento e 48,5% para iluminação ao longo de um ano. A variabilidade na economia de energia para resfriamento foi muito maior do que para iluminação.

Durante os testes, a probabilidade de ofuscamento foi mantida em níveis imperceptíveis por mais de 85% do tempo, graças às persianas dinâmicas combinadas com controles de iluminação. A probabilidade de desconforto visual devido ao ofuscamento foi maior nas orientações leste e oeste, devido à incidência de luz solar direta em ângulos baixos durante as manhãs e tardes, respectivamente (Kunwar *et al.*, 2020).

Quanto à disponibilidade de luz natural, foi observada uma redução do excesso de iluminância perto das janelas, aumentando o tempo em que a luz natural permaneceu na faixa útil de Iluminância útil da luz do dia (UDI - *Useful Daylight Illuminance*). Mais distante das janelas, houve uma leve redução na iluminância útil, sugerindo que um controle da iluminação baseado na distância da janela pode ser vantajoso, especialmente em espaços amplos, ajustando o fluxo de luz natural conforme necessário (Kunwar *et al.*, 2020).

Outros estudos têm mostrado reduções consideráveis no consumo de energia com o uso de sistemas de controle de componentes da iluminação. Doulos *et al.* (2019) conduziram uma análise em salas de aula típicas de escolas públicas na Grécia, investigando diversas tecnologias de iluminação, com luminárias de LED e luminárias com lâmpadas fluorescentes T5, tanto com fornecimento em corrente alternada (AC) quanto em corrente contínua (DC), além de dois sistemas distintos de controle da luz artificial. O primeiro sistema utiliza um fotossensor em cada luminária individualmente, enquanto o segundo emprega um fotossensor por zona de controle, com o objetivo de avaliar as economias de energia e a adequação da iluminação artificial em relação à disponibilidade de luz natural (Kunwar *et al.*, 2020).

Em termos de potência instalada, as luminárias com driver AC (corrente alternada) mostraram-se mais eficientes do que as luminárias DC (corrente contínua), com uma redução de 18% no consumo de energia para a mesma quantidade de luz emitida. No entanto, as

luminárias DC se destacaram em termos de desempenho durante a redução, apresentando uma redução de consumo de 21,7% em comparação com as luminárias AC. Devido à sua curva de atenuação, as luminárias DC foram consideradas mais eficazes em níveis baixos de iluminação. A diferença na economia de energia entre as duas amostras de luminárias DC de fabricantes diferentes foi de 2%. Embora as luminárias LED tenham demonstrado uma eficiência energética muito superior às luminárias com lâmpadas fluorescentes T5, os valores de fator de potência dessas luminárias são mais baixos quando atenuadas. Contudo, as luminárias LED com fornecimento DC não apresentam perdas de energia associadas ao fator de potência, já que não há potência aparente (Kunwar *et al.*, 2020).

A escolha do sistema de controle por fotossensor é igualmente importante. A comparação entre o Cenário I (fotossensor central) e o Cenário II (múltiplos fotossensores, um para cada luminária) revelou uma diferença de até 70% a favor do fotossensor central. No entanto, a adequação da iluminação foi melhor com o uso de múltiplos fotossensores, e, como a diferença absoluta é pequena (0,07 kWh/m²), seu uso é preferido. A combinação de luminárias DC com controle por múltiplos fotossensores pode resultar em valores LENI (Lighting Energy Numeric Indicator) entre 0,55 e 0,66 kWh/m², com um consumo elétrico máximo de 34,2 kWh por sala de aula por ano. Isso indica que quase todas as escolas na Grécia estão desperdiçando até 98,25% da economia potencial de energia elétrica para iluminação artificial, devido à presença de luz natural (Kunwar *et al.*, 2020).

Por um lado, a luz natural é desejável para proporcionar uma iluminação natural agradável e reduzir a dependência de fontes artificiais de luz durante o dia. A luz natural pode melhorar o conforto visual, promover o bem-estar dos ocupantes e até mesmo reduzir os custos de energia associados à iluminação artificial. Por outro lado, a radiação solar direta pode aumentar a carga térmica nos ambientes internos, resultando em superaquecimento, desconforto térmico e aumento do consumo de energia para resfriamento. Portanto, é essencial encontrar um equilíbrio entre permitir a entrada de luz natural suficiente para iluminação e controlar a quantidade de calor transmitido pela radiação solar direta para manter um ambiente interno confortável e eficiente em termos energéticos (Litardo; Hidalgo-Leon; Soriano, 2021).

Marino, Nucara e Pietrafesa (2017) destacaram que, em regiões de clima quente, quando a área envidraçada de uma janela representa mais de 25% (Figura 5) da área da envoltória, torna-se fundamental o uso de dispositivos de sombreamento para otimizar a eficiência energética. Os autores enfatizam que essa medida é mais eficaz do que aprimorar as propriedades da envoltória do edifício (Marino; Nucara; Pietrafesa, 2017). Além disso,

quando o PAF é superior a 50% da área da envoltória pode resultar em aumento nos ganhos térmicos no interior do edifício, aumentando, conseqüentemente, o consumo de energia para resfriamento (Alghoul; Rijabo; Mashena, 2017).

Com base no exposto, depreende-se que a integração harmoniosa da radiação solar e da iluminação natural na arquitetura não apenas reduz o consumo de energia, mas propicia ambientes mais confortáveis e saudáveis para os seus ocupantes. Para alcançar essa harmonia, é fundamental considerar o bom dimensionamento das aberturas (PAF), o uso de dispositivos solares, como brises ou outros elementos de sombreamento, bem como a seleção adequada de vidros com propriedades específicas de controle solar. É importante destacar que, nesta dissertação, não será realizada a avaliação de diferentes tipos de PAFs, considerando que o foco da investigação é a otimização de edifícios já existentes, nos quais a alteração do PAF não se apresenta como uma estratégia viável.

No que diz respeito ao conforto térmico, para além das estratégias anteriormente citadas, tem-se ainda o uso de materiais frios. A definição mais consolidada para materiais frios na literatura é que são materiais que possuem alta refletividade solar e alta emissividade infravermelha, sendo capazes de refletir a luz solar direta ou difusa incidente e re-irradiar o calor anteriormente absorvido. Essas duas propriedades são sensíveis à camada mais externa da superfície exposta à radiação solar. Por esse motivo, os materiais frios são chamados de "revestimentos" para aplicações superficiais (Pisello, 2017). A variação desses dois parâmetros depende de fatores como natureza do material (natural ou artificial), textura da superfície, cor, composição química, tipo de substrato aplicado, espessura e quantidade de camadas de material (Santamouris; Yun, 2020).

De acordo com Fabiani *et al.* (2022), os materiais frios são caracterizados (i) pela alta refletância solar (SR), que representa a capacidade do material de refletir a radiação solar incidente, e (ii) emissividade térmica elevada (ϵ), isto é, a capacidade de liberar o calor armazenado do ambiente circundante. Combinar essas duas propriedades faz com que materiais frios reflitam a maior parte da radiação solar incidente e, ao mesmo tempo, reemitam a maior parte da absorvida. Portanto, sua superfície atinge temperaturas mais baixas em comparação com materiais semelhantes com SR e ϵ relativamente mais baixos. Esses materiais são adequados para aplicações em diferentes superfícies urbanas (telhados, pavimentos, fachadas de edifícios) e melhoram as condições de conforto térmico em ambientes internos e externos (Fabiani *et al.*, 2022).

A aplicação de materiais frios na envoltória dos edifícios proporciona benefícios significativos, uma vez que melhora as condições de conforto térmico tanto interna quanto

externamente durante o verão. Quando utilizados em telhados e fachadas, os materiais frios têm o potencial de reduzir o consumo de energia para resfriamento. Além disso, ao serem empregados como uma técnica de resfriamento passivo, podem aprimorar as condições de conforto térmico interno durante os meses mais quentes. Assim, os materiais frios se destacam como medidas eficazes para enfrentar as crescentes tendências de consumo de energia para resfriamento em áreas urbanas (Pisello, 2017).

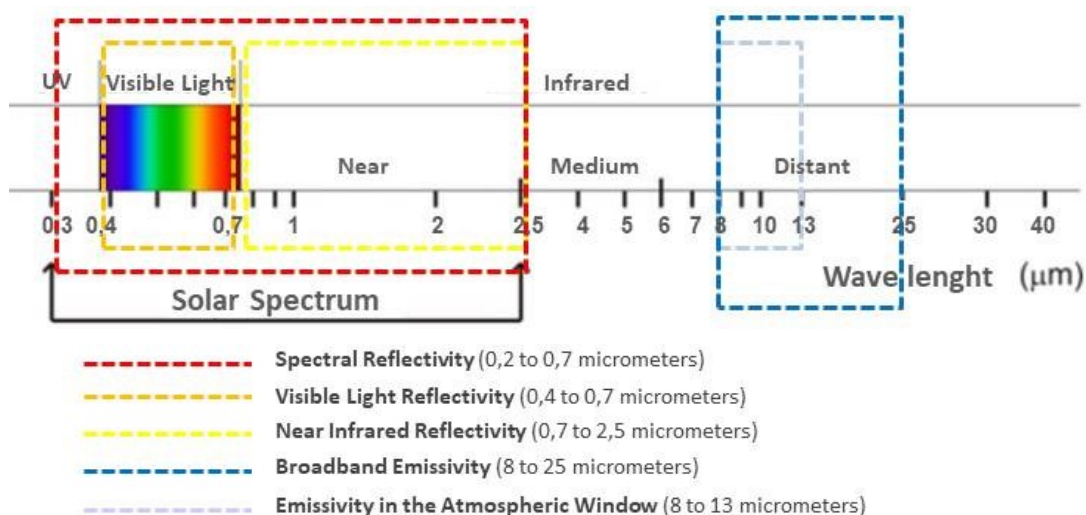
A primeira geração de materiais frios consistia em materiais naturais, caracterizados por alto albedo, como agregados de pedras naturais de cor clara que também aproveitam sua permeabilidade, sendo camadas porosas para telhados e superfícies transitáveis. Esses materiais, tipicamente, apresentam albedo relativamente mais alto em comparação com camadas de betume padrão, por exemplo, em torno de 0,5-0,7, mas não tanto quanto a geração seguinte de materiais frios artificiais. Essa tendência seguinte consistiu basicamente no desenvolvimento, medição e otimização em laboratório e testes de campo de revestimentos muito brancos, ou seja, com albedo superior a 0,8 (Pisello, 2017).

Em geral, superfícies lisas, de cor clara e planas absorvem menos radiação solar do que as rugosas e de cor escura. Esse conhecimento básico levou à exploração de materiais naturais frios e, paralelamente, ao desenvolvimento de soluções altamente reflexivas para o ambiente construído, que podem ser distinguidas em materiais frios brancos e coloridos. Os primeiros mostram alta refletância tanto no espectro visível (VIS), em comprimentos de 0,4 a 0,7 micrômetros, quanto no infravermelho próximo (NIR), de 0,7 a 2,5 micrômetros, enquanto os últimos, mais adequados para aplicações em um contexto urbano bem definido, refletem principalmente na faixa do NIR e mantêm um aspecto visual convencional (Fabiani *et al.*, 2022). A emissividade está relacionada à reemissão de calor em toda a faixa do infravermelho distante (emissividade de banda larga), em comprimentos de onda de 8 a 25 micrômetros, ou apenas em comprimentos de onda de 8 a 13 micrômetros (emissividade da janela atmosférica) (Santamouris; Yun, 2020).

Avanços na pesquisa permitiram o desenvolvimento dos chamados materiais retro-refletivos e até refrigeradores radiativos. Os primeiros podem refletir a radiação solar para o céu com um efeito mínimo de dispersão, o que é particularmente adequado para aplicações em paredes de edifícios. Os últimos refletem a maioria da radiação solar incidente, exceto na faixa crucial de espectro infravermelho de 8–13 μm , onde os raios infravermelhos podem passar através da nossa atmosfera e para o espaço. Dessa forma, os refrigeradores radiativos podem irradiar calor suficiente para permanecer consistentemente alguns graus a menos que o ar circundante (Fabiani *et al.*, 2022). A Figura 4, adaptada por Correia, Amorim e

Santamouris (2023) resume os conceitos de refletividade e emissividade em cada comprimento de onda.

Figura 4: Comprimentos de onda de refletividade e emissividade.



Fonte: Steffen, Moraes e Gama (1996) adaptado por Correia, Amorim, Santamouris (2023).

Os materiais inovadores de cor clara, com refletividade superior em relação aos materiais naturais foram apresentados como alternativa aos materiais convencionais. São revestimentos brancos de alta refletividade, disponíveis na forma de membranas, revestimentos, tintas, revestimentos metálicos ou telhas. Eles podem ser compostos por elastômeros, silicões, fluoropolímeros e acrílicos ou uma combinação deles (Pisello, 2017), e apresentar temperatura superficial de até 6°C abaixo dos materiais resfriados convencionais (Santamouris; Yun, 2020). Além desses, têm surgido materiais coloridos com alta refletividade da radiação infravermelha próxima (Pisello, 2017). Isso ocorre a partir da adição de orgânicos (Anthraquinone, Quinacridone, Phthalocyanine and Dioxazine) ou pigmentos inorgânicos (Chromates, Oxides, Silicates, Borates, Sulfates, Phosphates, Metals, Vanadates) a argamassas, concreto ou outros materiais, contribuindo de forma mais significativa para o desempenho termoenergético (Santamouris; Yun, 2020).

Vakilinezhad e Khabir (2023) avaliaram o desempenho térmico e energético de envoltórias em edifícios de baixa altura em climas quentes. A avaliação foi realizada usando um método baseado em simulação, um método de otimização e uma análise comparativa. Os resultados da simulação revelaram que as condições climáticas e a espessura do isolamento térmico afetam significativamente o comportamento térmico ideal dos revestimentos e o desempenho energético. Nas zonas de clima quente-árido, o material frio com alta reflexão

solar na envoltória do edifício se mostrou o melhor revestimento para reduzir as cargas de resfriamento. Na envoltória do edifício em climas quentes semiáridos foi melhor alternativa para reduzir as cargas de resfriamento e aquecimento. As cargas de resfriamento anuais foram reduzidas para 26% e 18%, respectivamente, nos climas quentes-áridos e semiáridos. Os valores relevantes de redução no consumo total de energia foram de 12% e 14%, respectivamente. Os resultados indicaram que o comportamento dos materiais frios em climas quentes pode representar uma excelente solução para conforto e economia de energia (Vakilnezhad; Khabir, 2023).

Correia, Amorim e Santamouris (2024) conduziram um processo de otimização para escolas públicas brasileiras, onde identificaram os materiais frios adequados ao contexto climático brasileiro. O estudo concentrou-se em um modelo de escola pública padrão desenvolvido pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), uma instituição do Governo Federal com ampla atuação em todo o território nacional. As simulações foram realizadas por meio do *software DesignBuilder*, para todas as 8 zonas bioclimáticas brasileiras definidas pela ABNT NBR 15.220:2005. Com base nos resultados de temperatura operacional e temperatura de bulbo-seco, pôde-se avaliar as horas ocupadas em conforto, conforme Modelo Adaptativo ASHRAE 55 (2021). Para a otimização, foram analisados os balanços térmicos para identificar os principais ganhos térmicos do edifício. Nas zonas onde a necessidade predominante era o resfriamento, foram testados materiais frios com refletividade de 70% e 90% nos telhados, além de tintas convencionais com refletividade de 10% a 70% nas paredes. Para a Zona Bioclimática 4, onde este estudo foi conduzido, foi identificado um equilíbrio entre ganhos e perdas de calor ao longo do ano, o que resulta em um alto percentual de horas ocupadas em conforto (Correia; Amorim; Santamouris, 2023).

O mercado brasileiro oferece uma variedade de tintas frias para a aplicação em edificações. Um estudo conduzido por Andrade e Dornelles (2023) explorou as propriedades ópticas, térmicas e químicas desses revestimentos frios disponíveis no Brasil e como eles impactam o desempenho térmico das envoltórias dos edifícios. A pesquisa abrangeu telhas, tintas e aditivos refletivos em pó que podem ser adicionados a tintas convencionais. Os resultados revelaram que materiais mais claros, como brancos e beges, demonstram melhor desempenho em termos de refletância solar, apresentando menor variação de temperatura e temperaturas superficiais mais baixas quando expostos ao sol. Em comparação, os materiais convencionais mostraram resultados intermediários, enquanto tintas frias coloridas, como cinzas e vermelhos, apresentaram desempenho inferior. Dentre as diversas opções analisadas, uma tinta à base de acrílico destacou-se como super-reflexiva, alcançando mais de 90% de

refletividade. Essa alta refletividade indica um material com grande potencial de eficiência térmica, conforme corroborado por estudos anteriores de Pisello (2017), Carlosena *et al.* (2021) e Feng *et al.* (2021).

Com base no exposto, depreende-se que os materiais frios apresentam-se como solução passiva para a arquitetura. Em regiões com clima quente, esses materiais podem ajudar a reduzir a carga térmica dos edifícios, refletindo uma porcentagem significativa da radiação solar incidente. Isso ajuda a manter as temperaturas internas mais baixas e confortáveis, reduzindo a necessidade de resfriamento artificial e, conseqüentemente, os custos de energia associados. Isso permite a criação de edifícios energeticamente eficientes e confortáveis sem depender excessivamente de tecnologias ativas de resfriamento.

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014, p. 71), “antes de traçar o primeiro rabisco de projeto, deve-se ter como premissa um estudo do clima e do local”, uma vez que “um bom projeto deve responder simultaneamente à eficiência energética e às necessidades de conforto do usuário em função das informações obtidas na análise climática”. Assume-se que o mesmo é válido para projetos de *retrofit* em edifícios existentes.

A *International Energy Agency* (2013) apresentou recomendações para uma envoltória mais eficiente, que minimizasse a necessidade de resfriamento e iluminação artificiais. Para climas semelhantes ao de Brasília, as recomendações incluem o sombreamento das janelas, a instalação de isolamento térmico nas coberturas e o uso de vidro com baixo fator solar (Costa, Amorim e Silva, 2020). Ainda sobre recomendações, a ABNT NBR 15.220-3:2005 também apresenta algumas diretrizes construtivas que devem ser atendidas (Figura 5). Ressalta-se que a ABNT NBR 15.220-3 está em revisão.

Figura 5: Diretrizes construtivas para a zona bioclimática 4.

Tabela 10 — Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a zona bioclimática 4

Aberturas para ventilação	Sombreamento das aberturas
Médias	Sombrear aberturas

Tabela 11 — Tipos de vedações externas para a zona bioclimática 4

Vedações externas
Parede: Pesada
Cobertura: Leve isolada

Tabela 12 — Estratégias de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 4

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	H) Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento J) Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa)
Inverno	B) Aquecimento solar da edificação C) Vedações internas pesadas (inércia térmica)
NOTA Os códigos H, J, B e C são os mesmos adotados na metodologia utilizada para definir o zoneamento bioclimático do Brasil (ver anexo B).	

Fonte: ABNT NBR 15.220-3: 2005.

Com base nas informações apresentadas, foram selecionadas as estratégias que serão testadas nesta dissertação, as quais estão detalhadas na seção de Materiais e Métodos.

2.1.3. Geração solar fotovoltaica

Atualmente, as fontes de energia com base no petróleo mantêm sua supremacia no mercado. No entanto, previsões indicam que as fontes de energia renovável poderão em breve rivalizar com os combustíveis derivados do petróleo nas redes elétricas dos países, até mesmo assumindo a posição principal. Nesse cenário, a energia solar fotovoltaica se destaca como uma força motriz crucial durante essa transição, uma vez que os módulos fotovoltaicos convertem a radiação solar em eletricidade em corrente contínua (CC). Além disso, sua adoção está crescendo rapidamente em escala global (Şevik, 2022).

A adoção de fontes de energia renovável nos edifícios representa uma solução favorável. Dentre as fontes renováveis aplicáveis aos edifícios, destacam-se os módulos fotovoltaicos (FV). Essa tecnologia se fundamenta no uso de células de silício, que podem ser

empregadas na composição de módulos monocristalinos ou policristalinos. Essas células têm a capacidade de ser incorporadas em diversos substratos, como painéis, vidros, telhas, entre outros. O papel primordial da célula é transformar a luz solar em energia elétrica. Sua eficiência na geração de energia está fortemente vinculada à tecnologia de conversão solar utilizada, bem como à orientação dos módulos na própria edificação (Lo Basso *et al.*, 2018; Sudimac; Urganovic; Jurcevic, 2020; Rosa, 2020).

O uso de módulos fotovoltaicos revela-se conveniente para os edifícios, visto que reduz a dependência da rede elétrica convencional, reduz os custos com consumo de energia elétrica, e elimina a necessidade de longas distâncias de transmissão de energia, o que minimiza as perdas. Adicionalmente, essa tecnologia contribui para a redução das emissões de gases poluentes se comparadas a outras fontes (Chel; Kaushik, 2018; Litardo *et al.*, 2021). Quando instalada no telhado ou envoltória, proporciona ainda sombreamento, o que pode reduzir os ganhos térmicos do edifício e, conseqüentemente, o consumo de energia para o condicionamento do ar em climas quentes (Litardo *et al.*, 2021; Khalil; Hammouda; El-Deeb, 2018).

Vários estudos têm explorado diferentes soluções para a geração de energia renovável em edifícios universitários. A Tabela 4 resume essas abordagens, destacando como elas têm sido implementadas para aumentar a produção de energia, diminuir a dependência de combustíveis fósseis e, assim, contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Tabela 4 – Tecnologias fotovoltaicas aplicadas em *campi* universitários.

TECNOLOGIA	RESUMO	REFERÊNCIA
Microrredes prediais com energia solar fotovoltaica distribuída e utilização de bateria	Melhorar a eficiência energética das microrredes prediais aproveitando os perfis complementares de carga dos edifícios	Zhang; Jia, 2018
Sistema híbrido de geração de energia <i>on-grid</i> e <i>off-grid</i>	Simulação de instalação de um sistema solar fotovoltaico (PV), turbina eólica e gerador à diesel	Kiliç <i>et al.</i> , 2020
Sistema solar fotovoltaico	Análise da integração de sistema fotovoltaico em edifícios universitários	Castrillón-Mendoza <i>et al.</i> , 2020
Sistema solar fotovoltaico	Análise da integração fontes renováveis em edifícios universitários em direção a nZEB	Amato <i>et al.</i> , 2021

Sistema solar fotovoltaicos associados ao sistema eólico	Simulação Computacional para estimativa de geração de energia solar fotovoltaica associada a cenários de hibridização em comunidade energética com microrrede off/on grid para um <i>campus</i> universitário	Sima <i>et al.</i> , 2022
Sistema híbrido PV-trigeração-produção de hidrogênio ligado à rede	Simulação da instalação de um sistema solar fotovoltaico (PV) <i>on-grid</i> , com integração com um sistema de trigeração a gás, além de explorar oportunidades para geração solar de hidrogênio sem armazenamento de energia	Şevik, 2022

Fonte: O autor, 2024.

Dentre as diversas estratégias encontradas na literatura para geração de energia renovável em edifícios universitários, destaca-se a aplicação de sistemas fotovoltaicos para geração de energia local. Castrilon-Mendonza *et al.* (2020) conduziram um estudo de quatro meses na Universidade Autônoma de Cali, Colômbia, focado na instalação de módulos fotovoltaicos na cobertura. Durante a pesquisa, diversos parâmetros como irradiância total, temperatura ambiente e temperatura do módulo foram analisados para avaliar a eficiência energética desses sistemas. A cidade de Cali possui uma radiação solar global média de 4,68 kWh/m², e a potência total dos sistemas fotovoltaicos instalados no *campus* é de 400 kWp. O sistema opera sem baterias, funcionando durante os intervalos diurnos para autoconsumo e redução da dependência da rede elétrica. Os resultados revelaram que o desempenho dos módulos fotovoltaicos conectados à rede variou de 0,73 a 0,78, indicando boas condições de operação em telhados de edifícios em regiões tropicais. Entretanto, a demanda de energia pelo *campus* é superior a 200 MWh/mês, enquanto a energia fornecida pelo sistema solar fotovoltaico é de 5,6 MWh/mês (Castrilon-Mendonza *et al.*, 2020).

Amato *et al.* (2021) realizaram uma avaliação minuciosa de uma instalação fotovoltaica localizada no *campus* universitário do *Politecnico di Torino*, na Itália. Esta instalação está integrada a um edifício projetado com o propósito de ser um nZEB (*Nearly Zero Energy Building*) – edifício de balanço energético quase nulo. Os resultados da pesquisa esclarecem que o sistema proposto alcança o desempenho energético esperado e se alinha com o típico nZEB europeu. Além disso, os achados revelam a viabilidade do aproveitamento local da energia fotovoltaica, potencializado pelo uso de baterias e pelo compartilhamento de energia na comunidade, o que contribui para uma maior independência da rede elétrica externa (Amato *et al.*, 2021).

Ambos os estudos tiveram como foco a avaliação do desempenho de módulos fotovoltaicos em edifícios localizados em *edifícios* universitários, com o objetivo de aumentar

a produção de energia local e diminuir os gastos com eletricidade da rede externa. O primeiro estudo conduzido confirmou a precisão das estimativas de geração de energia em relação ao consumo por meio da validação das medições, fortalecendo a consistência dos resultados obtidos por meio de simulações. No segundo caso, que envolveu um edifício ainda em construção, os resultados da simulação estão sujeitos a posterior validação por meio de medições após a conclusão da obra e da instalação do sistema. Não obstante, em ambas as situações, os módulos fotovoltaicos demonstraram um desempenho significativo na redução da demanda de energia da rede elétrica convencional, resultando em economias financeiras, menor dependência de fontes de combustíveis fósseis e na redução das emissões de gases de efeito estufa.

Os trabalhos evidenciam o potencial e a eficácia dos módulos fotovoltaicos conectados à rede em ambientes universitários, tanto em termos de geração de energia local quanto de redução de custos operacionais e emissões de carbono. É fundamental considerar fatores como radiação solar, variações de temperatura ambiente e sazonalidade, pois esses elementos exercem influência significativa na eficiência e no desempenho desses sistemas.

2.2. INDICADORES DE DESEMPENHO ENERGÉTICO

Independentemente das estratégias selecionadas para melhorar o uso de energia nos edifícios, são necessários indicadores para medir o desempenho do edifício em relação a uma referência.

No que diz respeito ao desempenho energético, o Indicador *Energy Use Intensity* (EUI) é crucial para avaliar o desempenho energético dos edifícios. A fórmula básica para calcular a EUI é o consumo anual de energia do edifício dividido pela sua área útil total. A EUI pode ser usada para realizar análises de *benchmarking*, que envolvem a comparação de edifícios com usos semelhantes e localizados em áreas climáticas comparáveis. O *benchmarking* energético é fundamental para estabelecer referências de eficiência em edifícios e para desenvolver estratégias de eficiência energética (Litardo; Hidalgo-Leon; Soriano, 2021; Garcia; Souza; Reis 2023; Quevedo; Geraldi; Melo, 2023).

No contexto de edifícios universitários, há diversas referências. Nos Estados Unidos, por exemplo, a EUI média para edifícios educacionais de ensino superior em climas muito quentes e úmidos é cerca de 420 kWh/m².ano. Na Europa, a EUI para esses edifícios varia entre 150 e 250 kWh/m².ano (Litardo; Hidalgo-Leon; Soriano, 2021). Esses dados fornecem uma base para avaliar o desempenho energético de edifícios universitários em diferentes

regiões e climas, possibilitando a implementação de medidas mais eficazes para melhorar a eficiência energética nesse setor. A Tabela 5 apresenta um resumo das EUI's relatados na literatura, recuperados por Litardo, Hidalgo-Leon e Soriano (2021), adaptado por este autor.

Tabela 5: Resumo de algumas EUI relatados na literatura para *campi* e edifícios universitários.

REFERÊNCIA	LOCAL	CLIMA	UNIVERSIDADE	ÁREA TOTAL (M ²)	EUI (KWH/M ² .A)
Litardo <i>et al.</i> , 2021	Guayaquil, Equador	Tropical	ESPOL	154.564	83
University of Central Florida, 2019	Orlando, EUA	Subtropical, úmido	University of Central Florida	929.023	454
National University of Singapore, 2019	Singapura	Tropical	National University of Singapore	1.459.900	190
Salvia <i>et al.</i> , 2018	Passo Fundo, Brasil	Subtropical, úmido	Universidade de Passo Fundo	120.536	49
Wang, 2019	Taiwan	Subtropical	Universidades Públicas e Privadas	321.868 (média)	56-93
Building Construction Authority, 2021	Singapura	Tropical	Universidade Politécnicas	>5000	121–367 (média)
Khoshbakht, <i>et al.</i> , 2018	Queensland, Austrália	Subtropical	Griffith University	N/I	145–148
Chang <i>et al.</i> , 2019	Singapura	Tropical	Nanyang Technological University	N/I	47–628
Garcia, 2022*	Belo Horizonte, Brasil	Tropical	Universidade Federal de Minas Gerais	N/I	25,6 - 83,4

* Acrescentado pelo autor | N/I – Não informado.

Fonte: Traduzido de Litardo; Hidalgo-Leon; Soriano, 2021; adaptado pelo autor.

No Brasil, após a promulgação da Lei 10.295 – Lei de Eficiência Energética, foi publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) o Decreto 4059/2001 que instituiu o “Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética”. Esse teve como objetivo principal o desenvolvimento de mecanismos para estabelecer “níveis” mínimos de eficiência energética, além da formação de um Grupo Técnico responsável por adotar procedimentos para a avaliação da eficiência energética dos edifícios (Amorim, 2011). Como resultado,

desenvolveu-se o Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ) para a etiquetagem voluntária do Nível de Eficiência Energética dos Edifícios. Em 2021, foi aprovada a Instrução Normativa Inmetro (INI) que aperfeiçoou o RTQ, especificando os critérios e os métodos para a classificação dos edifícios quanto à sua eficiência energética (PROCEL, 2021).

Essa Instrução apresenta dois métodos de avaliação para a determinação da eficiência energética do edifício: método simplificado, que consiste em uma série de equações, tabelas e parâmetros predefinidos ou a calcular que indicam a eficiência do sistema a partir da sua pontuação; e método por simulação, que define parâmetros para modelagem e simulação computacional e compara o edifício proposto (real) a um edifício de referência por meio de *softwares* específicos. A partir dos resultados, o edifício pode receber a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), emitidas em parceria com o INMETRO. A classificação varia de A a E, mais eficiente e menos eficiente, respectivamente, podendo representar uma economia de mais de 35% entre elas (PROCEL, 2021; Amorim, 2011).

É importante ressaltar que o objetivo desta dissertação não é realizar uma avaliação direta dos edifícios de acordo com os critérios estabelecidos pela INI-C para etiquetagem. Em vez disso, a normativa será utilizada como referência para definir os requisitos de modelagem e simulação computacional empregados neste estudo.

No que diz respeito ao conforto térmico, o Modelo Adaptativo da ASHRAE 55, desenvolvido pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), é uma abordagem utilizada para avaliar o conforto térmico em ambientes internos, no qual é considerado 80% de aceitabilidade dos usuários no cálculo de conforto do edifício. Ao contrário de abordagens mais rígidas, o Modelo Adaptativo da ASHRAE 55 permite uma faixa mais ampla de temperaturas operativas aceitáveis, considerando a capacidade das pessoas de se ajustarem a diferentes condições térmicas. Isso significa que, em vez de fixar uma temperatura única para todos, o modelo leva em conta a variabilidade das preferências térmicas dos ocupantes e permite uma gama de temperaturas onde a maioria das pessoas se sentirá confortável (Figueiredo *et al.*, 2018; Nutkiewicz; Yang; Jain, 2018; Sandhya; Anand; Prasad, 2019; Luo *et al.*, 2022; Tsantili; Koronaki; Polydoros, 2023).

No que diz respeito à iluminação natural, a IESNA (*Illuminating Engineering Society of North America*) oferece diretrizes e recomendações relacionadas aos parâmetros e métricas para avaliação da iluminação natural. A organização enfatiza a importância de avaliar não apenas a quantidade, mas a qualidade da iluminação natural em um ambiente. Para avaliar a quantidade de iluminação natural, a IES LM 83:23 recomenda o uso de métricas como os

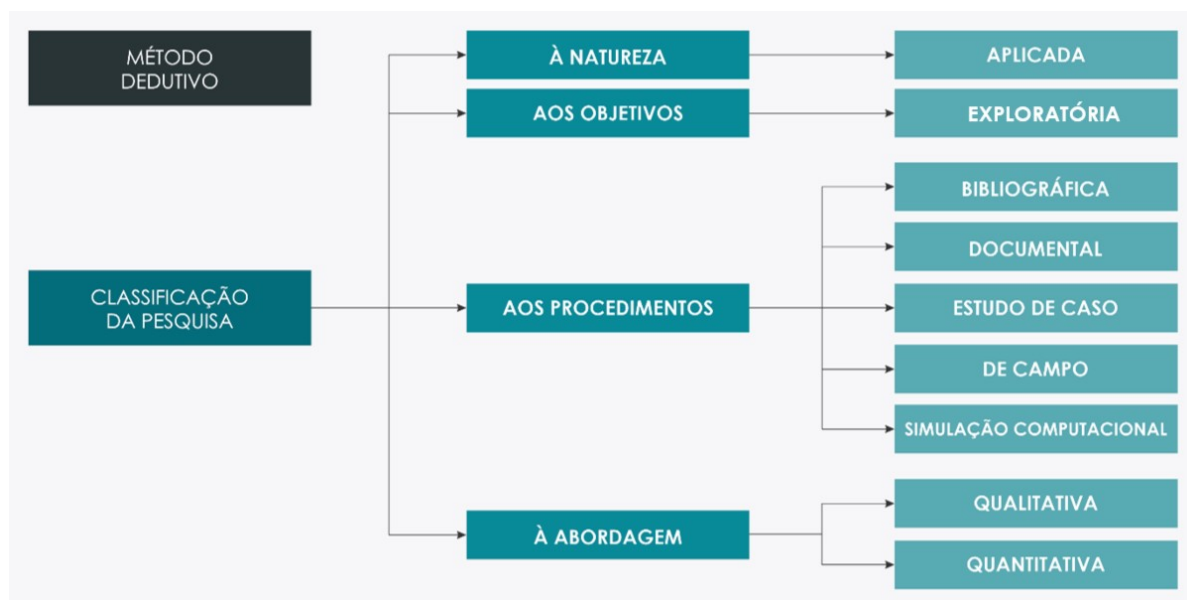
níveis de iluminância, medidos em lux, para garantir que os espaços sejam adequadamente iluminados para as atividades humanas. Além disso, a organização sugere considerar a distribuição da luz natural no espaço, evitando áreas excessivamente iluminadas ou sub-iluminadas (IES LM 83:23, 2021). Destacam, ainda, a importância de avaliar fatores como a uniformidade da luz, a presença de ofuscamento e a incidência de luz solar direta, que podem afetar o conforto visual e o desempenho das tarefas. A organização fornece orientações sobre como minimizar esses efeitos indesejáveis, por exemplo, através do uso de dispositivos de controle solar e *layouts* arquitetônicos que otimizem a distribuição da luz natural (IES LM 83:23, 2021).

No Brasil, a ABNT NBR 15.215, em revisão, estabelece os requisitos mínimos para o projeto e instalação de sistemas de iluminação de interiores nos edifícios, com o objetivo de garantir a qualidade da iluminação, a eficiência energética e o conforto visual dos ocupantes. Esta norma aborda uma variedade de aspectos relacionados à iluminação de interiores, incluindo: requisitos de iluminância, distribuição da iluminação, conforto visual entre outros aspectos. As métricas utilizadas para avaliar a qualidade da iluminação natural no contexto desta dissertação serão detalhadas no capítulo da “Metodologia”.

3. MATERIAIS E MÉTODO

De acordo com Gil (2008, p. 8), "pode-se definir método como caminho para se chegar a um determinado fim. E método científico como conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos adotados para se atingir o conhecimento". Nesse contexto, é relevante salientar que este estudo se fundamenta no método dedutivo, o qual, segundo Dresch, Antunes Jr. e Lacerda (2015, p. 20), "parte de conhecimentos teóricos prévios e, de maneira lógica, propõe certas relações entre as variáveis" para alcançar determinados objetivos. Com base no método definido, apresenta-se na Figura 6 a classificação desta pesquisa de acordo com o que se pretende investigar.

Figura 6: Classificação da pesquisa.



Fonte: O autor, (2024); baseado em Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015).

Quanto à natureza, esta pesquisa caracteriza-se por ser **aplicada**, uma vez que gerou conhecimentos e resultados que auxiliam a prática de projetos de *retrofit* em edifícios universitários em direção ao balanço energético nulo.

Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa **exploratória**, pois testou, por meio da simulação computacional, diversas estratégias de otimização para se alcançar o balanço energético nulo.

Quanto aos procedimentos de pesquisa, aplicaram-se as seguintes estratégias:

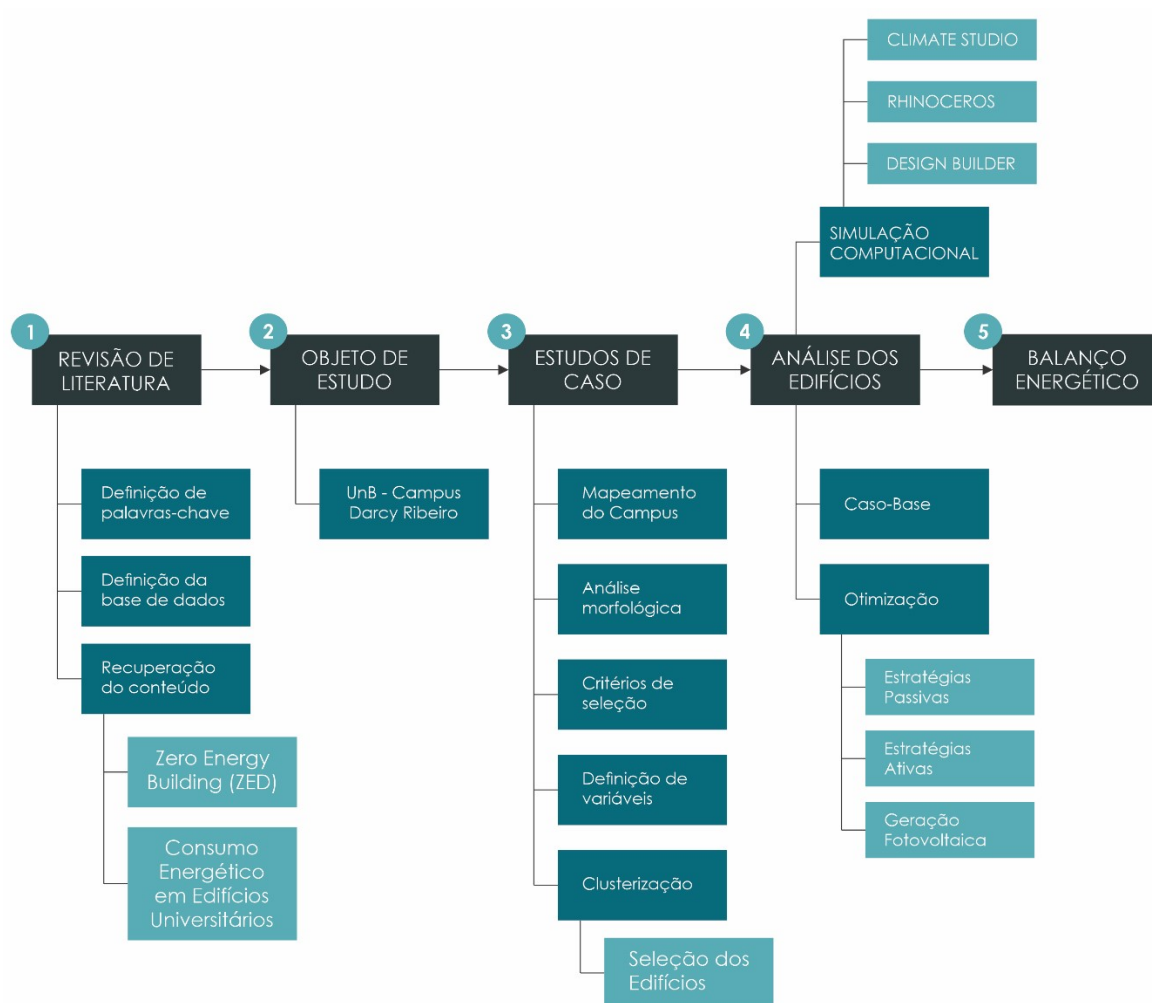
- a) **Pesquisa bibliográfica:** para revisão da literatura nacional e internacional, legislações, regulamentos técnicos e instruções normativas, para a fundamentação teórica da pesquisa;
- b) **Coleta documental:** para obter informações prévias sobre os tópicos que serão pesquisados, como documentos, fotografias, projetos arquitetônicos entre outras informações, que serão classificadas como fontes primárias ou secundárias, a depender do conteúdo recuperado pela investigação;
- c) **Estudo de caso:** visando caracterizar os edifícios e avaliá-los quanto ao potencial de economia de energia, especialmente com a aplicação de estratégias passivas;
- d) **Pesquisa de campo:** realizada por meio de observações e levantamento de dados sobre o edifício, de forma sistemática *in loco*;
- e) **Simulação computacional:** para testar as estratégias e identificar os melhores cenários para se chegar ao balanço energético nulo em um contexto de edifícios pré-existentes.

Quanto às técnicas de análise de dados, adotaram-se as seguintes abordagens:

- a) **Qualitativa:** por meio de uma revisão sistemática de literatura, aprofundando as medidas de eficiência energética e definindo as melhores práticas para atingir a meta do balanço energético nulo. Além disso, inclui a descrição e análise dos edifícios, utilizando o diagrama morfológico (Amorim, 2007) como instrumento de análise ambiental;
- b) **Quantitativa:** a partir de coletas e análises de dados dos edifícios estudados; análises estatísticas.

Para atender aos objetivos propostos, garantir a replicabilidade do estudo e proporcionar maior clareza e rigor na condução da pesquisa, a Figura 7 apresenta os passos metodológicos seguidos.

Figura 7: Passos metodológicos.



Fonte: O autor, 2024.

3.1. REVISÃO DE LITERATURA

Com o propósito de elucidar as questões abordadas neste estudo, realizou-se uma primeira busca com o objetivo de compreender o panorama das pesquisas sobre eficiência energética nos *campi* universitários. Optou-se por utilizar a base de dados "Scopus" para a coleta de informações, dada sua abrangência superior em comparação com outras, como, por exemplo, a *Web of Science*, conforme observado por Ohene, Chan e Darko (2022). Além disso, seu processo de indexação é mais ágil, aumentando consideravelmente a probabilidade de recuperar publicações recentes (Ohene, Chan e Darko, 2022).

Na sequência, definiram-se as palavras-chave para busca de publicações que compactuassem com os objetivos deste estudo. A sintaxe inicial da pesquisa foi construída a

partir de duas palavras-chave combinadas pelo operador booleano “AND”: “*energy efficiency*” AND “*university campus*”.

Para a análise do conteúdo recuperado, aplicaram-se alguns critérios de seleção com o objetivo de refinar o escopo da investigação. Isso implicou na eliminação de publicações anteriores a 2018, estabelecendo um período de análise dos últimos cinco anos. Além disso, excluíram-se quaisquer tipos de publicações que não fossem artigos de revista, como livros, capítulos de livros, artigos de conferências, editoriais, entre outros. Por fim, conduziu-se um estudo qualitativo dos artigos a partir da leitura das palavras-chave, título e resumo, com o intuito de identificar aqueles pertinentes à investigação. A Tabela 6 apresenta um resumo desta busca inicial.

Tabela 6 – Busca inicial.

	PALAVRAS-CHAVE	RESULTADO	SELECIONADOS
Busca inicial	<i>"energy efficiency" AND "university campus"</i>	122 artigos	32 artigos

Fonte: O autor, 2024.

Adicionalmente, realizaram-se novas buscas para aprofundamento dos temas centrais e enriquecimento do referencial teórico desta dissertação, seguindo o mesmo protocolo de busca e de seleção apresentados anteriormente. A Tabela 7 apresenta as palavras-chave e os resultados obtidos em cada busca.

Tabela 7.A – Buscas complementares.

	PALAVRAS-CHAVE	RESULTADO	SELECIONADOS
Busca 01	<i>"Zero Energy Building" OR Zeb AND daylight</i>	18 artigos	9 artigos
Busca 02	<i>"zero energy districts" OR Zed AND daylight</i>	5 artigos	2 artigos
Busca 03	<i>"net zero energy districts" AND nzed</i>	14 artigos	5 artigos
Busca 04	<i>daylight AND "lighting system" AND "control system"</i>	32 artigos	9 artigos
Busca 05	<i>"Zero Energy Buildings" AND "passive design"</i>	18 artigos	6 artigos
Busca 06	<i>"Zero Energy Buildings" AND "University Building"</i>	8 artigos	6 artigos
Busca 07	<i>"cool materials" AND "energy efficiency"</i>	21 artigos	7 artigos

Fonte: O autor, 2024.

No contexto nacional, selecionou-se artigos publicados no ENCAC 2021 e ENTAC 2022 cuja temática relaciona-se diretamente ao conteúdo da investigação. A seleção se deu por meio de análise qualitativa dos títulos, com buscas nas áreas temáticas “Conforto Térmico e Desempenho Térmico no Ambiente Construído (Tópico 3)”, “Eficiência Energética (Tópico 4)”, “Iluminação Natural e Artificial (Tópico 5)” para os anais do ENCAC 2021, e do eixo de “Conforto Ambiental e Eficiência Energética” para os anais do ENTAC 2022. A tabela 10 apresenta os resultados dessas buscas.

Tabela 7.B – Buscas complementares.

Evento	Selecionados
ENCAC 2021	17 artigos
ENTAC 2022	14 artigos

Fonte: O autor, 2024.

Além de todo material recuperado nessas investigações, adicionaram-se documentos e publicações referentes à *SHC Task 40 e Task 59*, cujo tema de estudo abordou a renovação de edifícios isolados em direção ao ZEB, e a *ISO/TS 23764 Methodology for achieving non-residential zero-energy buildings (ZEBs)* (2021) que tem como objetivo apresentar uma metodologia para alcançar um edifício de balanço energético nulo.

Ressalta-se que os dados utilizados nesta revisão sistemática foram obtidos na base de dados *Scopus*. Essa escolha foi motivada pela facilidade em acessar diferentes formatos de dados necessários nas ferramentas de mapeamento científico, como o *VOSviewer*, por exemplo. Para garantir uma análise mais abrangente, futuras pesquisas podem buscar dados em múltiplas bases de dados, como a *Web of Science* e o *Google Scholar*. Posto isso, enfatiza-se que os resultados obtidos podem não refletir completamente toda a literatura disponível sobre o assunto.

3.2. OBJETO DE ESTUDO

Os *campi* universitários apresentam-se como um grande laboratório, uma vez que são espaços com grande potencial de transformação em prol do desenvolvimento sustentável. Frente a isso, selecionou-se a Universidade de Brasília como objeto de estudo desta dissertação, alinhando-se ao projeto de pesquisa “ZEB - Zero Energy Brasília: Plano estratégico de eficiência energética para parque construído de balanço energético nulo” desenvolvido pelo Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética da Universidade de Brasília (LACAM/UnB), e subsidiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF).

3.3. ESTUDOS DE CASOS

Para a seleção dos edifícios para estudo de caso desta dissertação, no âmbito do projeto de pesquisa supracitado, conduziram-se algumas atividades para identificar e categorizar as diferentes tipologias de edifícios no *campus* Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, levando em consideração fatores como uso, período de construção, replicabilidade, monitoramento energético, entre outros.

Além disso, analisaram-se as escalas de maior e menor potencial para a implementação de estratégias passivas, o que permitiu criar um diagnóstico simplificado dos edifícios com maior probabilidade de se tornar um ZEB. Com base nesse diagnóstico e apoiados em dados estatísticos, identificaram-se edifícios representativos do *campus* que constituíram a amostra para aprofundamento da investigação. Os tópicos seguintes detalham cada atividade realizada.

3.3.1. Identificação e Mapeamento

Para a identificação e mapeamento dos edifícios que integram o *campus* Darcy Ribeiro, utilizou-se como ponto de partida o relatório das atividades do Eixo 1 - Morfologia Arquitetônica, que faz parte integrante dos trabalhos desenvolvidos no âmbito do Edital GRE/INFRA 01/2022 para a formulação da Proposta do Plano Diretor do *Campus* Darcy Ribeiro / Universidade de Brasília. Esse trabalho realizou um abrangente levantamento acerca do uso e ocupação dos edifícios e espaços livres do *Campus* Darcy Ribeiro, ao mesmo tempo que estabelecia um banco de dados georreferenciados para mapear a morfologia arquitetônica do *campus* (Silva *et al.*, 2023).

Utilizando o *software* de geoprocessamento de código aberto QGIS 3.28.3, exportou-se desse banco de dados uma planilha em Excel (Anexo A) com todos os atributos referentes à camada "edificações_atualizado", o que permitiu identificar todos os edifícios e estruturas do *campus*. Notou-se que o mapeamento realizado abrangeu todas as estruturas arquitetônicas e urbanísticas do *campus*, incluindo elementos como bicicletários, torres de transmissão, subestações de energia, entre outros. A partir da consolidação e organização do material extraído, chegou-se a um total de 93 edifícios / conjunto de edifícios, cujas informações estão apresentadas no “Apêndice I” desta dissertação.

3.3.2. Categorização tipológica

Na sequência, identificaram-se os diferentes usos dos edifícios presentes no *campus*, por meio de fontes secundárias, como informações disponíveis nas páginas web da Universidade, e categorizados (Tabela 8) da seguinte maneira:

Tabela 8 – Categorização dos edifícios.

CÓDIGO	TIPO DE USO
[ADM]	GABINETES DE PROFESSORES E SALAS ADMINISTRATIVAS
[ADM-LAB]	GABINETES DE PROFESSORES, SALAS ADMINISTRATIVAS E LABORATÓRIOS
[BSA]	SALAS DE AULAS
[BSA-ADM]	SALAS DE AULAS, GABINETE DE PROFESSORES E SALAS ADMINISTRATIVAS
[BSA-ADM-LAB]	BLOCO DE SALA DE AULA, GABINETE DE PROF., SALAS ADM. E LABORATÓRIOS
[HOS]	HOSPITALAR
[LAB]	LABORATÓRIOS
[RES]	RESIDENCIAL
[OUT]	OUTROS

Fonte: O autor, 2024.

Considerou-se que:

- I. **Gabinetes de professores e salas administrativas:** salas de uso exclusivo de professores ou técnicos administrativos da instituição, com uma baixa densidade de ocupação e um uso tradicional de escritório, incluindo mesas com computadores;
- II. **Salas de aula:** ambientes de ensino e aprendizagem tradicionais, dotados de carteiras e quadro;
- III. **Hospitalar:** locais destinados ao atendimento médico e ambulatorial;
- IV. **Laboratórios:** ambientes dedicados à pesquisa, equipados com dispositivos que consomem mais energia elétrica do que computadores, representando a atividade principal realizada nesses espaços;
- V. **Residencial:** destinado à moradia;
- VI. **Outros:** demais estruturas arquitetônicas e urbanísticas mapeadas no *campus* que se não se enquadram nas categorias anteriores.

O “Apêndice II” apresenta a relação de todos os edifícios e sua respectiva categorização quanto ao tipo de usos.

3.3.3. Critérios de seleção

Como critério de seleção, consideraram-se apenas os edifícios destinados a usos não residenciais, que incluem atividades administrativas (gabinetes de professores ou salas administrativas) ou salas de aula e similares. Esse critério considerou as notáveis diferenças em termos de uso, períodos de ocupação, equipamentos, densidade de ocupação e outros fatores que têm um impacto significativo no consumo de energia dos edifícios. Outra consideração importante foi a seleção de edifícios com maior potencial de replicabilidade ou que já foram replicados em outros *campi* da Universidade e aqueles que possuem monitoramento energético. Com base nesses critérios, selecionaram-se 61 edifícios no *campus* Darcy Ribeiro, detalhados nos “Apêndices III e IX”, nos quais foram aplicados o "Diagrama Morfológico" (Amorim, 2007) para avaliar as oportunidades de implementação de estratégias passivas e o potencial para atingir o balanço energético nulo.

3.3.4. Análise morfológica

A análise morfológica foi conduzida por meio do "Diagrama Morfológico" (Amorim, 2007), uma ferramenta simplificada de avaliação de projetos arquitetônicos e/ou edifícios, voltada para a avaliação qualitativa sob uma perspectiva ambiental. O diagrama (Anexo B) está dividido em três níveis que abrangem o espaço urbano, o edifício e o ambiente interno. Cada nível possui parâmetros de análise e variáveis específicas, permitindo uma compreensão abrangente do edifício e a avaliação de aspectos como iluminação natural, conforto ambiental e eficiência energética (Amorim, 2007).

No que diz respeito à aplicação do diagrama morfológico, estabeleceu-se uma escala de avaliação que varia de 0 a >3, conforme detalhado na Tabela 9. Essa escala resultou da análise dos pontos críticos identificados na edificação, com base nas variáveis apresentadas no diagrama. Os edifícios cujo resultado do diagrama morfológico apresentou menos pontos críticos, possuem maior potencial de aplicação de estratégias passivas na edificação, o que, por sua vez, aumenta o potencial de alcançar o balanço energético nulo. Os resultados completos dessa análise estão apresentados nos “Apêndice IV e V”.

Tabela 9 – Escala quanto ao potencial de uso de estratégias passivas na edificação.

Pontos Críticos	Potencial
0	Muito Alto
1	Alto
2	Médio
>3	Baixo

Fonte: Soares; Amorim, 2023.

3.3.5. Definição da amostra

Para a definição da amostra referente aos estudos do projeto de pesquisa no qual esse trabalho está inserido, realizaram-se algumas análises estatísticas a fim de constituir uma amostra mais fidedigna possível quanto à população referida para que por meio dela fosse possível fazer generalizações com base nos dados amostrais. O método foi definido considerando todos os edifícios do *campus*, com exceção dos edifícios de laboratórios e edifícios residenciais. Os primeiros, por se tratar de edificações com necessidades de energia muito específicas; os segundos, também por terem usos finais e necessidades de conforto diferenciadas em relação a edifícios não residenciais, além de uma gestão distinta dos demais.

Duas etapas foram conduzidas, sendo que a primeira, com uma população amostral de 61 edifícios, realizou um estudo no qual a amostragem foi estabelecida contemplando apenas os resultados da análise morfológica.

Para o cálculo do tamanho da amostra, primeiramente foi aplicado o método de amostragem aleatória simples, em que a variância populacional é desconhecida, então foi utilizado a cota superior de valor 0,25. Além disso, o tamanho do erro e intervalo de confiança utilizados foram de 0,1 e 90%, respectivamente. O cálculo do tamanho total da amostra está apresentado abaixo (ESTAT, p, 11, 2023).

$$n' = \frac{z_{\frac{\alpha}{2}}^2 \times s^2}{\epsilon^2}$$
$$= \frac{1,65^2 \times 0,25}{0,1^2} \approx 67,63$$

$$n = \frac{n' \times N}{N + n'} = \frac{67,63 \times 63}{63 + 67,63} \approx 32,62 = 33$$

Em que N = 63, considerando o total de edificações localizadas na UnB. Também foram utilizados outros valores de margem do erro e intervalo de confiança, caso o número da amostra com os parâmetros escolhidos acima seja de difícil estudo para o cliente, o qual pode ser conferido na Tabela abaixo:

	Erro	90%	80%	70%	60%	50%
1	5%	51	46	40	33	26
2	6%	47	41	34	28	21
3	7%	43	36	29	23	17
4	8%	39	32	25	19	14
5	9%	36	28	22	16	11
6	10%	33	25	19	14	10
6	11%	29	22	16	12	9

Além disso, considerando a amostra de tamanho 33 calculada anteriormente, para o cálculo do tamanho da amostra considerando o diagrama morfológico, foi utilizado o método de amostragem estratificada por alocação proporcional para definir o tamanho da amostra de cada grupo, em que os resultados são apresentados na Tabela abaixo:

Tabela 2: Tamanho das amostras por diagrama morfológico

Diagrama	Tamanho Populacional	Proporção	Amostra
Muito Alto	20	0,317	10
Alto	21	0,333	11
Médio	17	0,269	9
Baixo	5	0,079	3
Total	63	1	33

(ESTAT, p, 12, 2023).

Realizou-se, ainda, um processo de seleção aleatória de edifícios a partir do banco de dados existente, o qual contém todos os edifícios da população a ser estudada, utilizando o *software* estatístico R. A randomização dos edifícios foi efetuada com o auxílio da função "*sample*" do pacote "*dplyr*". Essa abordagem garante que cada edificação tenha uma probabilidade igual de ser escolhida, tornando o processo de seleção totalmente aleatório. O tamanho da amostra foi determinado previamente por meio de uma técnica de amostragem aleatória simples com alocação proporcional, com tamanhos diferentes para os quatro grupos, que se enquadram em uma das quatro categorias identificadas na classificação quanto ao potencial de uso de estratégias passivas na edificação obtidos por meio do uso do diagrama morfológico (muito alto, alto, médio e baixo). Esse método proporcionou uma seleção equitativa e representativa dos edifícios amostrados (Amorim, Cronemberger e Soares, 2024)

Na segunda etapa, cuja população foi de 40 edifícios¹ (Apêndice VI), consideraram-se outras variáveis tais como tipo de uso, replicabilidade, monitoramento energético, orientação solar do edifício, fator de forma², PAF (percentual de abertura nas fachadas) e presença de proteção solar (Cortinhas, 2022; Barth; Vefago; Vasconcelos, 2017).

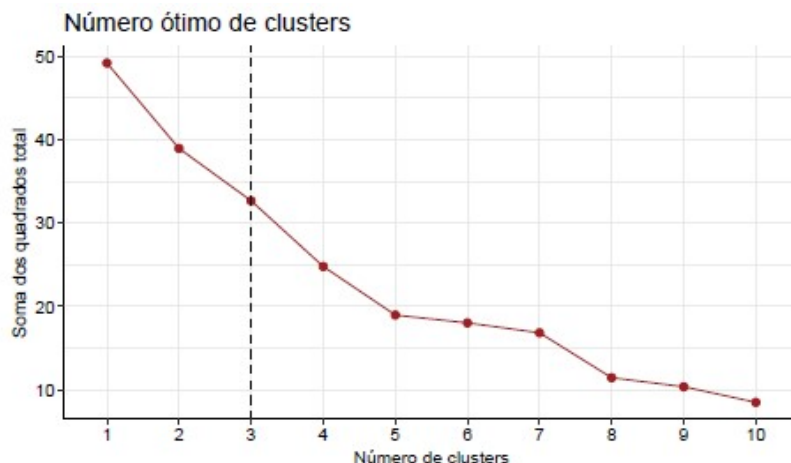
Por fim, conduziu-se uma análise de *Cluster* com o intuito de identificar uma “estrutura de agrupamento natural, agrupando indivíduos com base na similaridade ou dissimilaridade dos dados” (ESTAT, p. 8, 2023). O objetivo é assegurar que cada grupo identificado apresente uniformidade entre seus indivíduos, ao passo que haja diversidade entre os grupos. A semelhança entre os elementos pode ser avaliada considerando a distância entre

¹ Para esta etapa, excluíram-se os edifícios que possuem unidades de laboratório, uma vez que o consumo energético desses edifícios é geralmente superior ao das demais tipologias (Garcia, 2022) e os edifícios com fator de forma abaixo de 0,25, devido à alta taxa de compacidade (Barth, 2017).

² A memória de cálculo do Fator de Forma dos edifícios pode ser consultada no Apêndice VII.

as variáveis, utilizando variáveis qualitativas ou explorando associações para identificar similaridades nos dados e organizá-los em *clusters* (ESTAT, 2023). A Figura 8 apresenta o gráfico do qual determinou-se o número ideal de *clusters*, que permite comparar as variâncias dos dados em relação ao número de *clusters*.

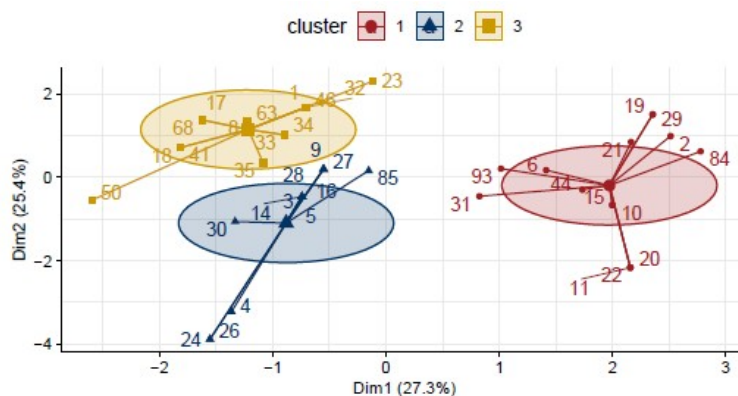
Figura 8: Número ótimo de *clusters*.



Fonte: ESTAT, 2023.

Observa-se que o número ótimo de *clusters* para a amostra é de 3. Isso ocorre porque acima desse valor, o ganho na diferenciação dos grupos é limitado. Além disso, a partir de 3 *clusters*, as distâncias dos erros quadráticos tendem a se estabilizar, ou seja, a variação não é tão significativa em termos de variância. Esse resultado permite agrupar os edifícios de forma eficaz, considerando a similaridade entre eles. Com 3 *clusters* bem definidos, pode-se realizar análises mais precisas e direcionadas, o que é fundamental para a compreensão das características e dos padrões presentes nos edifícios estudados (ESTAT, 2023). Por meio da aplicação do algoritmo K-means, um algoritmo não supervisionado, ou seja, aquele que não depende de dados previamente rotulados, desenvolveu-se o gráfico a seguir (Figura 9).

Figura 9: *Clusters*.



Fonte: ESTAT, 2023.

O propósito fundamental desse algoritmo reside na busca por similaridades nos dados e na subsequente formação de grupos com base no número ideal de *clusters*. O algoritmo opera ao calcular a distância entre dois pontos, empregando a métrica da distância euclidiana, conforme previamente descrita no referencial teórico deste relatório. Essa abordagem de agrupamento não supervisionado, com o uso do algoritmo K-means, tem sido crucial para identificar estruturas e padrões subjacentes nos conjuntos de dados, possibilitando análises mais aprofundadas e interpretações significativas no contexto da pesquisa (ESTAT, 2023).

A Tabela 10 apresenta a listagem com a organização dos edifícios em *clusters*, sendo que o *cluster 1* engloba 14 edifícios, o *cluster 2*, 12 edifícios e o *cluster 3*, 14 edifícios.

Tabela 10 – Organização dos edifícios nos *clusters*.

ID	DESIGNAÇÃO	CLUSTER
84	SAA - Secretaria de Administração Acadêmica (Centro de Convivência - Bloco C)	1
6	CAEP - Centro de Atendimento e Estudos Psicológicos	1
2	ASFUB - Associação dos Servidores da FUB	1
19	FINATEC - Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos	1
21	Instituto CONFÚCIO (Língua e Cultura Chinesa)	1
20	ICS - Instituto de Ciências Sociais	1
22	IPOL / IREL - Instituto de Ciências Políticas e Instituto de Relações Internacionais	1
11	CIC / EST - Departamento de Estatística e Ciência da Computação	1
29	PRC - Prefeitura do <i>Campus</i>	1
93	Oca II CoPP - Segurança	1
15	FD - Faculdade de Direito	1
10	CEAD - Centro de Ensino à Distância (antiga CEBRASP)	1
44	CEFTRU - Centro Interdisciplinar de Estudos em Transportes	1
31	SG 1 - Instituto de Artes	1
85	CET - Centro de Excelência em Turismo	2
4	BSAN - Bloco de Salas de Aula Norte (UAC - Unidade Acadêmica)	2
30	Reitoria	2
27	PMU I - Pavilhão Multiuso I	2
9	CDT - Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico	2
5	BSAS - Bloco de Sala de Aula Sul	2
24	PAT - Pavilhão Anísio Teixeira	2
26	PJC - Pavilhão João Calmon	2
3	BAES - Bloco de Salas de Aula Eudoro de Sousa	2
28	PMU II - Pavilhão Multiuso II	2
14	FACE - Faculdade de Administração, Contabilidade e Economia	2
16	FE 1 - Faculdade de Educação	2

68	ADUnB - Casa do Professor	3
35	SG 8 - Auditório de Música	3
18	FE 5 - Faculdade de Educação	3
23	PCTEC - Parque Científico e Tecnológico	3
8	CDS - Centro de Desenvolvimento Sustentável	3
46	CRAD - Centro de Referência em Conservação da Natureza	3
33	SG 2 - Departamento de Música	3
41	IDA - Oficinas especiais	3
63	Beijódromo	3
17	FE 3 - Faculdade de Educação	3
32	SG 10 - Centro de Planejamento Oscar Niemeyer - CEPLAN	3
34	SG 4 - Departamento de Música	3
1	APOSFUB - Associação dos Aposentados da FUB	3
50	FT - Faculdade de Tecnologia	3

Fonte: ESTAT, 2023.

3.3.6. Seleção dos edifícios

Para seleção dos edifícios, tomou-se como base o cálculo de tamanho de amostra, do qual se considerou uma amostra para intervalo de confiança de 70% e margem de erro 15%, conforme demonstrado na Figura 10.

Figura 10: Cálculo do tamanho da amostra.

	IC	90%	80%	70%	60%	50%
	Erro					
1	5%	35	32	29	26	21
2	10%	25	20	16	12	9
3	12%	22	17	13	9	7
4	15%	17	13	9	7	4
5	17%	15	10	8	5	4
6	20%	12	8	6	4	3
7	25%	9	6	4	3	2

Fonte: ESTAT, 2023.

Na sequência, utilizou-se o método de randomização para seleção da amostra por meio do *software* estatístico R e pela função `sample` do pacote `dplyr`. A Tabela 11 apresenta os edifícios selecionados a partir da randomização.

Tabela 11 – Amostra com intervalo de confiança 70% e margem de erro 15%.

ID	DESIGNAÇÃO	CLUSTER
20	ICS - Instituto de Ciências Sociais	1
22	IPOL / IREL - Instituto de Ciências Políticas e Instituto de Relações Internacionais	
29	PRC - Prefeitura do <i>Campus</i>	
16	FE 1 - Faculdade de Educação	2
5	BSAS - Bloco de Sala de Aula Sul	
26	PJC - Pavilhão João Calmon	
32	SG 10 - Centro de Planejamento Oscar Niemeyer - CEPLAN	3
46	CRAD - Centro de Ref. em Conservação da Natureza e Recup. de Áreas Degradadas	
8	CDS - Centro de Desenvolvimento Sustentável	

Fonte: ESTAT, 2023.

Dado o prazo de execução da pesquisa, como os recursos disponíveis, realizaram-se algumas alterações na seleção acima, a fim de dar celeridade aos andamentos da investigação. As alterações realizadas foram (Amorim, Cronemberger, Soares, 2024):

Cluster 01:

ICS – Instituto de Ciências Sociais → FD – Faculdade de Direito

PRC – Prefeitura do *Campus* → SAA – Secretaria de Administração Acadêmica

A justificativa para não avaliar o edifício ICS - Instituto de Ciências Sociais, com base na sua similaridade com o edifício IPOL/IREL - Instituto de Ciências Políticas e Instituto de Relações Internacionais, é fundamentada na presença de características idênticas entre os dois edifícios. A análise prévia já realizada para o edifício IPOL/IREL abrange as especificidades e peculiaridades que são compartilhadas pelo edifício ICS. Essa abordagem estratégica otimiza o processo de análise, garantindo uma cobertura abrangente e ao mesmo tempo evitando redundâncias desnecessárias. Posto isso, selecionou-se a FD – Faculdade de Direito, dada a disponibilidade de informações referentes ao projeto do edifício.

A justificativa para avaliar o edifício SAA - Secretaria de Administração Acadêmica em vez da PRC - Prefeitura do *Campus*, baseia-se na disponibilidade de informações referentes ao projeto do SAA. Considerando que as características e dados relevantes do projeto estão prontamente acessíveis para o edifício SAA, realizar a avaliação neste contexto específico oferece uma análise mais abrangente e informada. Essa abordagem direcionada permite uma análise mais eficiente, evitando a dispersão de esforços em avaliações onde a disponibilidade de informações pode ser limitada.

Cluster 02:

BSAS – Bloco de Salas de Aula Sula → BSAN – Bloco de Salas de Aula Norte

FE 1 - Faculdade de Educação → CDT – Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico

A justificativa para substituir o edifício BSAS (Bloco de Salas de Aula Sula) pelo BSAN - Bloco de Salas de Aula Norte e a FE 1 - Faculdade de Educação 1 pelo CDT - Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico baseia-se no fato de que já foram realizadas análises e estudos abrangentes para esses edifícios. Nesse contexto, a substituição visa não apenas evitar a duplicação de esforços, mas otimizar recursos, concentrando-se na atualização das informações necessárias dentro do escopo da pesquisa.

Como as análises e estudos anteriores fornecem uma base sólida de informações para esses edifícios, a estratégia adotada é direcionar a pesquisa para a obtenção de dados atualizados e relevantes. Essa abordagem visa garantir a eficiência na coleta de informações, permitindo uma análise mais precisa e focada nos aspectos que requerem atualização ou ajuste, contribuindo para a continuidade e aprofundamento do conhecimento existente sobre esses edifícios específicos (Amorim, Cronemberger, Soares, 2024).

Cluster 03:

CRAD - Centro de Referência em Conservação da Natureza e Recuperação de Áreas Degradadas → FT – Faculdade de Tecnologia

A substituição do CRAD (Centro de Referência em Conservação da Natureza e Recuperação de Áreas Degradadas) pela FT (Faculdade de Tecnologia) é justificada pela disponibilidade de informações detalhadas sobre a FT provenientes de análises e estudos anteriores. Essa estratégia visa evitar a duplicidade de esforços ao utilizar dados já existentes para a FT, permitindo uma alocação mais eficaz de recursos e focando na atualização das informações específicas necessárias para a pesquisa em andamento. A substituição, portanto, contribui para a otimização do processo de coleta de dados, mantendo a consistência e a qualidade das informações dentro do contexto da pesquisa em desenvolvimento.

A partir das alterações supracitadas, chegou-se a seguinte amostra para o estudo (Tabela 12) (Apêndice VII):

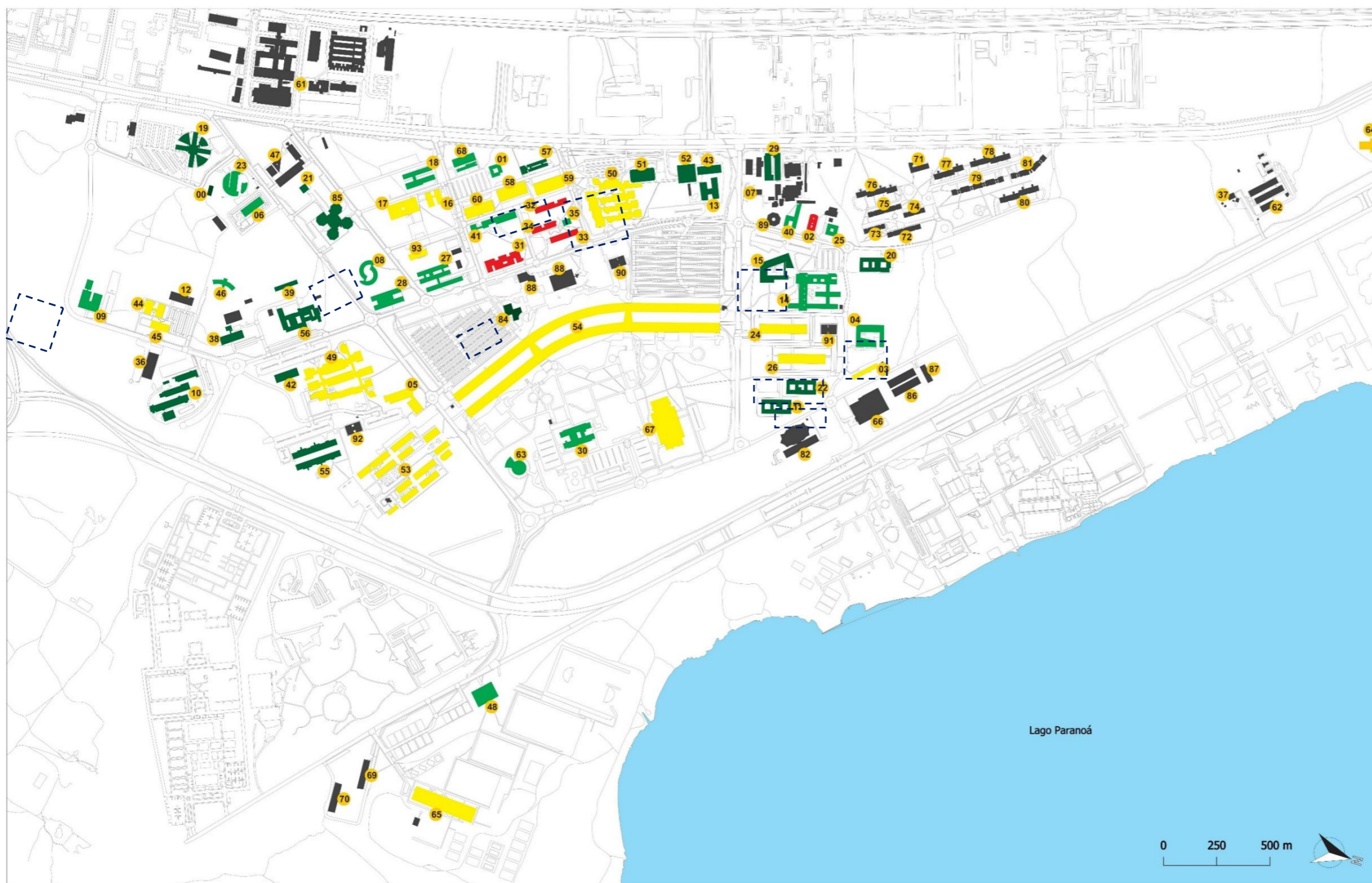
Tabela 12 – Relação dos edifícios selecionados para o estudo no projeto de pesquisa em desenvolvimento no LACAM/UnB.

ID	DESIGNAÇÃO	CLUSTER
22	IPOL / IREL - Instituto de Ciências Políticas e Instituto de Relações Internacionais	1
84	SAA - Secretaria de Administração Acadêmica	1
15	FD – Faculdade de Direito	1
4	BSAN - Bloco de Salas de Aula Norte	2
9	CDT - Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico	2
26	PJC - Pavilhão João Calmon	2
8	CDS – Centro de Desenvolvimento Sustentável	3
50	FT – Faculdade de Tecnologia	3
32	SG 10 - Centro de Planejamento Oscar Niemeyer - CEPLAN	3

Fonte: Amorim, Cronemberger, Soares, 2024.

A Figura 11 apresenta o mapeamento do *campus*, com base na análise morfológica, com destaque para os nove edifícios selecionados para amostragem do estudo (Amorim, Cronemberger, Soares, 2024).

Figura 11: Potencial de uso de estratégias passivas – edifícios do *Campus Darcy Ribeiro*.



LEGENDA: CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO POTENCIAL BIOCLIMÁTICO

■ MUITO ALTO (19 EDIFICAÇÕES)	■ MÉDIO (17 EDIFICAÇÕES)
■ ALTO (20 EDIFICAÇÕES)	■ BAIXO (5 EDIFICAÇÕES)



ID	DENOMINAÇÃO
1	APOSFUB - Associação dos Aposentados da FUB
2	ASFUB - Associação dos Servidores da FUB
3	BAES - Bloco de Salas de Aula Eudoro de Sousa
4	BSAN - Bloco de Salas de Aula Norte
5	BSAS - Bloco de Salas de Aula Sul
6	CAEP - Centro de Atendimento e Estudos Psicológicos
7	CCN - Centro de Convivência Negra
8	CDS - Centro de Desenvolvimento Sustentável
9	CDT - Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico
10	CEAD - Centro de Ensino à Distância (antiga CEBRASP)
11	CIC/EST - Departamento de Estatística e Ciência da Computação
12	DIMEQ - Diretoria de Manutenção de Equipamentos
13	EFL - Departamento de Engenharia Florestal
14	FACE - Faculdade de Administração, Contabilidade e Economia
15	FD - Faculdade de Direito
16	FE 1 - Faculdade de Educação
17	FE 3 - Faculdade de Educação
18	FE 5 - Faculdade de Educação
19	FINATEC - Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos
20	ICS - Instituto de Ciências Sociais
21	Instituto - CONFÚCIO
22	IPOL/IREL - Instituto de Ciências Políticas e Instituto de Relações Internacionais
23	PCTEC - Parque Científico e Tecnológico
24	PAT - Pavilhão Anísio Teixeira
25	PIJ - Programa Infância Juvenil
26	PJC - Pavilhão João Calmon
27	PMU I - Pavilhão Multiuso I
28	PMU II - Pavilhão Multiuso II
29	PRC - Prefeitura do Campus
30	Reitoria
31	SG 1 - Instituto de Artes
32	SG 10 - Centro de Planejamento Oscar Niemeyer - CEPLAN
33	SG 2 - Departamento de Música
34	SG 4 - Departamento de Música
35	SG 8 - Auditório de Música
36	STI - Secretaria de Tecnologia da Informação (antigo CPD)
37	Fábrica Escola de Química
38	LEGA - Laboratório de Estudos Geodinâmicos e Ambientais
39	LT - Laboratório de Termobiologia
40	IDA - Oficina de Maquetes e Protótipos
41	IDA - Oficinas Especiais
42	ULEG - FS - Faculdade de Saúde
43	ULEG - FT - Faculdade de Tecnologia
44	CEFTRU - Centro Interdisciplinar de Estudos em Transportes
45	INFRALAB - Laboratório de Infraestrutura Rodoviária
46	CRAD Centro de Referência em Conservação da Natureza e Recuperação de Áreas Degradadas
47	FIOCRUZ
48	FEF - Faculdade de Educação Física
49	FS - Faculdade de Saúde
50	FT - Faculdade de Tecnologia
51	FT - Laboratório de Hidráulica e Estruturas
52	FT - Laboratório de Termociência e Metrologia Dinâmica
53	IB - Instituto de Ciências Biológicas
54	ICC - Instituto Central de Ciências
55	IQ - Instituto de Química
56	NMT - Núcleo de Medicina Tropical/ Núcleo de Nutrição
57	SIS - Observatório Sismológico
58	SG 11 - Laboratório de Engenharia Elétrica
59	SG 12 - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
60	SG 9 - Laboratório de Engenharia Mecânica
61	HUB - Hospital Universitário de Brasília
62	HVET - Hospital Veterinário
63	Beijódromo
64	Estação Experimental de Biologia
65	CO - Centro Olímpico
66	Almoxarifado Central
67	BCE - Biblioteca Central
68	Casa do Professor
69	CEU - Bloco A
70	CEU - Bloco B
71	CEU - Casa do Estudante Pós Graduação
72	COLINA - Bloco A
73	COLINA - Bloco B
74	COLINA - Bloco C
75	COLINA - Bloco D
76	COLINA - Bloco E
77	COLINA - Bloco F
78	COLINA - Bloco G
79	COLINA - Bloco H
80	COLINA - Bloco I
81	COLINA - Bloco J
82	Centro Comunitário Athon Bulcão
83	Centro de Vivência - BLOCO A
84	SAA - Secretaria de Administração Acadêmica (Centro de Vivência - BLOCO B)
85	CET - Centro de Excelência em Turismo
86	Galpão de Máquinas
87	Garagem e Oficina Mecânica
88	RU - Restaurante Universitário
89	Maloca - Centro de Convivência Multicultural dos Povos Indígenas
90	MASC CENTRO
91	MASC NORTE
92	MASC SUL
93	Oca II CoPP - Segurança

Fonte: Amorim, Cronemberger, Soares, 2024, adaptado pelo autor.

A Figura 12 apresenta uma fotografia da fachada os edifícios selecionados no contexto do projeto de pesquisa em desenvolvimento no LACAM/UnB. **Para esta dissertação, selecionou-se o *cluster 2* para aprofundamento do estudo.**

Figura 12: Fachadas dos edifícios selecionados.



Fonte: O autor, 2024, adaptado de Amorim, Cronemberger, Soares, 2024.

Os edifícios que compõe o *Cluster 2*, conforme a classificação pelo diagrama morfológico, possuem potencial alto (CDT e BSAN) ou médio (PJC) para uso de estratégias passivas, devido a suas características morfológicas.

3.4. ANÁLISE DOS EDIFÍCIOS

O processo de otimização foi adaptado de Correia, Amorim e Santamouris (2024) e estruturado em três etapas: a) definição do caso-base, b) otimização e c) balanço energético.

3.4.1. Caso-base

Para definição do caso-base (condição atual), realizaram-se simulações computacionais, considerando o período de um ano (8760 horas), para análise do desempenho energético, do conforto térmico, do balanço térmico e da qualidade da iluminação natural nos edifícios.

Análise do desempenho termoenergético

Para a análise do desempenho termoenergético, utilizou-se *software DesignBuilder* para simulação dos edifícios, uma vez que ele atende às características requeridas pela INI-C³ para *softwares* de simulação, além de permitir a compreensão dos usos finais de energia. Os componentes arquitetônicos e construtivos, orientação solar e informações sobre ocupação estão detalhados no Capítulo 4, no subitem “Caracterização dos edifícios selecionados para aprofundamento”. Esses dados foram obtidos com base nos projetos arquitetônicos, memoriais descritivos e levantamentos *in loco*.

Dado que se trata de um trabalho exploratório, informa-se que os valores de DPI (Densidade de Potência Instalada) e DPE (Densidade de Potência de Equipamentos) adotados para todos os edifícios foram os da ASHRAE 55 (2017) para edifícios universitários, sendo o DPI de 8,72 W/m², o DPE de 5 W/m² para as salas de aula e de estudos, 7,5 W/m² para as salas administrativas e 21,5 W/m² para salas de informática. Optou-se por utilizar esses valores, dada a dificuldade em se levantar todos os dados e informações dos equipamentos e lâmpadas existentes em cada um dos edifícios. Ressalta-se que a tabela “A.2 – Valores de referência para edificações educacionais” da INI-C apresenta valores de referência para a “etiqueta D” de eficiência energética e, por esse motivo, não será considerada neste estudo, uma vez que os edifícios selecionados já passaram por melhorias como trocas de lâmpadas para LED, alteração em equipamentos, entre outras ações identificadas em campo que não correspondem aos valores desta tabela.

³ O propósito desta dissertação não envolve a avaliação e etiquetagem dos edifícios conforme o método da INI-C. Em vez disso, serão empregados exclusivamente os procedimentos descritos para simulação computacional, com o intuito de estabelecer critérios que possibilitem a replicabilidade do método proposto neste trabalho.

No que diz respeito ao ar-condicionado, observou-se que os edifícios escolhidos não dispõem de um sistema central de condicionamento do ar, sendo que apenas algumas salas possuem unidades individuais. Em vista disso, decidiu-se realizar a simulação do edifício levando em consideração exclusivamente a ventilação natural, visando explorar as estratégias passivas existentes, além de compreender o comportamento térmico do edifício sem o uso de equipamentos mecânicos, como ar-condicionado, por exemplo, dado que é um dos sistemas identificados na literatura como um dos que mais demanda energia.

Em relação aos vidros, observou-se uma variação no tipo de vidro / película utilizada, além de intervenções realizadas pelos usuários, como colocação de papel Contact. Devido à dificuldade na obtenção de informações precisas sobre o tipo de vidro, optou-se por utilizar vidro simples de 3 mm, com FS: 0,81 e Tvis: 0,87. Para o cálculo da área útil, desconsideraram-se as áreas ajardinadas e as projeções de cobertura. Para a demanda energética, obtiveram-se dados em kWh/ano, assim como dados normalizados em kWh/ano.m² (EUI) (Litardo; Hidalgo-Leon; Soriano, 2021). A esse fim, utilizou-se o arquivo climático da cidade de Brasília: BRA_DF_Brasilia-Kubitschek.Intl.AP.833780_TMYx.2009-2023.epw⁴.

Quanto ao conforto térmico, empregou-se o modelo adaptativo ASHRAE 55⁵, com uma taxa de aceitabilidade de 80%. Para realizar o cálculo, considerou-se os dados de umidade relativa, temperatura do ar, temperatura radiante, temperatura operativa e temperatura de bulbo-seco, obtidos por meio de simulação. Esses resultados foram organizados em uma planilha de formato Excel, resultando em gráficos de percentual de horas ocupadas em conforto ou desconforto por calor ou frio. Para o Balanço térmico, analisaram-se as saídas relacionadas ao conforto térmico no edifício, com o objetivo de identificar os principais elementos responsáveis pelos ganhos e perdas térmicas ao longo do ano (Correia; Amorim; Santamouris, 2024).

⁴ Disponível em: https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html#IDDF_Distrito_Federal- Acesso em 02 ago. 2024.

⁵ Disponível em: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>. Acesso em 24 jan. 2024.

Análise da qualidade da iluminação natural

Para a análise da qualidade da iluminação natural, os edifícios foram modelados no *software Rhinoceros* e simulados pelo *plugin Climate Studio*. Esse *plugin* permite o cálculo de métricas dinâmicas de iluminância útil de iluminação natural (UDI – *Useful Daylight Illuminances*), autonomia da luz natural espacial (sDA - *Spatial Daylight Autonomy*), ofuscamento perturbador espacial (sDG - *Spatial Disturbing Glare*) e a probabilidade de ofuscamento pela luz do dia (DGP - *Daylight Glare Probability*). A análise conjunta dessas métricas oferece uma compreensão fundamental de como um espaço deve operar, contribuindo de maneira significativa para a avaliação da qualidade da iluminação natural à medida que as soluções de projeto são elaboradas e aprimoradas (IES, 2021).

Nas simulações, considerou-se:

- I. a **iluminância útil de iluminação natural** (UDI), que é identificada como a porcentagem de horas de um ano em que a iluminância no plano de trabalho limita-se entre 300 e 3.000lux, faixa de iluminação considerada de conforto visual, sendo os valores entre 100 e 300lux considerados suficientes e acima de 3.000lux considerados zonas de desconforto (Mardaljevic, 2021; IES LM 83, 2023; ABNT NBR 15215-4, 2023; PROCEL, 2021);
- II. a **autonomia de luz natural espacial** (sDA), que é identificada como a porcentagem de horas ocupadas por ano em que as iluminâncias no plano de trabalho atingem um valor predeterminado de iluminância, somente de iluminação natural, na qual é exigido que a autonomia seja de no mínimo 50% das horas ocupadas em um ano (Mardaljevic, 2021; IES LM 83, 2023; ABNT NBR 15215-4, 2023; PROCEL, 2021);
- III. o **ofuscamento perturbador espacial** (sDG), que apresenta a porcentagem de vistas na área do piso regularmente ocupada que experimentam ofuscamento perturbador ou intolerável ($DGP > 38\%$) por pelo menos 5% das horas ocupadas (ABNT NBR 15215; *Climate Studio*, 2024);
- IV. e a **probabilidade de ofuscamento pela luz do dia** (DGP), que prevê a probabilidade de que um observador em uma determinada posição de visualização e orientação experimente ofuscamento desconfortável (ABNT NBR 15215, 2024; *Climate Studio*, 2024).

A Tabela 13 apresenta as métricas analisadas, os valores de referência e a classificação.

Tabela 13 – Métricas analisadas e classificação.

Métrica	Valor de Referência	Classificação	Fonte
UDI	< 100 lux	Insuficiente	ABNT NBR 15215-4, 2023;
	100 - 300 lux	Suficiente	
	300 - 3000 lux	Desejável	
	> 3000 lux	Crítico	
sDA	250 lux / 50% horas	Desejável	ABNT NBR 15215-4, 2023;
área do piso com sDA 250/50	Nível I	40%	ABNT NBR 15215-4, 2023;
	Nível II	55%	
	Nível III	70%	
sDG	< 5% das horas	Bom	Solemma LLC, 2024
	≥ 5% das horas	Crítico	
DGP	$DGP \leq 34\%$	Imperceptível	ABNT NBR 15215, 2023; Solemma LLC, 2024
	$34\% < DGP \leq 38\%$	Ofuscamento Perceptível	
	$38\% < DGP \leq 45\%$	Ofuscamento Perturbador	
	$45\% < DGP$	Ofuscamento Intolerável	

Fonte: O autor, 2024.

3.4.2. Otimização

A otimização teve como principais objetivos: a) **redução da demanda energética**; b) **a melhoria da qualidade ambiental**, abrangendo tanto o conforto térmico quanto a qualidade da iluminação natural. Para alcançar esses objetivos, foram exploradas as estratégias passivas descritas na literatura (Tabela 14), buscando maximizar o aproveitamento das condições climáticas locais.

Tabela 14 – Estratégias selecionadas para otimização dos edifícios.

ESTRATÉGIA	AÇÃO	OBJETIVO	REFERÊNCIAS
Dispositivo de Sombreamento	Redimensionar os brises com base na máscara de sombra e orientação solar	Redução da carga térmica e da probabilidade de ofuscamento	Al-Saadi, 2023 Albatayneh, 2021 Lohwanitchai; Jareemit, 2021 Litardo <i>et al.</i> , 2021 Yildiz, Koçyiğit, 2020 Kunwar <i>et al.</i> , 2020 Ballarini <i>et al.</i> , 2019
Tipo de Vidro / Película	Reduzir transmitância térmica, fator solar e transmissão de luz visível	Redução da carga térmica e da probabilidade de ofuscamento	Feng <i>et al.</i> , 2019 Litardo <i>et al.</i> , 2021 Rucińska, Trzaski, 2020 Ballarini <i>et al.</i> 2019
Materiais Frios na Cobertura	Aplicar revestimento frio com refletância de 90%	Redução da carga térmica	Castaldo <i>et al.</i> , 2018 Cabeza <i>et al.</i> , 2018 Yildiz, Koçyiğit, 2020 Correia, 2024
Sistema de Controle da Iluminação	Controlar a iluminação artificial com base na disponibilidade de luz natural	Integração entre luz natural e luz artificial e redução da demanda energética	Litardo <i>et al.</i> , 2021 Amorim <i>et al.</i> , 2021

Fonte: O autor, 2024.

No que diz respeito ao **conforto térmico**, buscou-se alcançar **80%** de pessoas em conforto durante as horas ocupadas (ASHRAE 55, 2024).

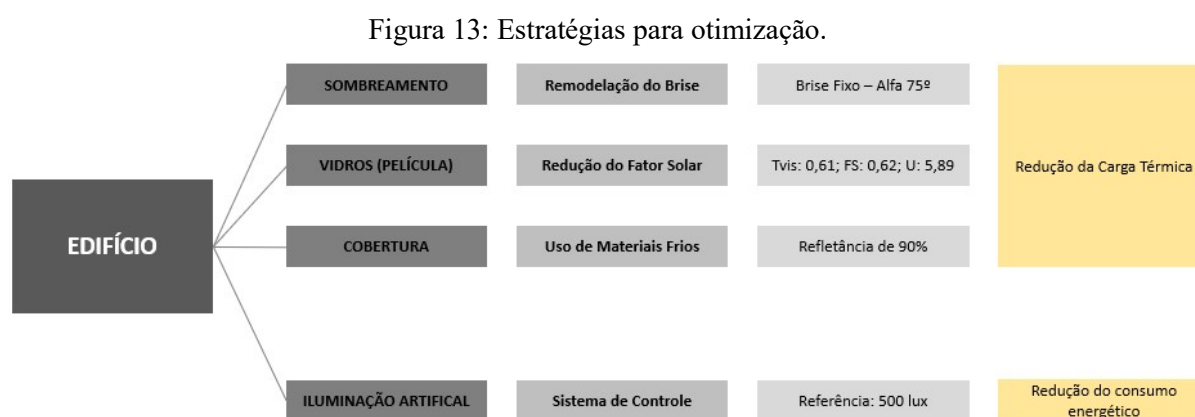
No que diz respeito à **qualidade da iluminação natural**, buscou-se alcançar:

- a) a iluminância útil de iluminação natural (UDI) dentro da faixa de 300 e 3000lux (faixa de conforto visual) por pelo menos 50% das horas com luz do dia, conforme recomendado pela ABNT NBR 15215-4;
- b) a autonomia de luz natural espacial (sDA) com iluminância-alvo de 250 lux em 50% do tempo em 40% da área de piso (Nível I), conforme recomendado pela ABNT NBR 15215-3;
- c) o ofuscamento perturbador espacial (sDG) abaixo de 5% das horas ocupadas;
- d) e a probabilidade de ofuscamento pela luz do dia (DGP) abaixo de 38%.

No que diz respeito à **redução da demanda energética**, empregou-se o sistema de controle da iluminação artificial do próprio *DesignBuilder* como estratégia para reduzir a demanda energética. Esse sistema funciona ajustando automaticamente a intensidade da iluminação artificial com base na quantidade de luz natural disponível nos ambientes (*DesignBuilder Help*, 2024). O *DesignBuilder* simula a incidência de luz natural ao longo do dia, e o sistema de controle de iluminação artificial reduz ou desliga as luzes elétricas quando a luz natural é suficiente para atender aos níveis de iluminância desejados (500lux). Isso não apenas economiza energia, mas melhora o conforto visual dos ocupantes, mantendo uma iluminação adequada e equilibrada nos espaços internos.

Em relação as estratégias: para o **Dispositivo de Sombreamento**, foi elaborada a máscara de sombreamento para cada edifício usando o *software* Analysis Sol-AR (Costa, Amorim e Silva 2020; Correia, Amorim e Santamouris, 2024), que auxilia a determinar os ângulos de sombra alfa (α), beta (β) e gama (γ). Em relação ao **Tipo de Vidro (Película)**, escolheu-se uma película cinza com características específicas de FS 0,64 e Tvis: 0,62 (Optigray Glass, 2020). A combinação de uma Tvis moderada com um FS controlado ajuda a equilibrar a entrada de luz natural e o controle do ofuscamento, melhorando o conforto visual dos ocupantes (Ballarini *et al.*, 2019). Sobre os **Materiais Frios**, aplicou-se um revestimento com 90% de refletância na cobertura existente (Correia, Amorim e Santamouris, 2024).

A Figura 13 apresenta resumidamente as estratégias utilizadas para a otimização dos edifícios do *Cluster 2*.



Fonte: O autor, 2024.

3.5. GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A análise foi conduzida pelo *software DesignBuilder*, uma vez que ele simula e estima a geração de energia fotovoltaica na escala do edifício (Correa, 2024). Para o dimensionamento básico, utilizou-se a “Planilha de dimensionamento básico sistema fotovoltaico – módulos” fornecida pelo Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2023). A primeira etapa compreendeu o preenchimento das informações referentes à irradiação anual para a cidade de Brasília-DF, a eficiência e área do módulo fotovoltaico. Na sequência, inseriu-se a energia a ser gerada para cada edifício, com base na demanda energética simulada pós-otimização, o que resultou no dimensionamento básico do sistema fotovoltaico. A partir disso, as informações de dimensionamento fornecidas pela planilha são: capacidade do sistema em kWp, número de módulos fotovoltaicos, produção anual estimada em kWh e a área necessária para instalação dos módulos em m² (Figura 14). A planilha para cada edifício pode ser consultada no “Apêndice XI”.

Figura 14: Planilha de dimensionamento básico de sistema fotovoltaico.

Planilha de Dimensionamento Básico Sistema fotovoltaico - Módulos			
Dados			
Item	Valor	Unidade	Observação
Irradiação anual (GHI)		kWh/m ²	O valor de Irradiação anual (GHI) pode ser encontrado no site http://globaisolaratlas.info
Eficiência do módulo fotovoltaico			Informação disponível na ficha técnica do módulo.
Área do módulo fotovoltaico		m ²	Informação disponível na ficha técnica do módulo.
Perdas estimadas	20%		A composição de perdas pode ser feita na aba 'Perdas' desta planilha
Geração anual por módulo	0,00	kWh	Geração do módulo = Irradiação x Área do módulo x Eficiência do módulo x (1 - perdas)
Este é um módulo de aproxim.	0	Wp	Potência do módulo em Wp = 1000 * Eficiência * área de superfície do módulo
Limitação: Área disponível			
Área total disponível		m ²	
Fator de utilização da área	70%		
Área possível a ser coberta por módi	0	m ²	
Número de módulos		unidades	
Potência nominal instalada		kWp	
Geração anual calculada		kWh/ano	
Limitação: Energia a ser gerada			
Energia a ser gerada		kWh/ano	
Número de módulos necessari		unidades	
Potência nominal instalada		kWp	
Geração anual calculada		kWh/ano	
Área coberta por módulos		m ²	
Fator de utilização da área	70%		
Área total necessária		m ²	
Limitação: Potência instalada			
Potência limite		kWp	
Número possível de módulos		unidades	
Potência nominal instalada		kWp	
Geração anual calculada		kWh/ano	
Área coberta por módulos		m ²	
Fator de utilização da área	70%		
Área total necessária		m ²	

Fonte: BRASIL, 2023.

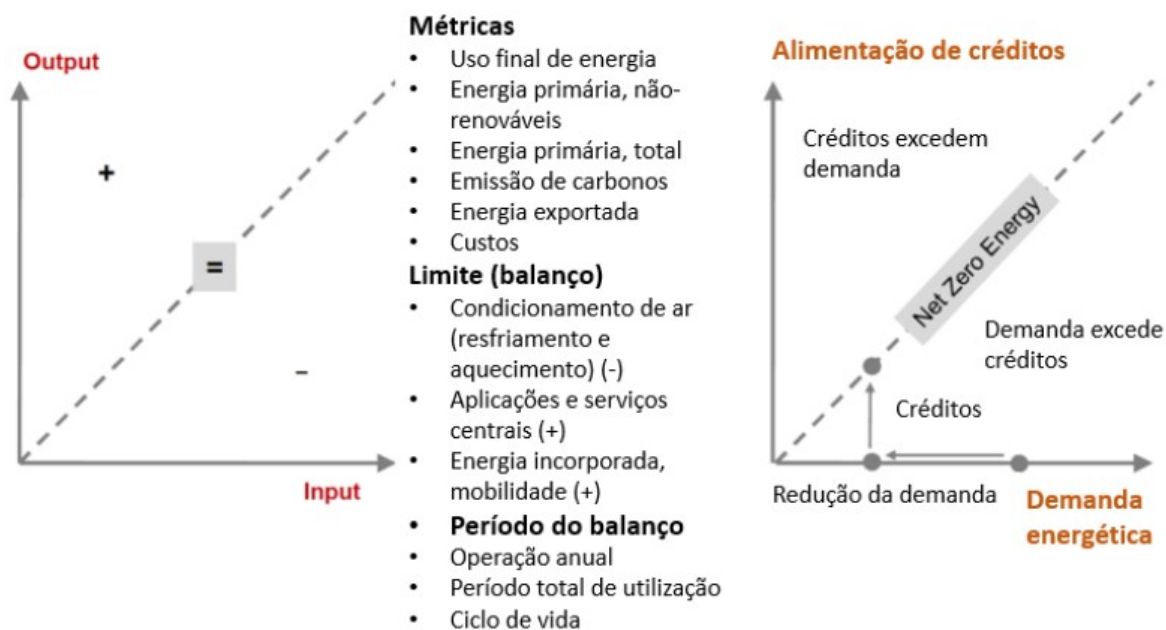
Na sequência, os módulos foram modelados no *software DesignBuilder* e incorporados aos modelos otimizados de cada edifício utilizando a ferramenta de “*design de coletor solar fotovoltaico*”. Para este fim, propõe-se a utilização de módulo fotovoltaico monocristalino, *on-grid*, com eficiência de 25%, potência de 695W⁶. Por fim, foi adotada a inclinação com base na inclinação da cobertura, independentemente da orientação (Cronemberger; Caamaño-Martín, 2020).

⁶ A escolha levou em consideração o módulo de maior potência e melhor eficiência disponível no catálogo da Canadian Solar. Disponível em: <https://www.canadiansolar.com/br/>. Acesso em 03 fev. 2024.

3.6. BALANÇO ENERGÉTICO

A última etapa do processo consistiu na realização do balanço energético do edifício. O balanço energético de um edifício ZEB pode ser mostrado de diversas maneiras, já que o conceito é interpretado de forma diferente por diferentes autores. As métricas utilizadas para isso incluem emissão de gases de efeito estufa, relação entre consumo e produção de energia elétrica, custos de construção em relação aos custos de manutenção, entre outras. Uma abordagem comum é avaliar a relação entre consumo e produção de energia elétrica (Costa; Amorim; Silva, 2020; IEA, 2013). Com base nos resultados do edifício otimizado, será possível obter informações referentes à EUI da edificação em kWh/ano.m² e a estimativa de geração de energia fotovoltaica para, por fim, proceder com o balanço energético do edifício. A Figura 15 apresenta a forma mais utilizada de representar o balanço energético de um edifício.

Figura 15: Representação do balanço energético de um edifício.

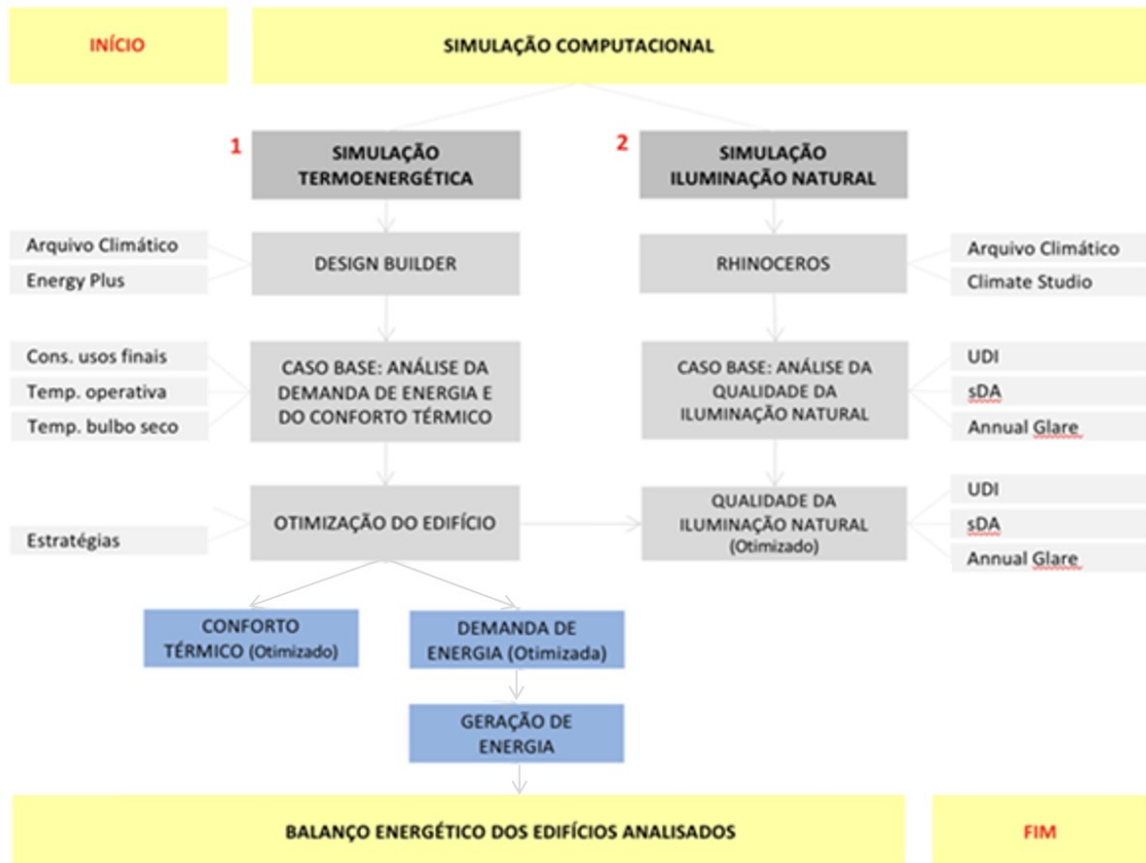


Fonte: IEA *apud* Costa, p. 37, 2018.

Nesse método de representação gráfica, o balanço energético é indicado pela linha tracejada, indicando quando a produção iguala a demanda energética. A métrica adotada neste estudo refere-se à demanda energética pós otimização *versus* produção de energia *in loco* (Costa, 2020).

A partir do exposto, apresenta-se o esquema das simulações que será adotado em cada edifício (Figura 16):

Figura 16: Esquema de simulações que será adotado para cada edifício.



OCUPAÇÃO						
	Uso	Meses	Dias	Horário	Ocupação	Fim de Semana
BSAN	Sala de Aula	Jan - Dez	Seg - Sex	8h às 22h	100%	0%
	Administrativo	Jan - Dez	Seg - Sex	8h às 20h	100%	0%
CDT	Administrativo	Jan - Dez	Seg - Sex	8h às 18h	100%	0%
PJC	Sala de Aula	Jan - Dez	Seg - Sex	8h às 22h	100%	0%

Fonte: O autor, 2024.

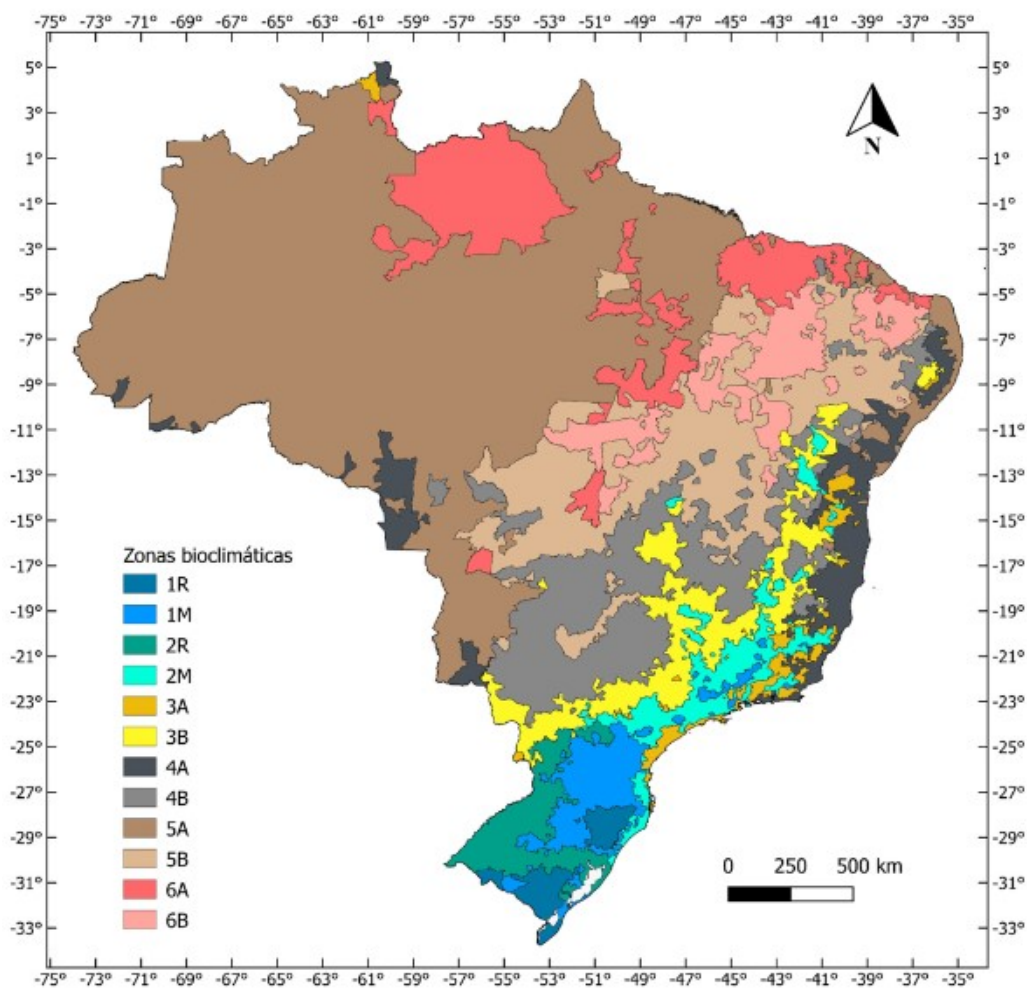
4. OBJETO DE ESTUDO

4.1. CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DE BRASÍLIA

Brasília está localizada no Distrito Federal, Centro-Oeste do Brasil, a uma latitude de 15° Sul e possui uma altitude média de aproximadamente 1100 metros acima do nível do mar. De acordo com a classificação climática de Köppen, a região possui um clima tropical de altitude (CWA), caracterizado por um inverno seco e um verão quente e úmido (CODEPLAN, 2020, p. 31).

Seguindo as diretrizes da ABNT NBR 15.220-3 (2005), Brasília se enquadra na Zona Bioclimática 4. Entretanto, a referida norma está em revisão, na etapa de consulta pública. Nesta revisão, Brasília se enquadra na Zona Bioclimática 3B (Figura 17), caracterizada por um clima misto e seco (ABNT NBR 15.220-3, 2024 – revisão).

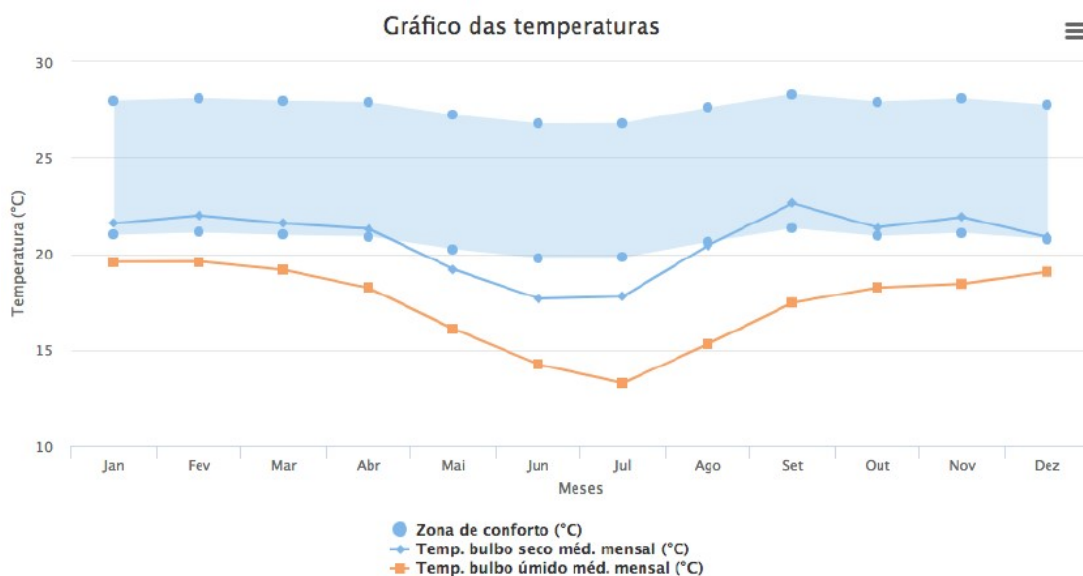
Figura 17: Zoneamento bioclimático por desempenho térmico e umidade relativa.



Fonte: ABNT NBR 15.220-3, 2024 – revisão.

De acordo com os dados da plataforma Projeteee⁷, durante os meses mais frios, especialmente entre junho e julho, as temperaturas em Brasília podem cair abaixo de 18°C, com mínimas históricas atingindo 13°C. Por outro lado, nos meses mais quentes, as temperaturas superam os 22°C, e entre setembro e outubro, a média histórica das temperaturas mais altas alcança 30°C (Figura 18) (CODEPLAN, 2020).

Figura 18: Gráfico das temperaturas médias em Brasília/DF.

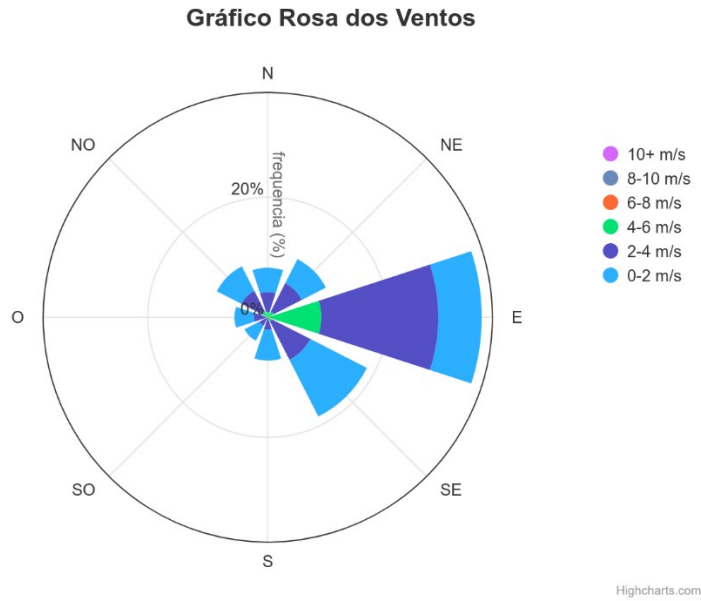


Fonte: Projeteee. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/projeteee/>. Acesso em 09 set. 2024.

Os ventos prevalecem predominantemente no sentido leste, conforme ilustrado na Figura 19, com uma velocidade média anual variando de 2-4 m/s a 4-6 m/s. Durante os períodos quentes, a estratégia bioclimática mais apropriada é a ventilação natural. Para as épocas mais frias, é recomendado o uso de massa térmica para aquecimento e aquecimento solar passivo em aproximadamente 46% das horas ao longo do ano (MME, 2024).

⁷ Ferramenta orienta a construção de edifícios sustentáveis, com informações bioclimáticas de 413 cidades brasileiras.

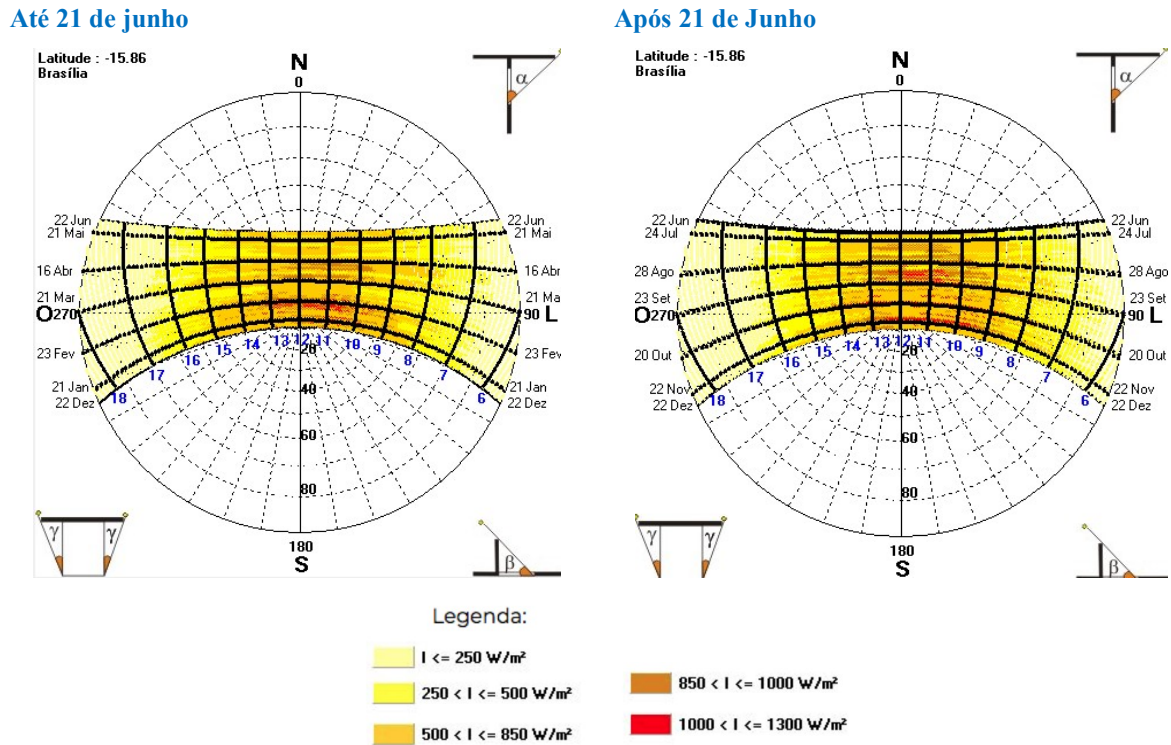
Figura 19: Gráfico das Rosa dos Ventos de Brasília/DF.



Fonte: Projeteee. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/projeteee/>. Acesso em 09 set. 2024.

A Figura 20 apresenta a carta solar com plotagem da radiação solar anual, que ilustra graficamente o movimento aparente do Sol ao longo do céu durante o dia, ao longo do ano, para a cidade de Brasília.

Figura 20: Carta Solar de Brasília/DF.

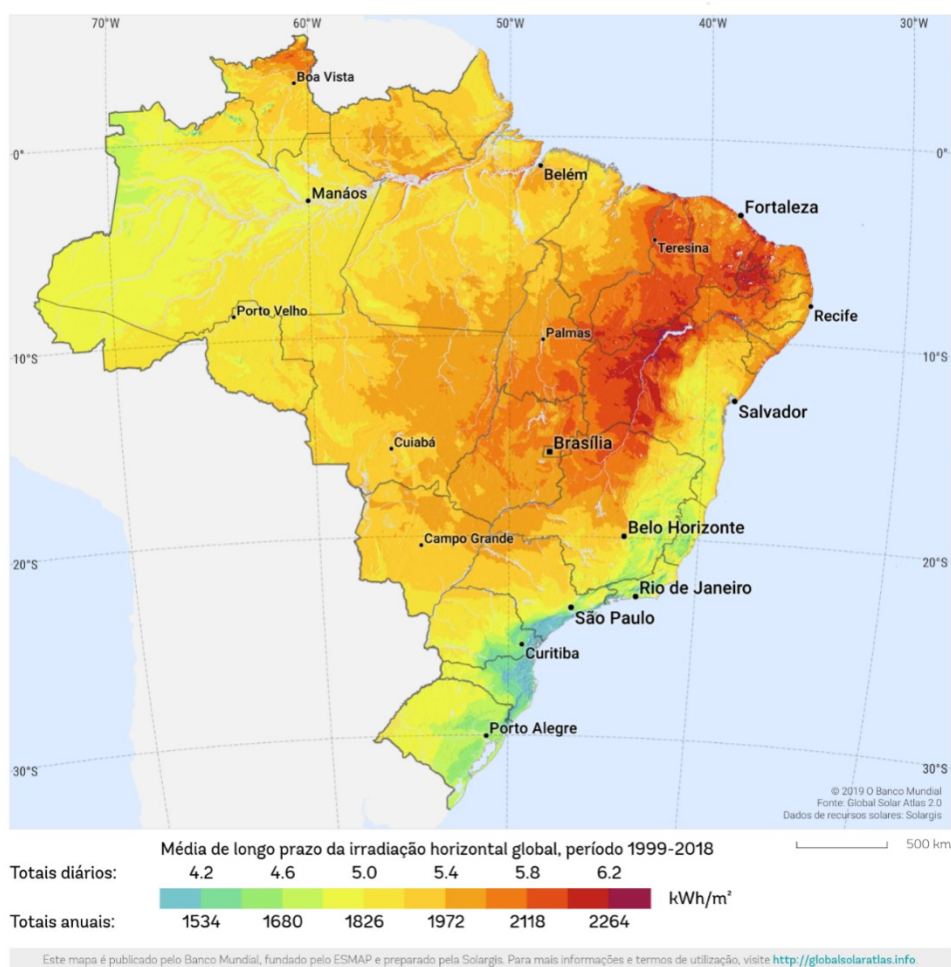


Fonte: Analysis SOL-AR. Disponível em: <https://labeec.ufsc.br/sites/default/files/entradaDadosSolar.zip>. Acesso em 09 set. 2024.

A estação chuvosa na região de Brasília ocorre de outubro a abril, período em que cerca de 90% das precipitações se concentram. Por outro lado, na estação seca, que se estende de maio a setembro, raramente ocorrem chuvas acima de 9,0 mm por mês. A média anual de precipitação varia de 1100 mm a 1600 mm. No que diz respeito à umidade relativa do ar, durante a estação chuvosa, oscila entre 70% e 80%, enquanto na estação seca, os valores são significativamente mais baixos, podendo chegar a níveis de umidade inferiores a 20% (CODEPLAN, 2020).

De acordo com dados do Global Solar Atlas (2020), a irradiação horizontal global (GHI) média anual em Brasília é de 1941,8 kWh/m² (Figura 21). Isso evidencia o grande potencial (Figura 22) da cidade para a utilização de energia solar de fonte fotovoltaica como fonte de energia renovável, uma vez que o potencial de geração de energia fotovoltaica (PVOUT) atinge 1697,3 kWh/kWp por ano (Global Solar Atlas, 2020).

Figura 21: Mapa de Irradiação Horizontal Global.



Fonte: Global Solar Atlas. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/download/brazil>. Acesso em 27 set. 2023.

Figura 22: Potencial de Geração de Energia Fotovoltaica.



Fonte: Global Solar Atlas. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/download/brazil>. Acesso em 27 set. 2023.

4.2. A UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

A Universidade de Brasília – UnB é uma universidade pública localizada em Brasília, no Distrito Federal. Possui 4 *campi*, sendo eles o Darcy Ribeiro, Ceilândia, Gama e Planaltina. Além desses, desenvolve atividades em várias Unidades Dispersas pela cidade. O *Campus* Darcy Ribeiro, objeto deste estudo, possui uma área de cerca de 400 hectares entre a Asa Norte e o Lago Paranoá (Silva *et al.*, 2022).

Com mais de seis décadas de existência, o *Campus* Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília abriga edifícios que já ultrapassaram a vida útil prevista nas normas. Portanto, ao se pensar na renovação desses edifícios, é necessário realizar análises e avaliações das diferentes características físicas de suas construções, considerando tanto a sua estrutura quanto a sua idade de construção (Silva *et al.*, 2022).

Figura 23: Glebas A, B e C do *Campus* Darcy Ribeiro.



Fonte: Silva *et al.*, 2022, adaptado pelo autor.

As glebas A, B e C (Figura 23) são compostas por um total de 93 edifícios / conjunto de edifícios de diferentes tipos, incluindo salas de aulas, laboratórios, gabinetes de professores, salas administrativas, secretarias, restaurantes, moradia universitária, hospitais entre outros.

A fonte de energia utilizada no *campus* é a elétrica. Ressalta-se, ainda, que há apenas um medidor para todo o *campus*, e que o consumo individual de eletricidade dos edifícios é desconhecido. Com base nisso, o consumo mensal de eletricidade dos últimos 5 anos é resumido na Tabela 15, e inclui a energia para iluminação pública, edifícios e demais estruturas arquitetônicas e urbanísticas que dependem de energia espalhadas pelo *campus*. Nota-se que no período que compreende os anos de 2020 a 2022, o consumo de eletricidade apresentado é inferior em função dos trabalhos remotos devido à pandemia de COVID-19.

Tabela 15 – Consumo de energia do *Campus* Darcy Ribeiro.

CONSUMO DE ENERGIA (KWH)					
	2018	2019	2020	2021	2022
Janeiro	1.317.983	1.568.594	1.489.066	839.616	1.068.442
Fevereiro	1.823.409	1.780.035	1.699.500	1.067.993	1.098.947
Março	1.572.103	1.568.594	1.507.269	976.856	1.080.352
Abril	2.026.279	1.947.603	1.292.050	964.826	1.248.462
Maió	1.747.893	1.791.301	1.011.466	1.011.388	1.247.695
Junho	1.796.147	1.837.083	1.005.052	1.105.188	1.176.972
Julho	1.669.698	1.545.281	918.436	1.020.653	-
Agosto	1.549.942	1.450.404	971.667	1.001.897	-
Setembro	1.890.180	1.775.374	1.044.852	1.072.613	-
Outubro	1.956.435	1.895.631	1.062.721	1.164.064	-
Novembro	2.008.824	2.082.734	1.134.955	1.199.252	-
Dezembro	1.827.765	1.866.996	1.030.932	1.043.987	-

Fonte: Prefeitura do *Campus*, 2023.

Nota: Valores em vermelho compreende o período da pandemia de COVID-19.

No caso em questão, o consumo energético do *campus* é registrado de forma agregada, sem distinção entre o uso das edificações e da iluminação pública. Essa falta de monitoramento separado impossibilita uma análise detalhada do consumo de energia exclusivamente para os edifícios. Por essa razão, uma estimativa do consumo energético por metro quadrado de área construída não pode ser realizada, uma vez que a inclusão da iluminação pública (postes, luminárias, refletores entre outros) na conta total comprometeria a precisão de tal cálculo. Qualquer tentativa de separação dos dados sem informações adequadas sobre o consumo individualizado de eletricidade não seria confiável, tornando a abordagem supracitada inviável para este trabalho.

4.3. ESTUDOS DE CASOS

Esta seção apresenta a caracterização dos edifícios selecionados para aprofundamento nesta dissertação, especificamente o *cluster 2*, com informações referentes à arquitetura, aos acabamentos e às propriedades dos materiais. Os resultados referentes às análises com diagrama morfológico podem ser consultados nos Apêndices “IV e IX”.

4.3.1. BSAN - Bloco de Salas de Aulas Norte

O edifício **BSAN - Bloco de Salas de Aula Norte** foi projetado pelos arquitetos Alberto Alves de Faria, Fabiana Couto Garcia e Fátima Lauria Pires, e segue o projeto denominado UAC – Unidade Acadêmica, concebido para abrigar atividades de ensino, incluindo salas de aula, biblioteca, auditório, entre outros. Possui uma área de 4485 m². O pé-direito das salas no primeiro pavimento é de 2,78 m e, no segundo pavimento, 3,48 m. Desenvolve-se em dois pavimentos, sendo o térreo composto por salas de aula, espaços administrativos e serviços, e o primeiro pavimento por salas de aula e auditório. Além do *Campus Darcy Ribeiro*, foi replicado nos *campi* de Planaltina, Gama e Ceilândia, adaptando-se ao programa de necessidades de cada *campus* (CEPLAN, 2017).

Figura 24: Localização do edifício – BSAN.



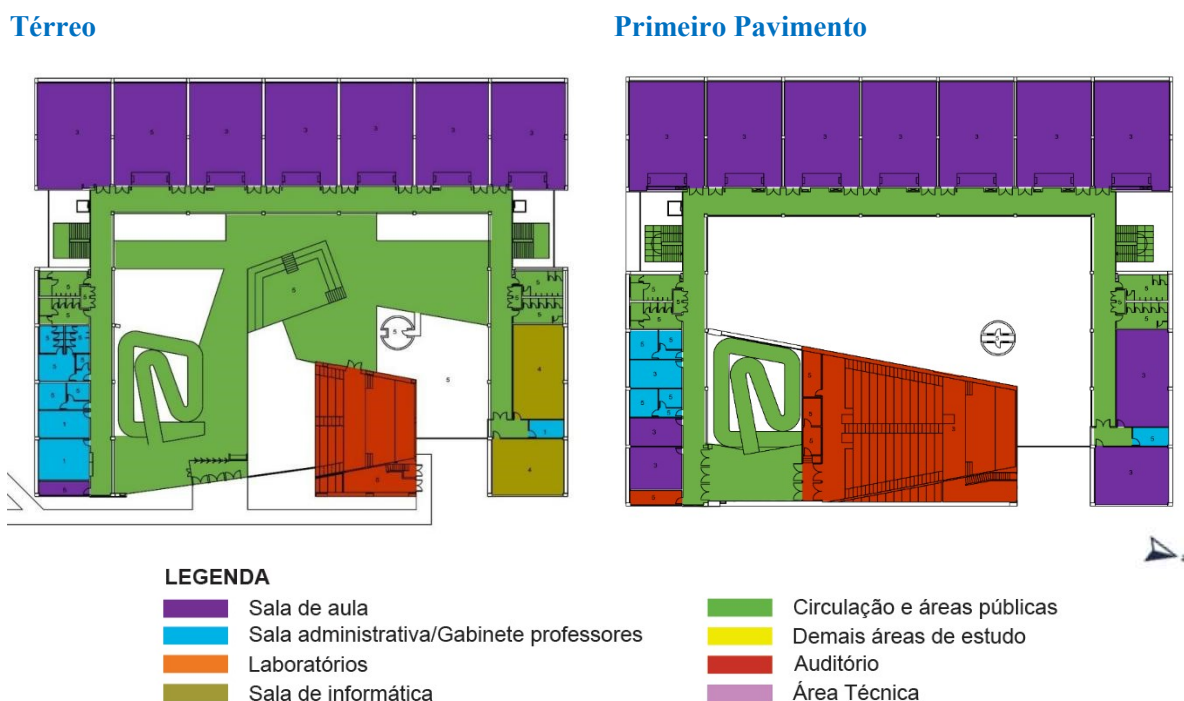
Fonte: Google Earth, adaptado pelo autor, 2024.

Construído em 2015, o edifício está situado no Setor Norte (Figura 24) do *Campus Darcy Ribeiro*. O sistema estrutural da edificação é em concreto armado, e suas vedações são compostas por alvenaria de blocos cerâmicos com reboco de argamassa comum em ambos os lados. A entrada está concentrada em um único hall, por meio do qual se acessa o átrio interno.

Sua fachada principal está voltada para Nordeste. As demais fachadas são sombreadas por brises e cobogós. Os edifícios e vegetação circundantes não causam sombreamento ao edifício, possibilitando a incidência direta de radiação solar em todas as fachadas. Conforme a classificação com o diagrama, a edificação possui potencial para uso de estratégias passivas de nível alto, devido à sua forma de compacidade mediana, presença de pátio central e baixo percentual de aberturas na fachada (PAF = 22%). A edificação é ocupada das 8h às 22h de segunda a sexta-feira e permanece fechada aos fins de semana.

A Figura 25 apresenta as plantas do edifício e a setorização com base nos usos.

Figura 25: Planta do Térreo e do Primeiro Pavimento – BSAN.



Fonte: CEPLAN, adaptado pelo autor, 2024.

As salas de aula possuem capacidade para até 100 pessoas. Foram projetadas com grandes aberturas laterais, equipadas com esquadrias do tipo pivotante, de vidro simples e acionamento manual. No pavimento térreo, o modelo de esquadria não possui bandeira, o que limita o controle do usuário sobre o fluxo de ventilação. As esquadrias do segundo pavimento possuem bandeira pivotante, oferecendo maior controle sobre a ventilação. Observa-se ainda uma intervenção realizada após a construção do edifício, que incluiu a aplicação de uma película azul (papel Contact) nos vidros das esquadrias (Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29), o que reduz significativamente a transmissão luminosa. Algumas salas (aula ou

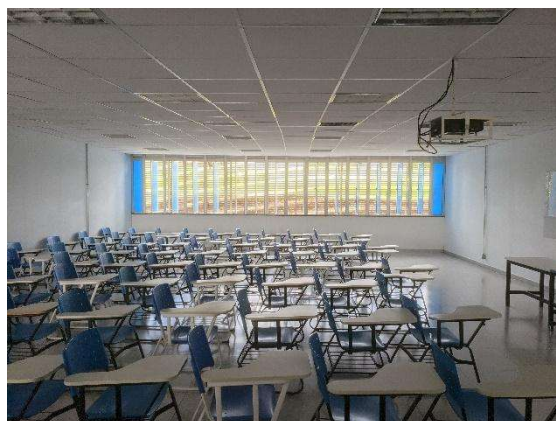
administrativa) estão equipadas com projetores, computadores, impressoras, micro-ondas, refrigeradores, cafeteiras, entre outros itens. A iluminação artificial é provida por lâmpadas LED instaladas em luminárias embutidas com aletas. Não há sistema central de climatização, sendo ventilado naturalmente, com exceção da sala de informática que possui um único aparelho de ar-condicionado do tipo split.

Figura 26: Sala de Aula do térreo com as janelas fechadas.



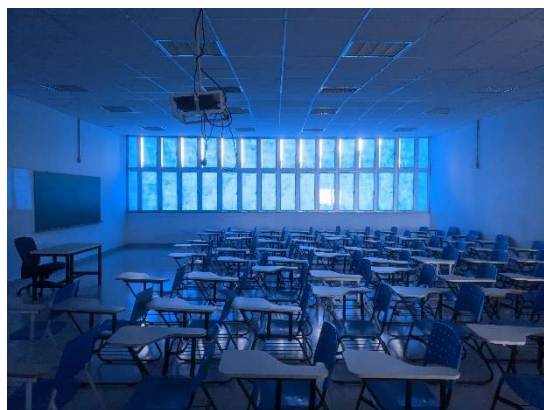
Fonte: Acervo do autor, 2024.

Figura 27: Sala de Aula do térreo com as janelas abertas.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

Figura 28: Sala de Aula do segundo pavimento com as janelas fechadas.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

Figura 29: Sala de Aula do segundo pavimento com as janelas abertas.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

4.3.2. CDT – Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico

O edifício **CDT – Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico** foi projetado pelos arquitetos Leandro Drumond Marques e Alberto Alves de Faria. Possui área de 3946 m² e pé-direito de 2,80 m. O edifício é composto por dois pavimentos com um pátio interno, sendo seu espaço destinado ao uso administrativo (CEPLAN, 2017). Construído em 2008, está situado no Setor Sul (Figura 30) do *Campus Darcy Ribeiro*. O sistema estrutural da edificação é em estrutura metálica e suas vedações em alvenaria de blocos cerâmicos com reboco de argamassa comum em ambos os lados. Suas fachadas principais estão orientadas para norte / sul, e o sombreamento da fachada norte é feito por meio de brises móveis. Conforme a classificação com o diagrama morfológico, a edificação possui potencial para uso de estratégias passivas de nível alto, devido à sua forma de compacidade mediana, presença do átrio central e médio percentual de aberturas na fachada (PAF – 40%). A edificação é ocupada das 8h às 18h de segunda a sexta-feira e permanece fechada aos fins de semana.

Figura 30: Localização do edifício – CDT.



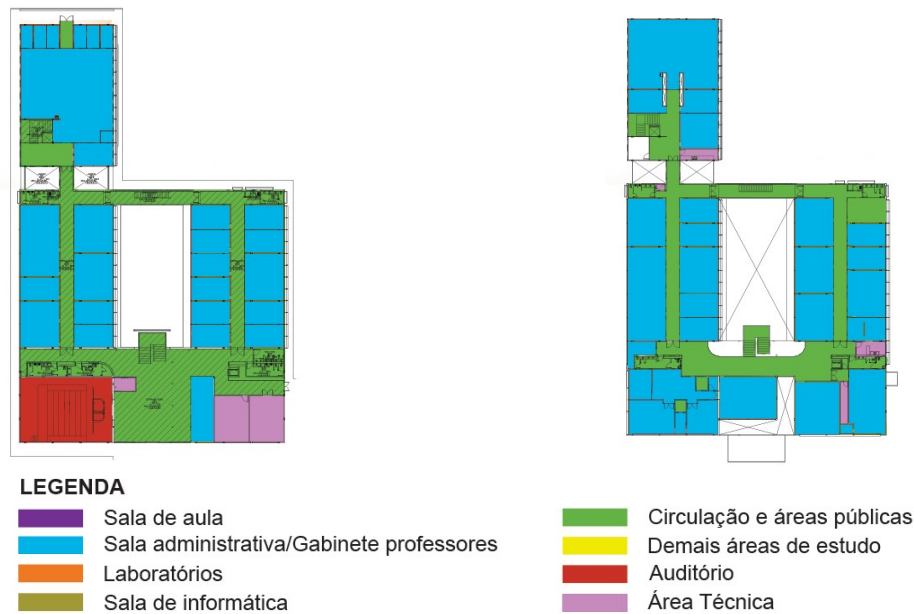
Fonte: Google Earth, adaptado pelo autor, 2023.

A Figura 31 apresenta as plantas do edifício e a setorização com base nos usos.

Figura 31: Planta do Térreo e do Primeiro Pavimento – CDT.

Térreo

Primeiro Pavimento



Fonte: CEPLAN, adaptado pelo autor, 2024.

As aberturas são compostas por esquadrias do tipo correr, algumas com vidro simples incolor, outras com vidro com película (Figura 32, Figura 33). Alguns ambientes estão equipados com computadores, impressoras, micro-ondas, refrigeradores, cafeteiras, entre outros itens. A iluminação artificial é provida por lâmpadas LED, instaladas em luminárias de sobrepor com aletas. Não há sistema central de climatização, sendo ventilado naturalmente. Entretanto, algumas salas possuem aparelhos de ar-condicionado individuais.

Figura 32: Vista geral do edifício – Fachada.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 33: Vista lateral do edifício.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

4.3.3. PJC – Pavilhão João Calmon

O edifício **PJC – Pavilhão João Calmon** foi projetado pelos arquitetos Cláudio Queiroz, Cláudio Sasse, Suzana Souza e Rosmery Hokino, possui área de 2800 m² e pé-direito é de 2,98 m. É composto por um único pavimento (térreo), no qual se distribuem as salas de aula, conectadas por um corredor central. Abriga salas de aula para os diversos cursos da universidade (CEPLAN, 2017).

Construído entre os anos 1999 e 2000, o edifício está situado no Setor Norte (Figura 34) do *Campus Darcy Ribeiro*, onde foi replicado (PAT – Pavilhão Anísio Teixeira). O sistema estrutural da edificação é em chapas dobradas de aço SAC, assim como suas vedações opacas. As fachadas principais estão orientadas para leste / oeste e o sombreamento é realizado por meio de brises fixos. As aberturas são compostas por esquadrias de piso a teto, do tipo correr, com vidro com película (Figura 36 e Figura 37). Conforme a classificação com o diagrama, a edificação possui potencial para uso de estratégias passivas de nível médio, devido à sua forma de baixa compacidade e baixo percentual de aberturas na fachada (PAF = 25%). As salas de aula têm capacidade para acomodar cerca de 50 pessoas, sendo a maioria equipada apenas com projetor. A iluminação artificial é provida por lâmpadas LED, instaladas em luminárias de sobrepor com aletas. Não há sistema central de climatização no edifício, sendo ventilado naturalmente.

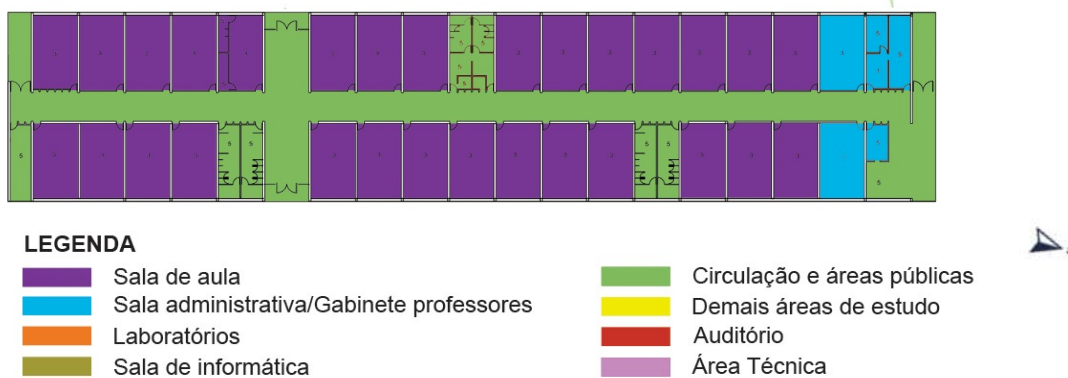
Figura 34: Localização do edifício – PJC.



Fonte: Google Earth, adaptado pelo autor, 2023.

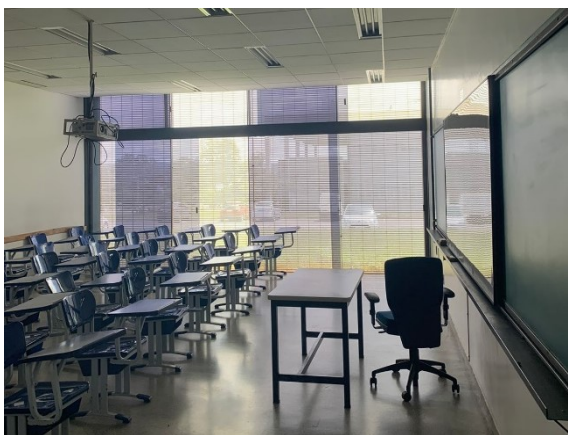
A Figura 35 apresenta as plantas do edifício e a setorização com base nos usos.

Figura 35: Planta do Térreo – PJC.



Fonte: CEPLAN, adaptado pelo autor, 2023.

Figura 36: Vista geral da sala de aula [1].



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 37: Vista geral da sala de aula [2].



Fonte: Acervo do autor, 2023.

4.4. TABELA RESUMO

A Tabela 16 apresenta um resumo das principais características dos edifícios que compõem o *cluster 2*, incluindo as propriedades térmicas dos materiais.

Tabela 16 – Tabela resumo – edifícios do *cluster 2*.

CLUSTER 2	USO	DIAGRAMA MORFOLÓGICO	REPLICADO	MONITORADO	ORIENTAÇÃO	FF	PAF	PROT. SOLAR	PAREDES						COBERTURA					
									TIPO	R [m ² K/W]	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	COR	ABSORTÂNCIA	TIPO	R [m ² K/W]	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	COR	ABSORTÂNCIA
BSAN - Bloco de Salas de Aula Norte (UAC - Unidade Acadêmica)	[BSA-ADM]	1	Sim	Sim	LESTE / OESTE	0,35	22%	SIM	Alvenaria + Argamassa de revestimento	0,43	2,32	168,12	BRANCA	0,15	Laje maciça + telha metálica trapezoidal + forro	0,81	1,23	458,8	CINZA-CLARA	0,55
CDT - Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico	[ADM]	1	Não	Não	LESTE / OESTE	0,37	40%	SIM	Alvenaria + Argamassa de revestimento	0,43	2,32	168,12	BEGE-CLARA	0,41	Laje maciça + telha metálica	0,33	1,80	169,0	CINZA-CLARA	0,55
PJC - Pavilhão João Calmon	[BSA]	2	Sim	Sim	LESTE / OESTE	0,38	25%	SIM	Aço	0,3	3,4	27,1	BRANCA	0,15	Telha metálica + forro	0,3	3,4	27,1	CINZA-CLARA	0,55

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados das simulações realizadas para os edifícios que compõem o *cluster 2*. A análise apresenta o desempenho energético desses edifícios, destacando os principais fatores que impactam a eficiência, como o consumo de energia para iluminação e outros equipamentos. Além disso, são abordadas as estratégias de otimização aplicadas para melhorar o conforto térmico e a eficiência energética, considerando tanto soluções apresentadas na seção de materiais e métodos desta dissertação.

5.1. CASO-BASE

5.1.1. Conforto térmico

No que diz respeito ao conforto térmico, para cada edifício, selecionaram-se algumas salas para avaliar as condições de conforto. A análise baseou-se no modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55, com índice de aceitabilidade de 80% para conforto. Os gráficos seguintes apresentam o percentual de horas ocupadas em que os usuários estarão em conforto ou desconforto por frio ou calor, por mês, para as salas selecionadas dos edifícios BSAN, CDT e PJC.

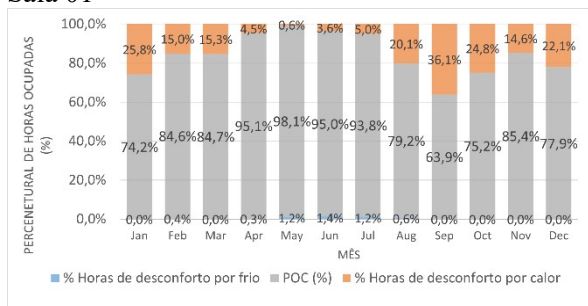
6.1.2.1. BSAN – Bloco de Salas de Aula Norte

A análise apontou alguns desafios no que diz respeito ao conforto térmico do edifício BSAN ao longo do ano (Figura 38). Observou-se uma variação de conforto entre os pavimentos. No pavimento térreo, os meses de janeiro, agosto, setembro e outubro se destacam como os mais críticos em termos de desconforto térmico, com um aumento nos usuários em desconforto térmico dentro das horas ocupadas, especialmente no mês de setembro. No entanto, no primeiro pavimento, a situação é ainda mais crítica, onde apenas os meses de maio, junho e julho apresentam conformidade com o critério da ASHRAE 55. A sala 11, localizada no primeiro pavimento, é um exemplo claro dessa condição, com mais de 60% dos usuários em desconforto térmico durante as horas ocupadas no mês de setembro, sendo a situação mais crítica desse edifício.

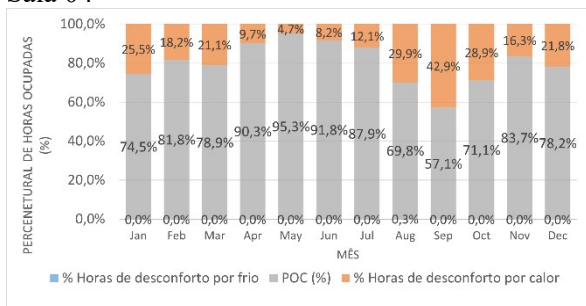
Figura 38: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês – BSAN (caso-base).

Térreo

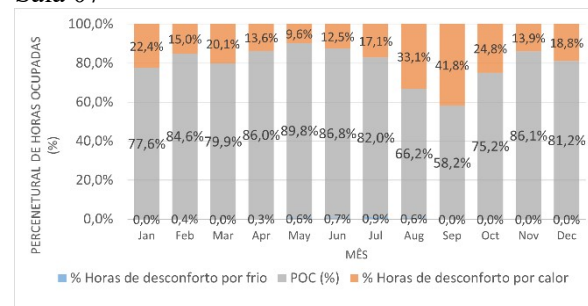
Sala 01



Sala 04

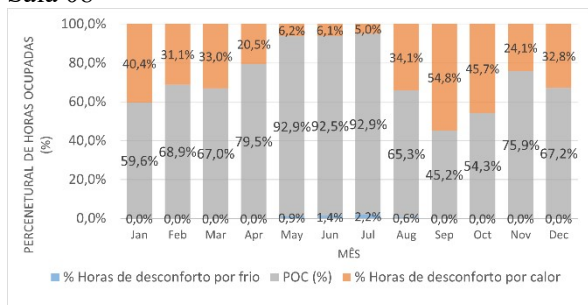


Sala 07

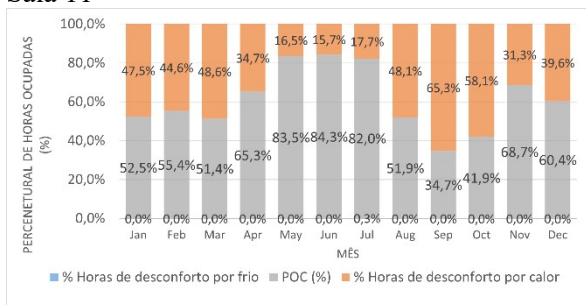


Primeiro Pavimento

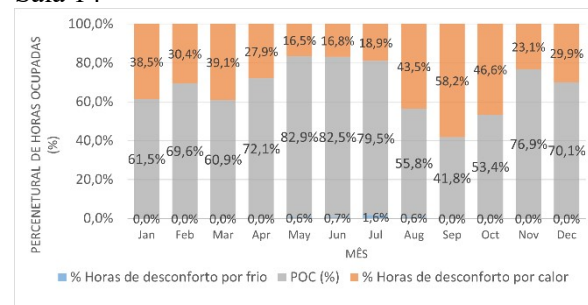
Sala 08



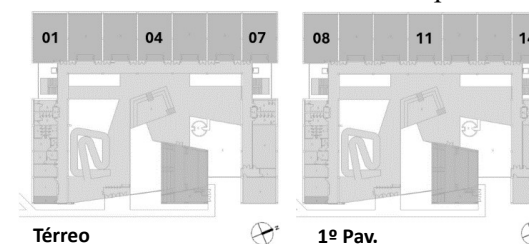
Sala 11



Sala 14



Mapa-chave

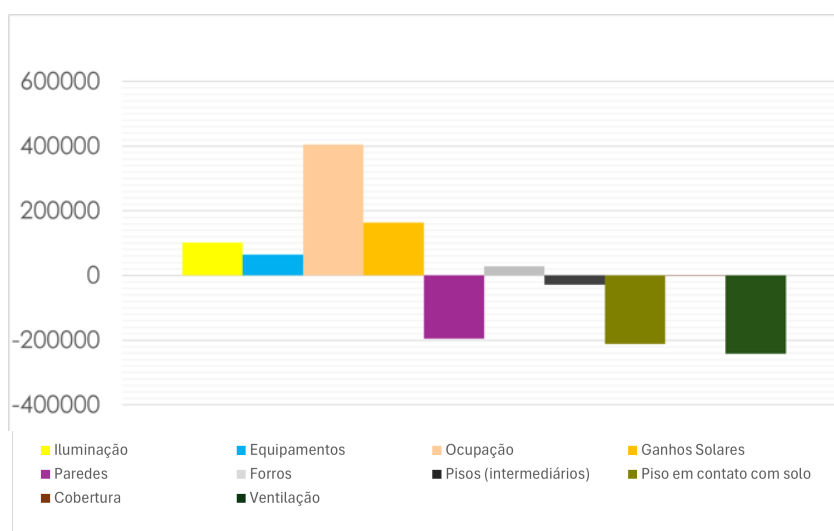


Fonte: Design Builder, 2024.

Isso pode ser justificado pela radiação solar direta, que, devido à orientação das fachadas e elementos de sombreamento inadequados, resulta em um ganho térmico significativo pelas janelas, ao longo de um ano, conforme balanço térmico apresentado na Figura 39. As grandes superfícies envidraçadas com tipo de vidro inadequado permitem a entrada de altas quantidades de radiação solar, o que, sem sombreamento eficaz, eleva as temperaturas internas além dos limites recomendados para o conforto (Costa, Amorim e Silva, 2020; Litardo *et al*, 2021).

Figura 39: Balanço térmico anual do edifício – BSAN (caso-base).

BSAN



Fonte: *Design Builder*, 2024.

Conforme o gráfico de balanço térmico (Figura 39), notou-se que os principais fatores que contribuem para o aumento da temperatura interna no BSAN são os ganhos térmicos gerados pela ocupação, seguidos pelos ganhos solares. A presença constante de usuários gera calor que, somado à radiação solar que penetra pelas janelas, aumenta a carga térmica dos ambientes. Embora a ocupação seja inevitável em um edifício universitário em uso regular, a falta de sombreamento adequado nas janelas externas agrava o aquecimento interno. Além disso, o calor produzido pela iluminação artificial, durante os horários de maior demanda, também contribui para o aumento da temperatura. As perdas térmicas no BSAN ocorrem principalmente por meio das superfícies construtivas, como paredes e pisos em contato com o solo, e pela ventilação natural, que ajuda na dissipação do calor. Contudo, essas trocas térmicas nem sempre são suficientes para compensar os elevados ganhos de calor.

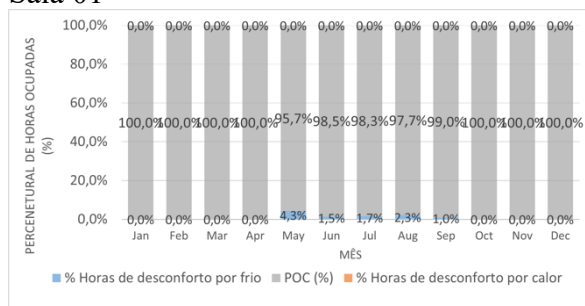
6.1.2.2 – CDT – Centro de Desenvolvimento Sustentável

No edifício CDT, o conforto térmico também varia entre os pavimentos (Figura 40). Nas salas do térreo, o conforto térmico é mantido durante todas as horas ocupadas, o que pode ser justificado pela inércia térmica proporcionada pelo contato direto do piso com o solo. A transferência de calor através do solo é mais lenta, o que reduz os picos de temperatura interna e promove um ambiente mais estável termicamente (Lamberts, Dutra e Pereira, 2014). No entanto, o pavimento superior enfrenta um cenário diferente, com períodos de desconforto térmico fora do critério de 80% de aceitabilidade nos meses de setembro e outubro.

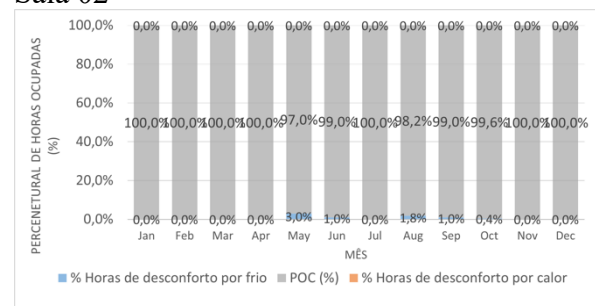
Figura 40: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês – CDT (caso-base).

Térreo

Sala 01

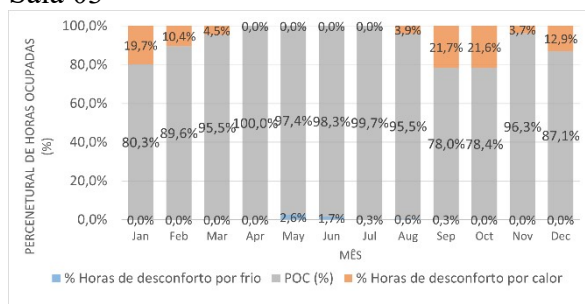


Sala 02

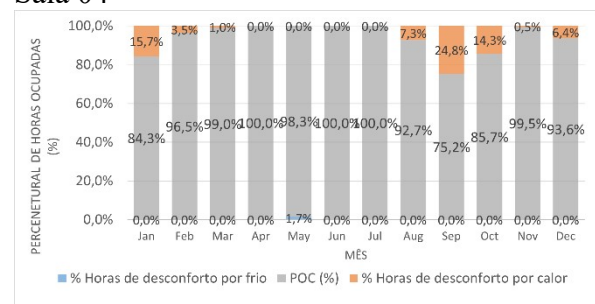


Primeiro Pavimento

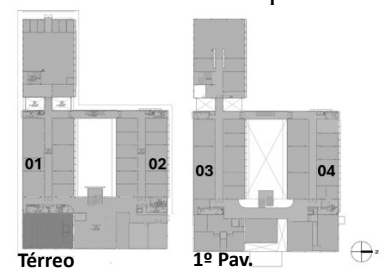
Sala 03



Sala 04



Mapa-chave

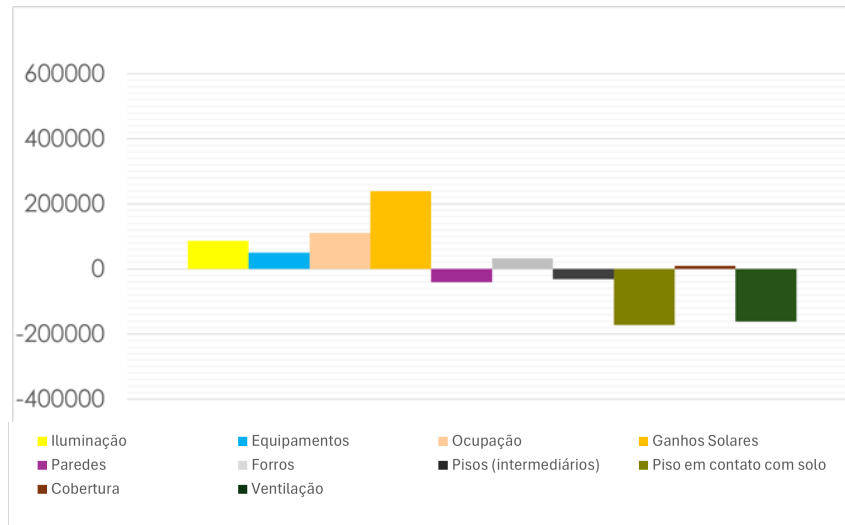


Fonte: Design Builder, 2024.

Com base no gráfico de balanço térmico, nota-se que isso ocorre principalmente por causa dos ganhos térmicos pelas janelas, iluminação artificial e ocupação (Figura 41).

Figura 41: Balanço térmico anual do edifício – CDT (caso-base).

CDT



Fonte: *Design Builder*, 2024.

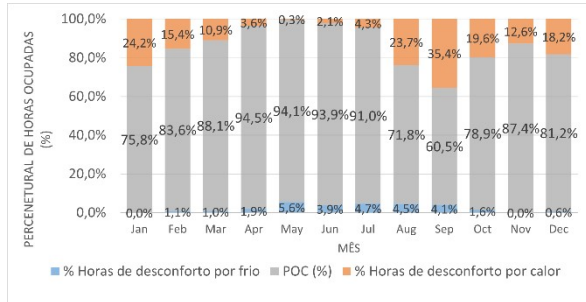
No caso do edifício CDT, os ganhos térmicos mais relevantes decorrem da radiação solar, particularmente intensificada (no gráfico) pela ausência de brises nas fachadas leste e sul. Essa falta de proteção solar permite que os raios solares entrem diretamente nos ambientes, elevando a temperatura interna, o que é confirmado ao analisar salas voltadas para essas orientações (Figura 44). A iluminação natural, apesar de contribuir para a redução do uso de luz artificial, também é um fator de aquecimento devido à falta de controle sobre a intensidade da luz que penetra nos espaços, devendo, portanto, haver um equilíbrio entre elas. Já as perdas térmicas no CDT ocorrem predominantemente pelo piso em contato com o solo, que facilita a transferência de calor, e pela ventilação natural, que ajuda a dispersar o calor, assim como no BSAN.

6.1.2.3. PJC – Pavilhão João Calmon

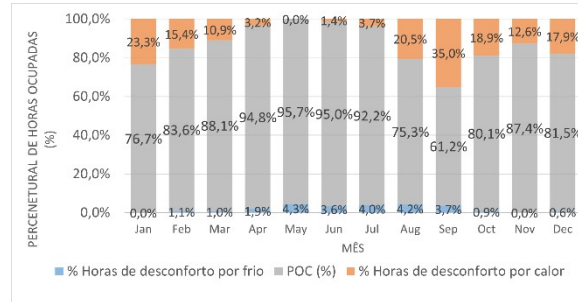
O edifício PJC apresenta um padrão térmico homogêneo entre as salas analisadas (Figura 42, com um comportamento de desconforto acentuado nos meses de janeiro, agosto, setembro e outubro. Nos demais meses, o edifício mantém o conforto térmico dentro da faixa (ou acima) de 80% de aceitabilidade (Figura 42).

Figura 42: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês – PJC (caso-base).

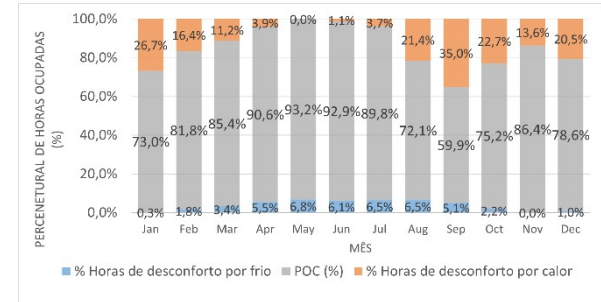
Térreo
Sala 02



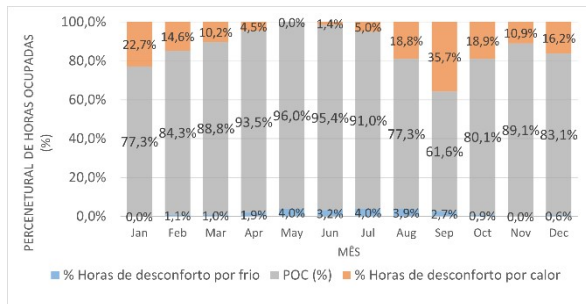
Sala 09



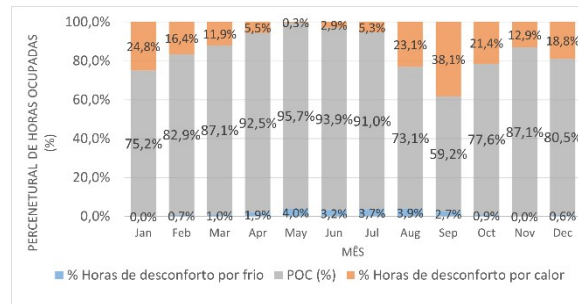
Sala 17



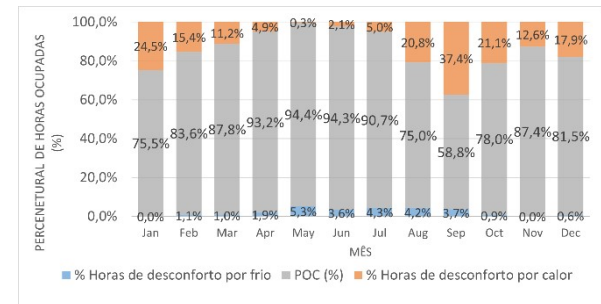
Primeiro Pavimento
Sala 18



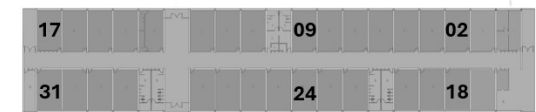
Sala 24



Sala 31



Mapa-chave

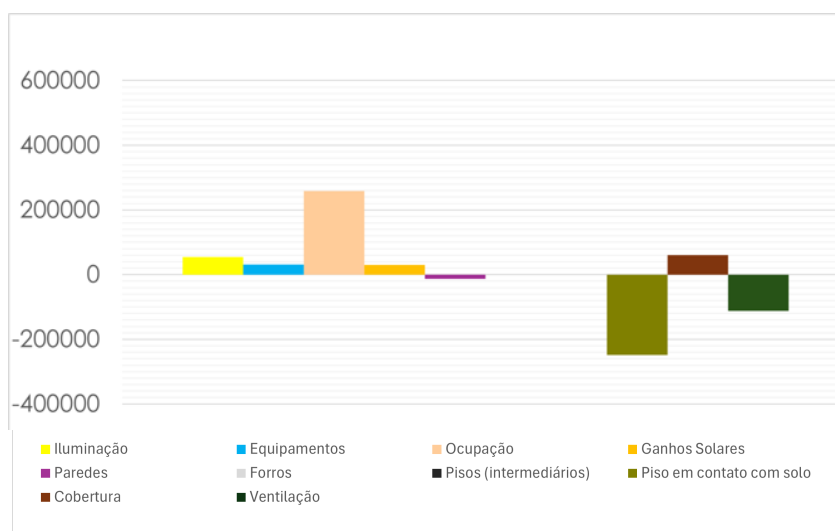


Fonte: Design Builder, 2024.

O principal fator de ganho térmico é a ocupação, uma variável intrínseca ao uso do edifício que não pode ser modificada, dada a natureza funcional do espaço universitário. Além disso, há um significativo ganho de calor pela cobertura, que, devido à sua exposição solar direta, contribui para o aumento da carga térmica interna (Figura 43). As perdas térmicas no PJC seguem um padrão similar ao dos outros edifícios, ocorrendo principalmente pelo piso em contato com o solo e pela ventilação natural. A ventilação, assim como nos outros casos, desempenha um papel importante na tentativa de reduzir as temperaturas internas, mas enfrenta limitações diante dos altos níveis de ganhos térmicos (Figura 43).

Figura 43: Balanço térmico anual do edifício – PJC (caso-base).

PJC

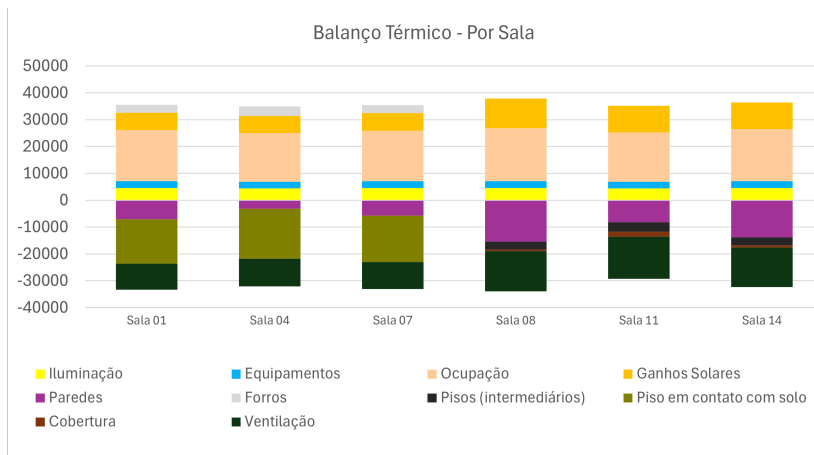


Fonte: *Design Builder*, 2024.

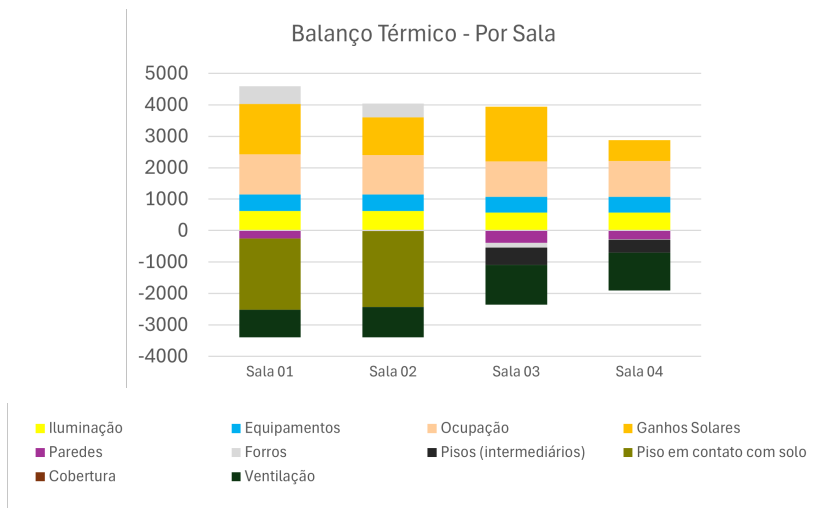
Em resumo, a análise dos três edifícios aponta para uma necessidade comum de melhorias nos sistemas de sombreamento, especialmente no BSAN e CDT, onde as fachadas sofrem maior exposição solar. Isso indica que estratégias que abordem o controle dos ganhos térmicos solares podem contribuir significativamente para o conforto térmico e a eficiência energética dos edifícios. A Figura 44 apresenta o balanço térmico anual por fonte para as salas selecionadas para estudo, o que permite visualizar com mais clareza os principais ganhos e perdas térmicas ao longo do ano, que influenciam diretamente no desempenho térmico desses ambientes.

Figura 44: Balanço térmico anual por fonte por sala (caso-base).

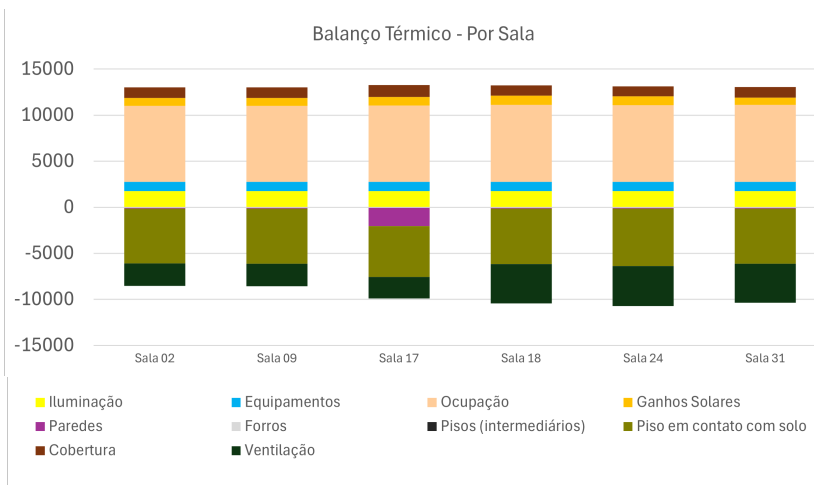
BSAN



CDT



PJC



Fonte: *DesignBuilder*, adaptado pelo autor, 2024.

5.1.2. Desempenho energético

No que diz respeito ao desempenho energético, a Tabela 17 apresenta a demanda energética simulada por uso final anual (kWh/ano) para o caso-base dos edifícios.

Tabela 17 – Demanda energética anual simulada por uso final para o caso-base (kWh/ano).

EDIFÍCIO	EQUIPAMENTOS	ILUMINAÇÃO	TOTAL
BSAN – Bloco de Salas de Aula Norte	64968,42 (39%)	101901,43 (61%)	166869,85
CDT – Centro de Desenvolvimento Tecnológico	50162,65 (37%)	85994,83 (63%)	136157,49
PJC – Pavilhão João Calmon	31676,41 (37%)	54868,38 (63%)	86544,79

Fonte: *Desing Builder*, 2024.

(XX%) – percentual da demanda simulada anual por uso final para equipamentos (caso-base).

(XX%) – percentual da demanda simulada anual por uso final para iluminação artificial (caso-base).

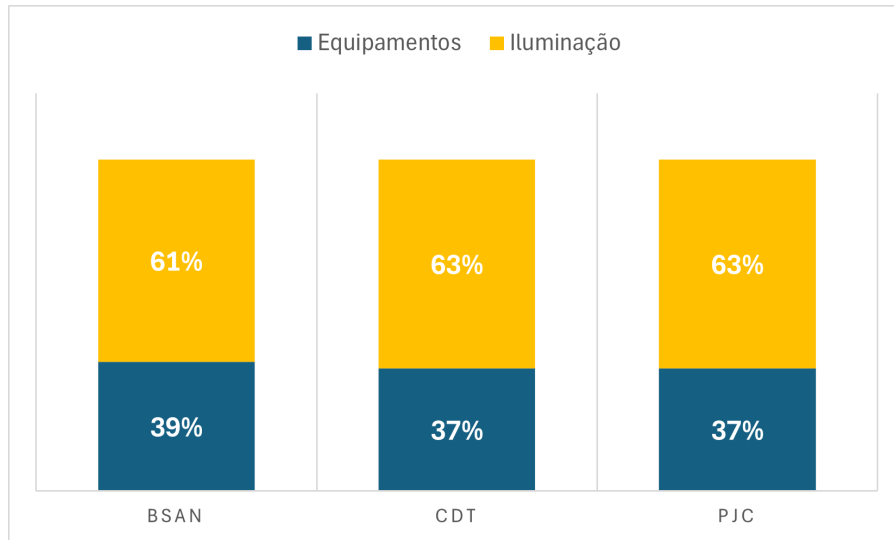
Com base nesses resultados, identificou-se que a demanda energética associada à iluminação nos edifícios analisados (BSAN, CDT e PJC) é bastante significativa, representando mais de 60% do consumo total (61%, 63% e 63%, respectivamente). Esse valor indica que o sistema de iluminação artificial exerce um impacto expressivo no consumo de energia. Por outro lado, os demais equipamentos consomem menos de 40% (39%, 37% e 37%) da demanda total, refletindo uma proporção menor, mas ainda relevante.

A expressiva demanda energética relacionada à iluminação pode ser explicada pelo uso intensivo do sistema de iluminação artificial, aliado à ausência de estratégias eficazes para integrar a iluminação natural de forma otimizada. Esse cenário sugere a necessidade de uma gestão mais eficiente, que envolva, por exemplo, soluções de controle da iluminação.

Observou-se, ainda, um padrão similar de consumo entre os três edifícios, o que indica que esse desafio é estrutural e pode ser enfrentado por meio de abordagens sistêmicas, como a implementação de tecnologias eficientes e soluções de *retrofit* que priorizem a redução da demanda de energia para iluminação sem comprometer o conforto visual dos usuários.

A Figura 45 apresenta o gráfico com o percentual por uso final, ilustrando o padrão na demanda energética desses edifícios:

Figura 45: Percentual da demanda energética simulada por uso final (caso-base).



Fonte: O autor, 2024.

A Tabela 18 apresenta os resultados normalizados em kWh/ano.m² com definição da intensidade de uso energético (EUI) do caso-base dos edifícios.

Tabela 18 – Intensidade de uso energético EUI do caso-base (kWh/ano.m²).

EDIFÍCIO	EUI (KWH/ANO.M ²)
BSAN – Bloco de Salas de Aula Norte	52,61
CDT – Centro de Desenvolvimento Tecnológico	45,98
PJC – Pavilhão João Calmon	39,61

Fonte: elaborado a partir de *Design Builder*, 2024.

(XX) – intensidade de uso energético do caso-base (EUI) em kWh/ano.m².

A análise dos resultados obtidos revelou que os valores de Índice de Uso de Energia (EUI) calculados para o caso-base estão em consonância com aqueles encontrados na literatura, conforme apresentado na Tabela 5 (p.41) desta dissertação. É importante destacar, por exemplo, os valores de EUI nacionais reportados por Salvia *et al.* (2018), que registraram 49 kWh/ano.m² para a UFP em Passo Fundo, e por Garcia (2022), que variaram entre 25,60 e 83,40 kWh/ano.m² para a UFMG em Belo Horizonte.

5.1.3. Qualidade da iluminação natural

No que diz respeito à qualidade da iluminação natural, a Tabela 19 apresenta um resumo dos resultados das simulações dos edifícios para o caso-base.

Tabela 19 – Resumo dos resultados das simulações para qualidade da iluminação natural do caso-base.

MÉTRICA	BSAN	CDT	PJC
<i>Useful Daylight Illuminance (UDI)</i>	83,0%	69,2%	85,4%
<i>Special Daylight Autonomy (sDA)</i>	98,7%	96,4%	100%
<i>Spatial Disturbing Glare (sDG)</i>	40,3%	45,2%	21,6%

Fonte: *Climate Studio*, 2024.

6.1.3.1 – BSAN – Bloco de Salas de Aula Norte

O edifício BSAN (Figura 46) apresentou um desempenho positivo em relação à iluminação natural, com 83% das suas áreas dentro da faixa de iluminância confortável (300 a 3000 lux). Isso indica que a maior parte dos espaços do edifício está adequadamente iluminada para suportar as atividades diárias sem gerar desconforto visual. No entanto, algumas áreas específicas, especialmente as salas voltadas para o norte e noroeste, apresentam níveis de iluminância que ultrapassam 3000lux entre 13h e 17h. Esse excesso de luz pode ser problemático, causando desconforto visual aos ocupantes e indicando a necessidade de ajustes nos dispositivos de controle solar.

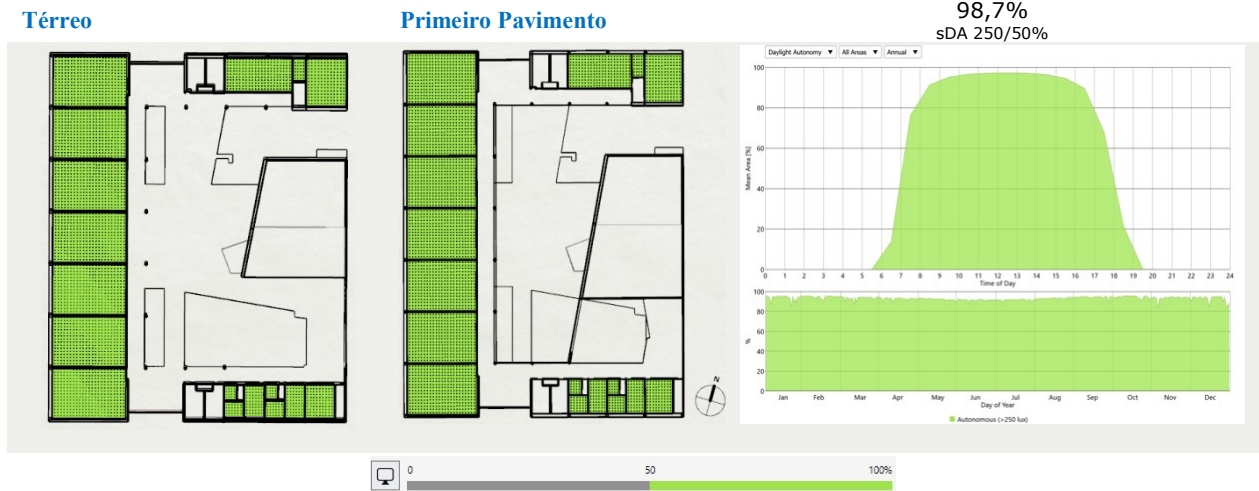
Figura 46: *Useful Daylight Illuminance (UDI)* – BSAN (caso-base).



Fonte: *Climate Studio*, 2024.

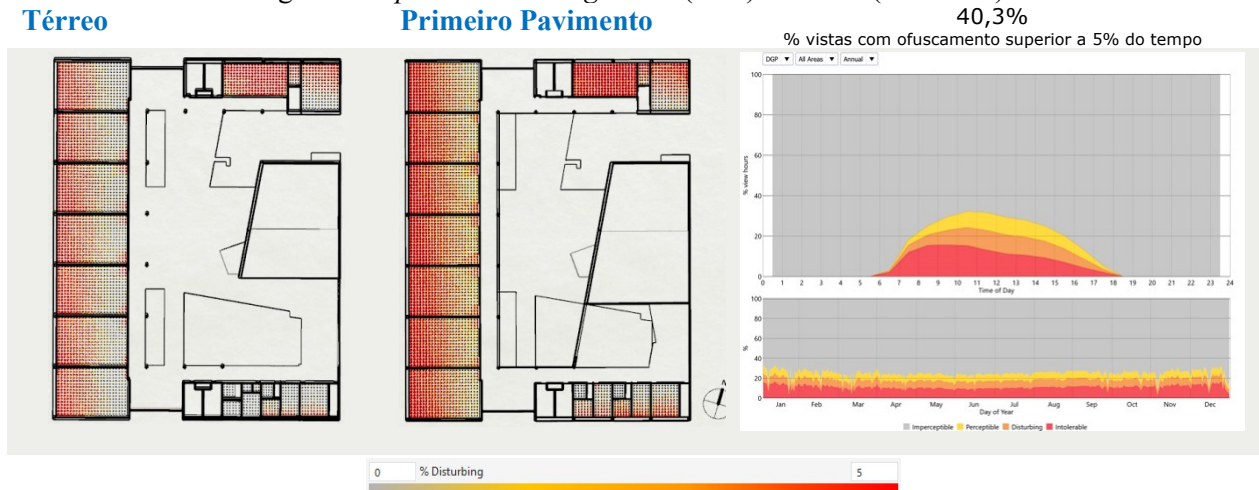
Em termos de sDA (Figura 47), o edifício BSAN registrou 98,7%, evidenciando uma alta autonomia de luz natural em praticamente todas as áreas analisadas. Esses números indicam que praticamente todas as áreas analisadas nesses edifícios recebem uma quantidade de luz natural para garantir o funcionamento diário, sem a necessidade constante de iluminação artificial.

Figura 47: *Special Daylight Autonomy* (sDA) – BSAN (caso-base).



A partir dos resultados do sDG (Figura 48), observou-se que o edifício também apresentou um índice elevado de probabilidade de ofuscamento, com 40,3% das vistas expostas a níveis superiores ao ideal por mais de 5% das horas ocupadas. Um nível também elevado, causado principalmente pela ineficiência dos brises nas fachadas, resultando em incidência excessiva de luz e prejudicando o conforto visual.

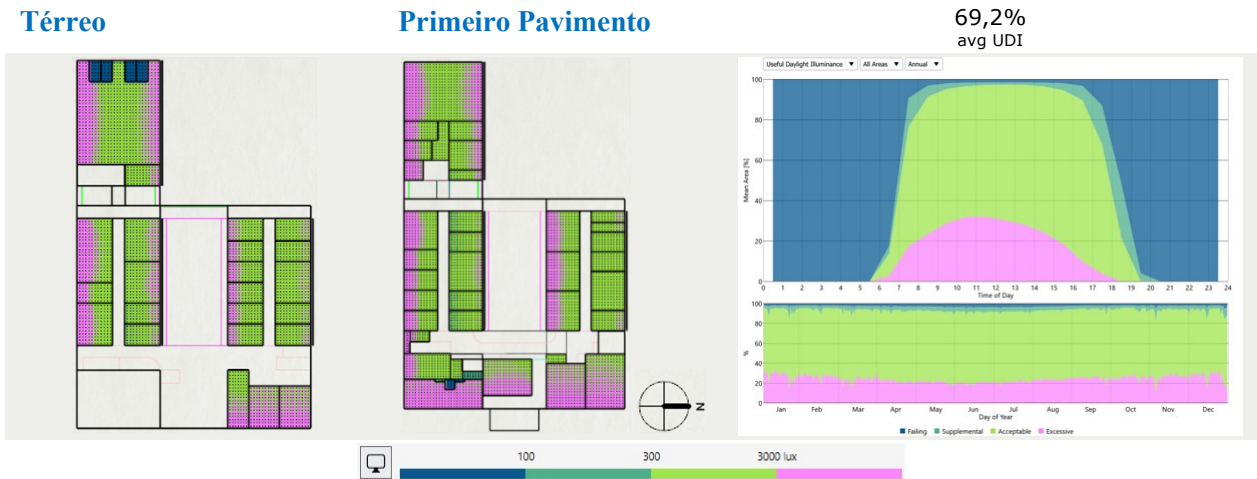
Figura 48: *Spatial Disturbing Glare* (sDG) – BSAN (caso-base).



6.1.3.2 – CDT – Centro de Desenvolvimento Sustentável

O edifício CDT (Figura 49) obteve o menor percentual com apenas 69,2% dos espaços dentro da faixa de iluminância confortável, revelando uma distribuição menos eficiente da luz natural, mas ainda dentro dos limites aceitos. Um ponto crítico identificado nesse edifício é a falta de dispositivos de sombreamento nas fachadas sul e leste, o que resulta em altos níveis de iluminância em determinadas salas, superando os valores confortáveis. Essas áreas são diretamente expostas à luz solar sem a devida proteção, o que gera um excesso de luz, especialmente durante as primeiras horas do dia, comprometendo o conforto visual dos usuários.

Figura 49: *Useful Daylight Illuminance* (UDI) – CDT (caso-base).



Fonte: *Climate Studio*, 2024.

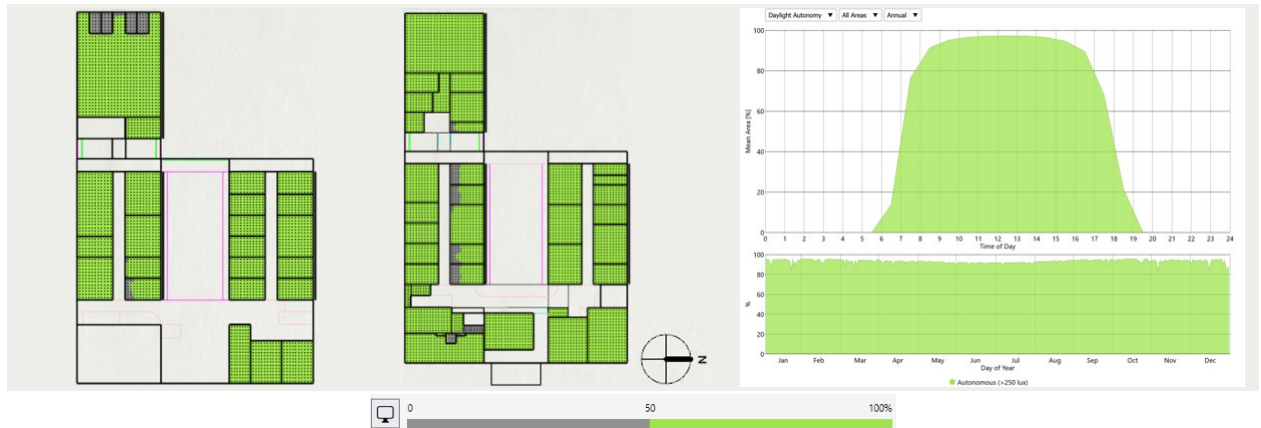
Em relação ao das (Figura 50), o CDT também apresenta bons resultados, com uma autonomia de luz natural de 96,4%, indicando que a maior parte das áreas analisadas recebe luz suficiente para o funcionamento diário. Contudo, o CDT registrou o pior desempenho em termos de sDG (Figura 51), com 45,2% das vistas expostas a ofuscamento acima do ideal. A falta de brises nas fachadas mais expostas ao sol agrava esse problema, especialmente nas salas voltadas para o sul e leste, onde o brilho solar entra diretamente, sem qualquer obstrução. Embora a simulação tenha considerado brises com abertura fixa de 45°, os brises reais no CDT são móveis, e o ajuste dinâmico de acordo com a incidência solar poderia melhorar significativamente o conforto visual.

Figura 50: *Special Daylight Autonomy* (sDA) – CDT (caso-base).

Térreo

Primeiro Pavimento

96,4%
sDA 250/50%



Fonte: *Climate Studio*, 2024.

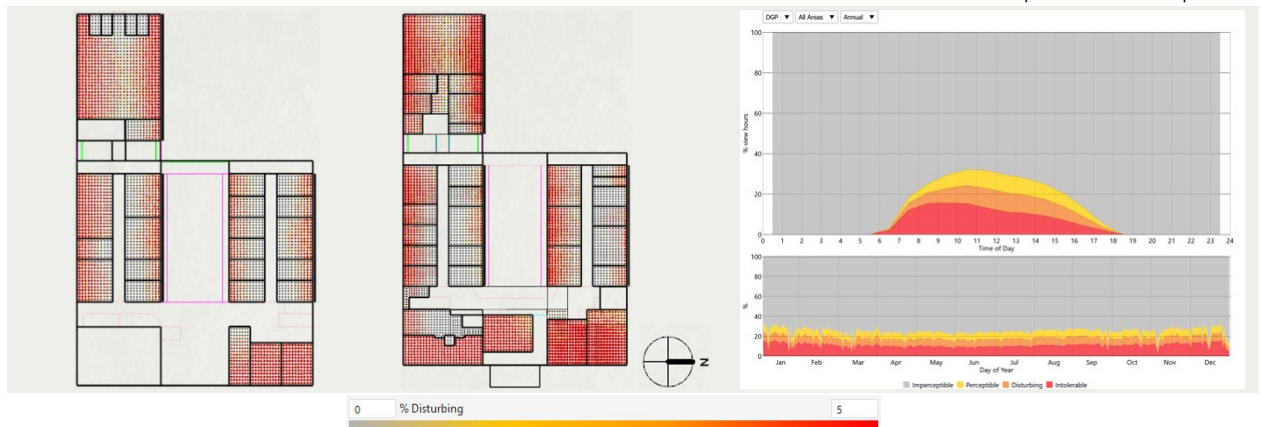
Figura 51: *Spatial Disturbing Glare* (sDG) – CDT (caso-base).

Térreo

Primeiro Pavimento

45,2%

% vistas com ofuscamento superior a 5% do tempo



Fonte: *Climate Studio*, 2024.

6.1.3.3 – PJC – Pavilhão João Calmon

O edifício PJC (Figura 52) apresentou a maior porcentagem de áreas dentro da faixa de iluminância confortável, com 85,4% de seus espaços recebendo níveis de luz entre 300 e 3000lux, que é considerado adequado para a maioria das atividades realizadas. Esse resultado indica que o PJC consegue equilibrar bem a entrada de luz natural, proporcionando níveis adequados de iluminação para a maioria das atividades realizadas no edifício. A elevada porcentagem de áreas confortáveis em termos de iluminância representa uma vantagem importante, reduzindo a dependência da iluminação artificial e maximizando a eficiência energética. Ainda assim, é importante considerar que o PJC também apresentou algumas áreas próximas a aberturas onde o excesso de luz pode gerar desconforto, sugerindo a necessidade de melhorias em dispositivos de sombreamento para evitar o risco de ofuscamento.

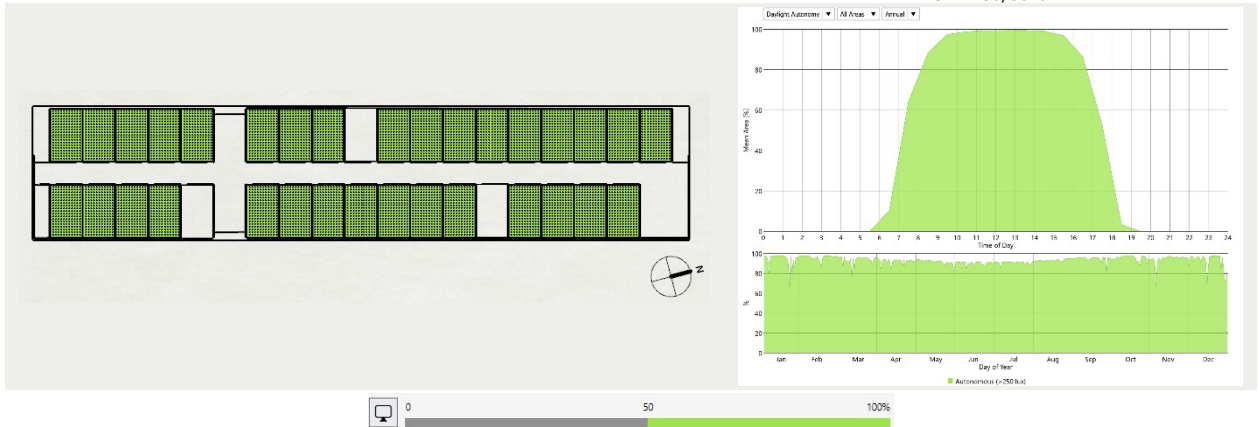
Figura 52: *Useful Daylight Illuminance (UDI) – PJC (caso-base).*



O PJC também obteve os melhores resultados de das (Figura 53) entre os três edifícios, alcançando 100% de autonomia de luz natural, o que significa que todas as áreas analisadas são iluminadas naturalmente durante o dia.

Figura 53: *Special Daylight Autonomy (sDA)* – PJC (caso-base).

Térreo



Em termos de sDG (Figura 54), o PJC teve o menor índice de probabilidade de ofuscamento, com apenas 21,6% % das vistas expostas a níveis superiores ao ideal por mais de 5% das horas ocupadas, embora ainda existam pontos que requerem intervenção, especialmente nas áreas próximas às janelas.

Figura 54: *Spatial Disturbing Glare (sDG)* – PJC (caso-base).

Térreo



5.2. OTIMIZAÇÃO

Para a otimização, foram adotadas as seguintes estratégias (Figura 55):

Figura 55: Estratégias para otimização.



Fonte: O autor, 2024.

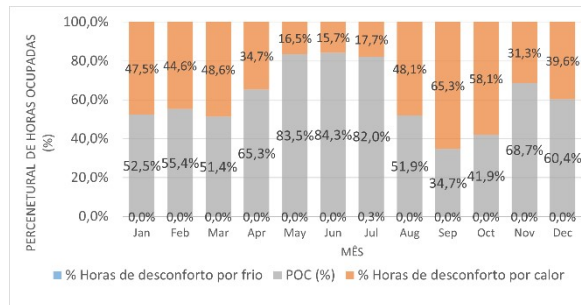
NOTA 1: Para o edifício CDT e PJC, optou-se por manter a configuração de brise existente, visto que, a partir da análise de sombreamento, identificou-se que o brise já corresponde à melhor situação para a demanda de sombreamento.

5.2.1. Conforto térmico

Em relação ao conforto térmico, observou-se que o conjunto de estratégias implementadas (Figura 55) teve uma contribuição significativa para a melhoria das condições térmicas dos edifícios. Cada solução testada desempenhou um papel importante na redução do desconforto térmico, com variações no impacto de acordo com a natureza da intervenção. Ao adotar uma abordagem integrada, foi possível alcançar um desempenho térmico mais equilibrado ao longo do ano, atendendo melhor às demandas dos usuários, especialmente nos meses mais críticos.

Para o BSAN, as estratégias foram testadas individualmente, para identificar o impacto de cada estratégia no desempenho térmico. A Figura 62 apresenta os resultados para a Sala 11 do edifício BSAN, cujos resultados do caso-base foram os mais críticos para as condições de conforto térmico, especialmente no mês de setembro, que apresentou 65,30% de usuários em desconforto no período ocupado. A simulação com diferentes estratégias de intervenção permitiu avaliar o impacto de cada solução, evidenciando que algumas promoveram melhorias significativas, enquanto outras tiveram efeito limitado.

Figura 56: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês e balanço térmico para “Sala 11” (BSAN): caso-base.



Fonte: Design Builder, 2024

A primeira estratégia, a remodelação dos brises (Figura 57), mostrou um impacto reduzido nas condições de conforto. No mês mais crítico, setembro, houve uma queda de 65,30% para 55,8% de usuários em desconforto no período ocupado, resultando em uma melhoria de aproximadamente 14,54%. Ainda que essa redução seja relevante, sua eficácia é limitada, especialmente considerando que mais da metade dos usuários ainda permanecem em desconforto. A segunda estratégia, aplicação de uma película no vidro (Figura 58), teve um efeito bastante positivo, com uma redução de 65,30% para 17,7% de usuários em desconforto, representando uma melhoria de cerca de 72,88%. Esse resultado destaca a importância do controle da radiação solar incidente nas superfícies envidraçadas, que se mostrou uma das principais fontes de calor na sala (Litardo *et al.* 2021).

Figura 57: E1 - Brise

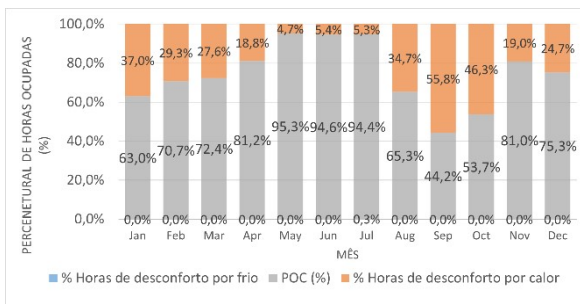
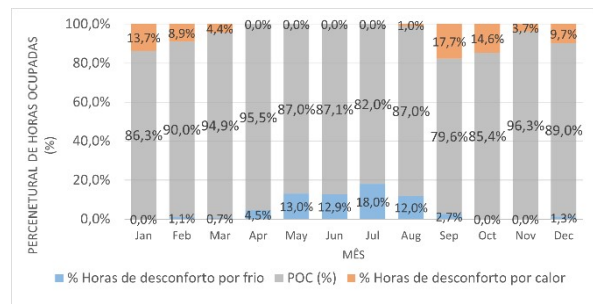


Figura 58: E2 – Película – Vidro



Fonte: Design Builder, 2024

A terceira estratégia, que diz respeito ao material frio, foi simulada em duas situações, sendo a primeira, a aplicação de material frio diretamente na laje (Figura 59). Nessa situação, houve uma redução de 65,30% para 28,2% de usuários em desconforto, representando uma melhoria de aproximadamente 56,8%. Essa estratégia atua diretamente na diminuição da carga térmica absorvida pela cobertura, mostrando-se eficaz ao minimizar o impacto do ganho de calor transmitido ao interior da sala, especialmente nos dias e meses mais quentes (Correia, Amorim e Santamouris, 2024). A segunda situação foi a aplicação de materiais frios

diretamente na telha (Figura 60). Essa situação teve um impacto insignificante, com redução de 65,30 para 63,3%, o que representa uma melhoria de apenas 3,06%. Os resultados de E3 corroboram com os resultados apresentados por Correia, Amorim e Santamouris (2024), que indicam que o material frio tem melhor desempenho em substrato mais densos e espessos, como, por exemplo, a laje maciça, especialmente para o clima de Brasília.

Figura 59: E3 – Materiais frios na laje (remoção da telha)

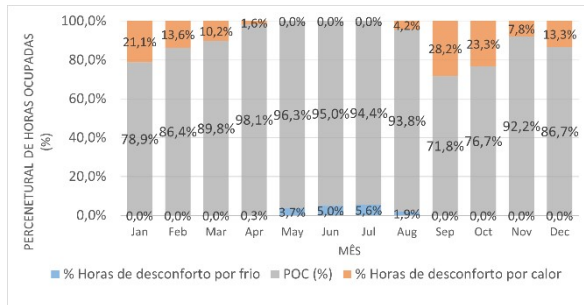
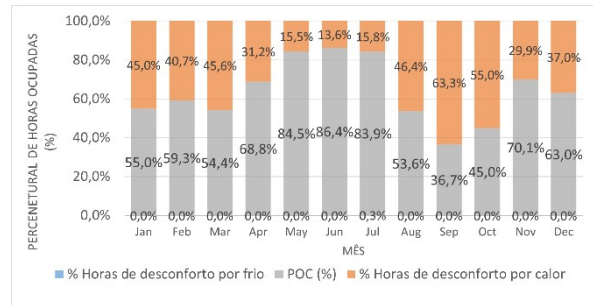


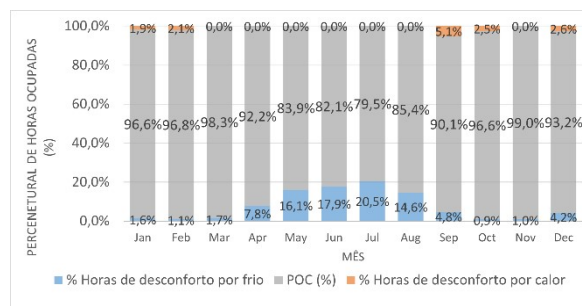
Figura 60: E4 – Materiais frios na telha



Fonte: Design Builder, 2024

Quando todas as estratégias foram combinadas na simulação otimizada (Figura 61), o impacto foi substancial, com redução de 65,30% para 5,1% devido ao calor e 4,8% devido ao frio, o que representa uma melhoria total de aproximadamente 92,19%. Isso demonstra que uma abordagem integrada, que considera diferentes elementos da envoltória e materiais, é a mais eficaz para atingir níveis de conforto elevados.

Figura 61: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês e balanço térmico para “Sala 11” (BSAN): otimizado.

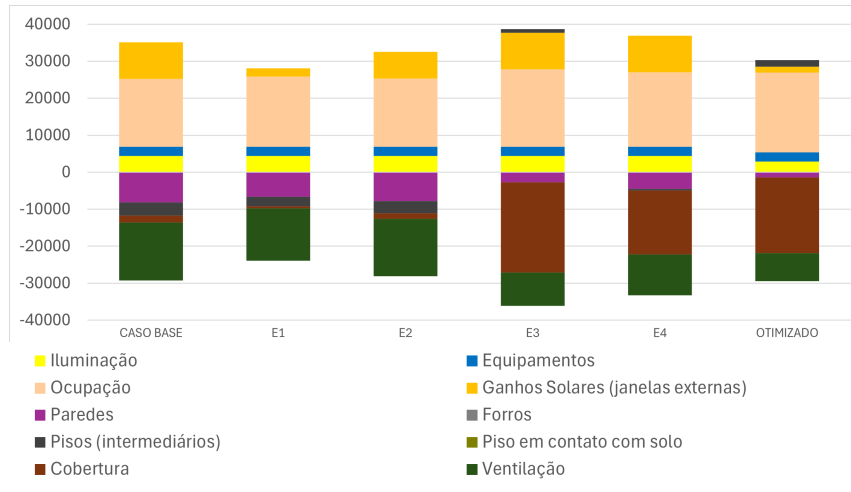


Fonte: Design Builder, 2024

Contudo, observou-se que, nos meses de maio, junho, julho e agosto, a otimização trouxe um leve desconforto por frio, embora o percentual tenha permanecido abaixo de 20%, o que ainda está dentro dos limites aceitáveis para conforto térmico. Este resultado ressalta a importância de equilibrar as estratégias para que os ambientes atendam tanto às demandas de verão quanto de inverno, sem comprometer o desempenho global ao longo do ano.

A Figura 62 apresenta ainda o balanço térmico anual da Sala 11 para cada estratégia testada, oferecendo uma visão clara do comportamento térmico em diferentes cenários. Essa análise permitiu identificar de forma detalhada como cada intervenção impactou o desempenho térmico do ambiente ao longo do ano, facilitando a compreensão dos ganhos e perdas de calor em cada caso.

Figura 62: Balanço térmico para cada cenário.

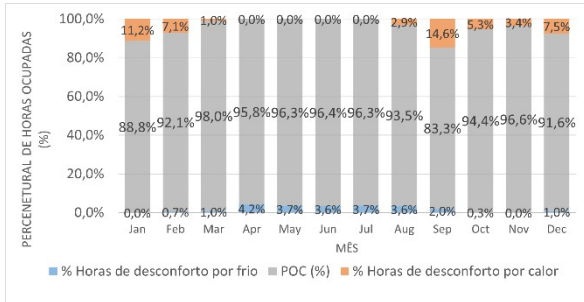


Fonte: *Design Builder*, 2024.

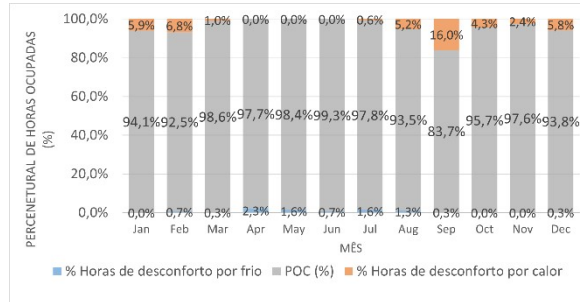
Os gráficos seguintes apresentam o percentual de horas ocupadas em conforto e desconforto por mês para as salas selecionadas dos edifícios BSAN (Figura 63), CDT (Figura 64) e PJC (Figura 65) após a otimização.

Figura 63: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês - otimizado – BSAN.

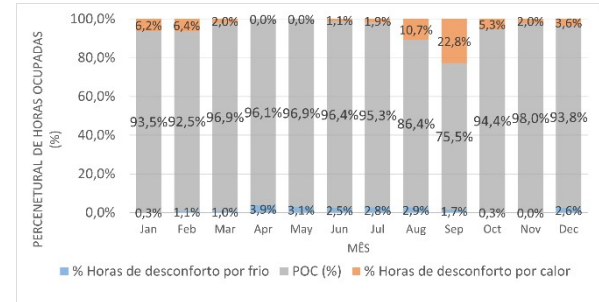
Térreo
Sala 01



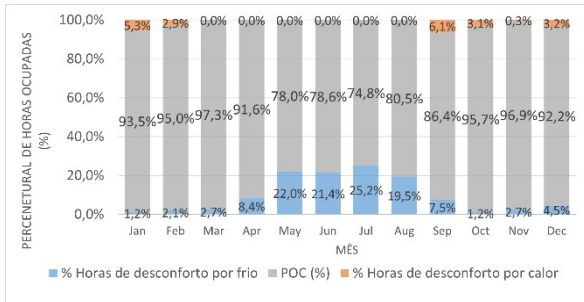
Sala 04



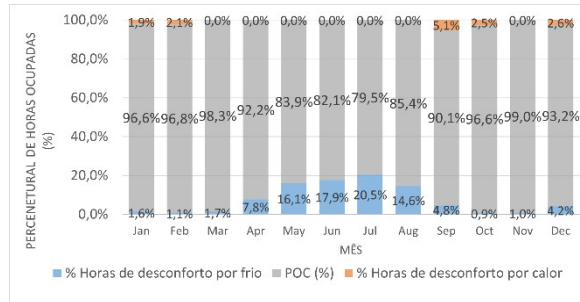
Sala 07



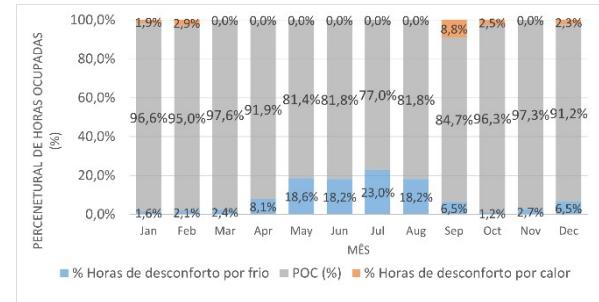
Primeiro Pavimento
Sala 08



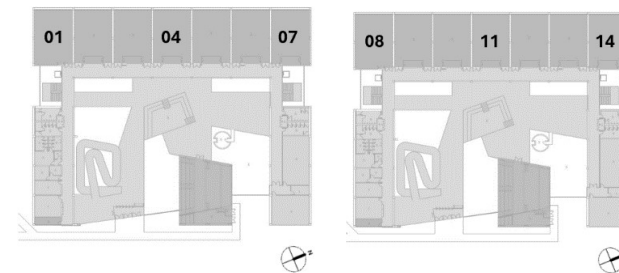
Sala 11



Sala 14



Mapa-chave

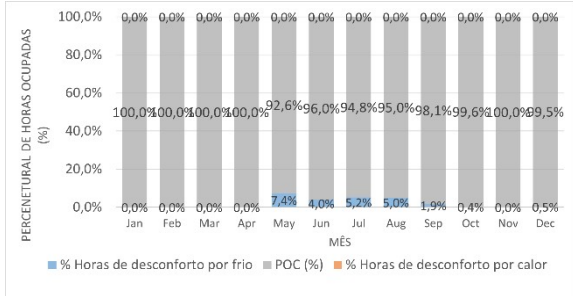


Fonte: Design Builder, 2024.

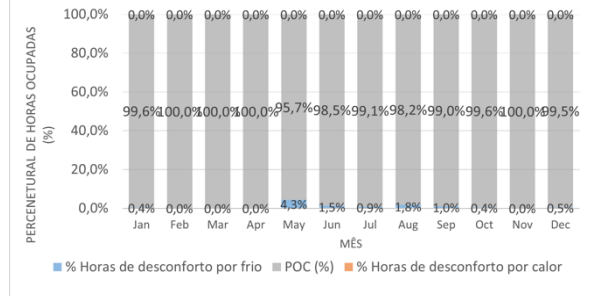
Figura 64: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês – otimizado – CDT.

Térreo

Sala 01

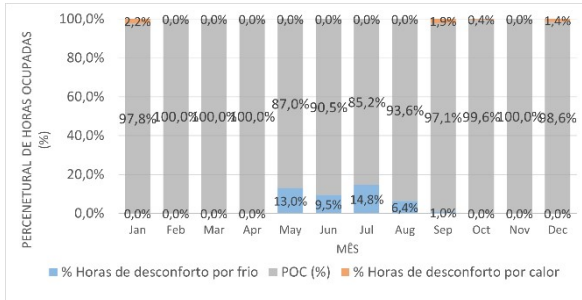


Sala 02

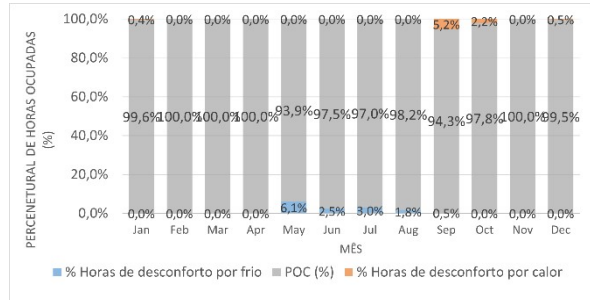


Primeiro Pavimento

Sala 03



Sala 04



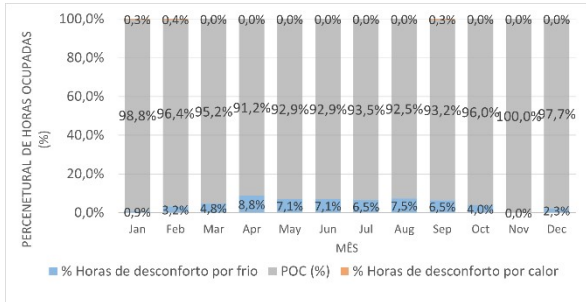
Mapa-chave



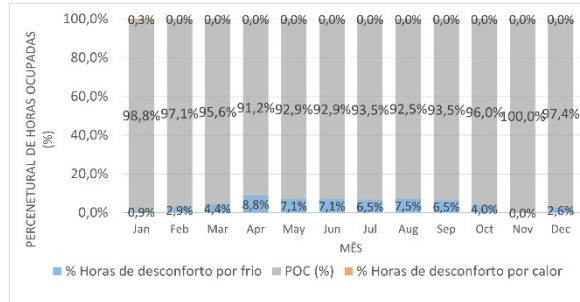
Fonte: Design Builder, 2024.

Figura 65: Percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e desconforto por mês – otimizado – PJC.

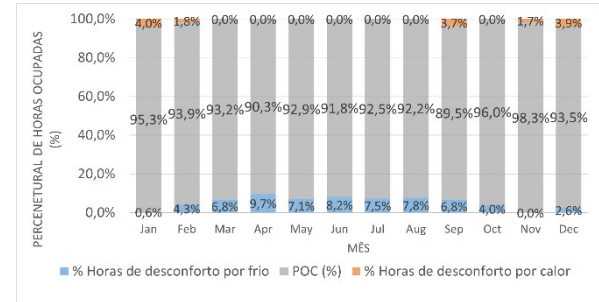
Térreo
Sala 02



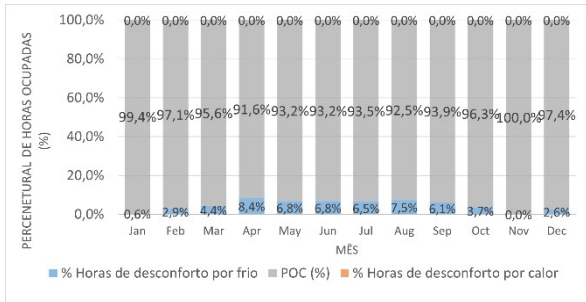
Sala 09



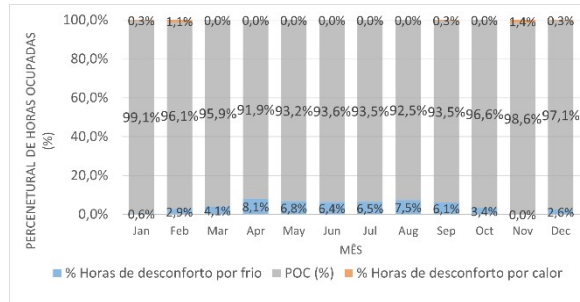
Sala 17



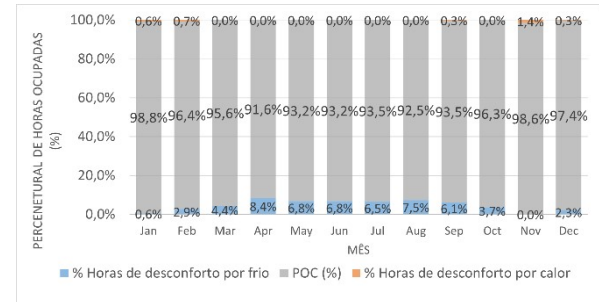
Primeiro Pavimento
Sala 18



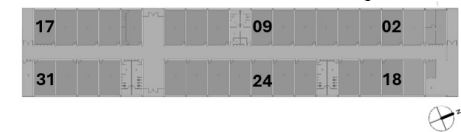
Sala 24



Sala 31



Mapa-chave



Fonte: Design Builder, 2024.

No cenário otimizado de conforto térmico, os resultados para os edifícios BSAN, CDT e PJC foram positivos, refletindo o impacto das estratégias adotadas. No edifício BSAN, o pavimento térreo alcançou mais de 80% dos usuários em conforto térmico dentro das horas ocupadas ao longo de todos os meses do ano. Esse desempenho demonstra a eficácia das medidas implementadas, principalmente no controle de ganhos térmicos. No entanto, no segundo pavimento, as salas com maior área de fachada (paredes) voltada para o exterior apresentaram desconforto térmico por frio nos meses de maio, junho, julho e agosto. Embora isso indique uma fragilidade em relação às perdas térmicas, o percentual de horas em desconforto permaneceu muito próximo da faixa adaptativa de 80% de aceitação, o que ainda é considerado adequado dentro dos parâmetros de conforto térmico adaptativo.

Na média anual, o caso base apresentava 72,50% dos usuários em conforto térmico dentro das horas ocupadas, um índice abaixo dos 80% recomendados pela ASHRAE, com 27,50% de usuários em desconforto térmico. Após a otimização, o percentual aumentou para 92,64%. Esse aumento de 20,14% demonstra o sucesso das estratégias de otimização e sua contribuição para o bem-estar térmico dos ocupantes.

No edifício CDT, a otimização resultou em um percentual superior a 80% de conforto térmico para todas as salas analisadas durante o ano. Observou-se, entretanto, um aumento no desconforto por frio em salas voltadas para o sul, especialmente no primeiro pavimento, onde as perdas térmicas através da cobertura se tornaram um fator significativo. Entretanto, mesmo apresentando desconforto por frio, os valores também permanecem dentro da faixa de conforto adaptativo, com mais de 80% de usuários em conforto térmico.

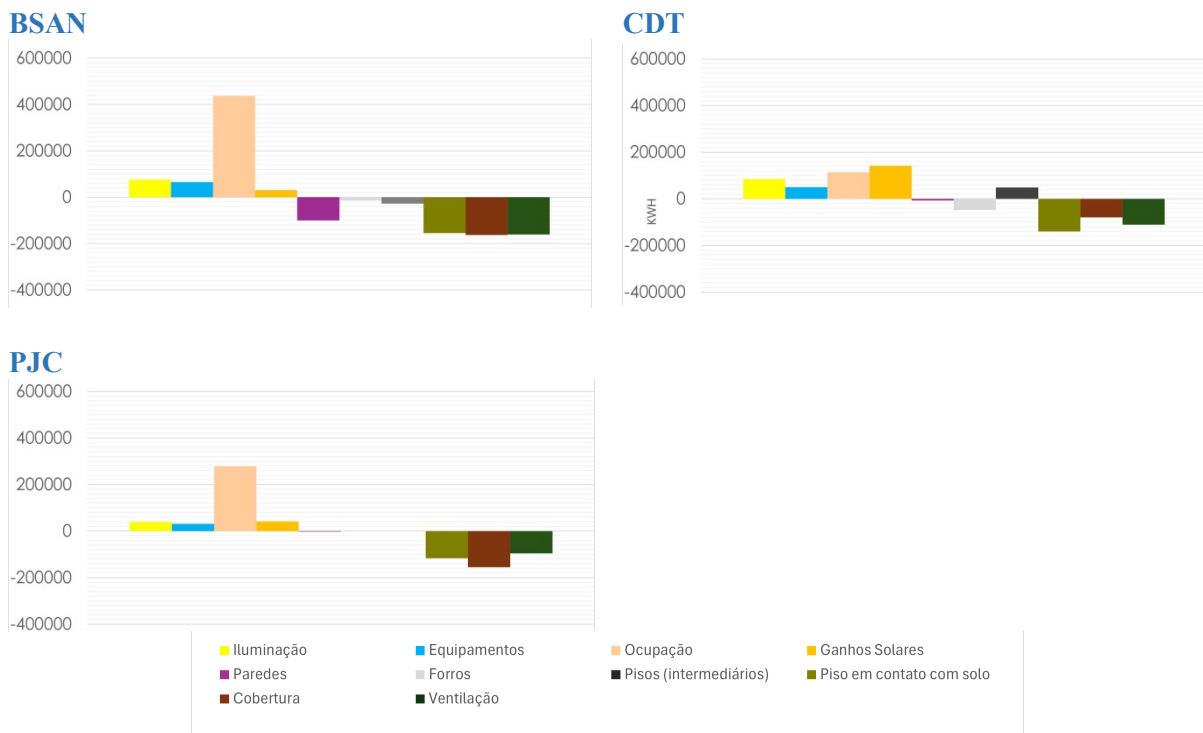
Na média anual, o edifício CDT já apresentava bom desempenho térmico no caso base com 95,18% dos usuários em conforto térmico, passando para 99,53% após a otimização, indicando um aumento de 4,35% de conforto térmico. Embora o ganho percentual seja menor em comparação com os outros edifícios, os resultados otimizados praticamente eliminam o desconforto térmico. Contudo, dada a alta eficiência inicial do CDT, é necessário ponderar sobre a viabilidade econômica das intervenções realizadas, avaliando se o custo da otimização justifica o aumento marginal nas horas de conforto.

Por fim, o edifício PJC manteve um excelente desempenho, com mais de 90% em conforto térmico em todas as salas analisadas. O equilíbrio observado ao longo do ano reflete a eficiência das intervenções, garantindo um ambiente confortável mesmo nos meses mais críticos, tanto de calor quanto de frio, sem grandes variações de desempenho entre as diferentes áreas do edifício.

Na média anual, o edifício PJC, no caso base, apresentava 83,35% dos usuários em conforto térmico. Após as otimizações, esse percentual aumentou para 96,75%, um aumento de 13,40% de usuários em conforto térmico, que coloca o edifício dentro dos parâmetros recomendados. Essa melhoria substancial confirma a eficácia das estratégias implementadas para atingir um nível de conforto térmico adequado.

A Figura 66 apresenta o balanço térmico anual para os edifícios após a otimização.

Figura 66: Balanço térmico anual para o edifício inteiro - otimizado.

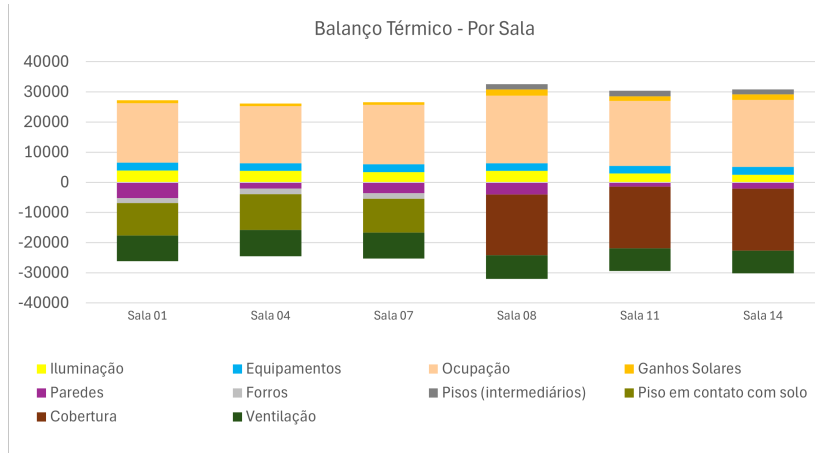


Fonte: Design Builder, 2024.

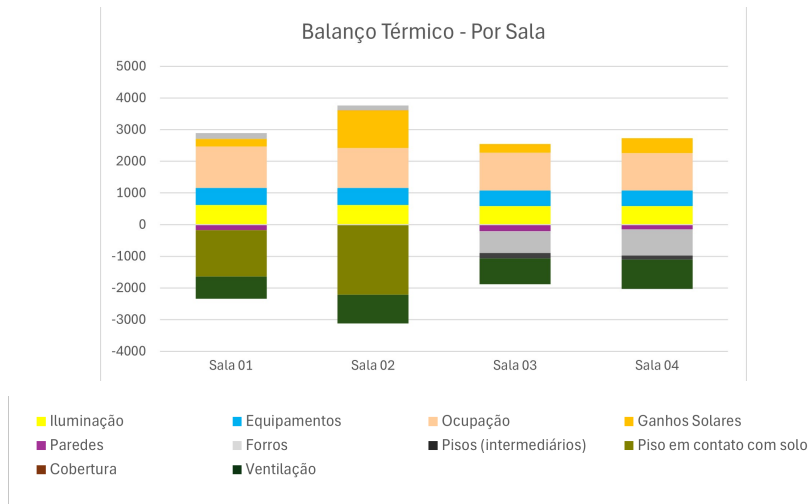
A Figura 67 apresenta o balanço térmico anual por fonte para cada sala analisada considerando o cenário otimizado.

Figura 67: Balanço térmico anual por fonte por sala – otimizado (kWh).

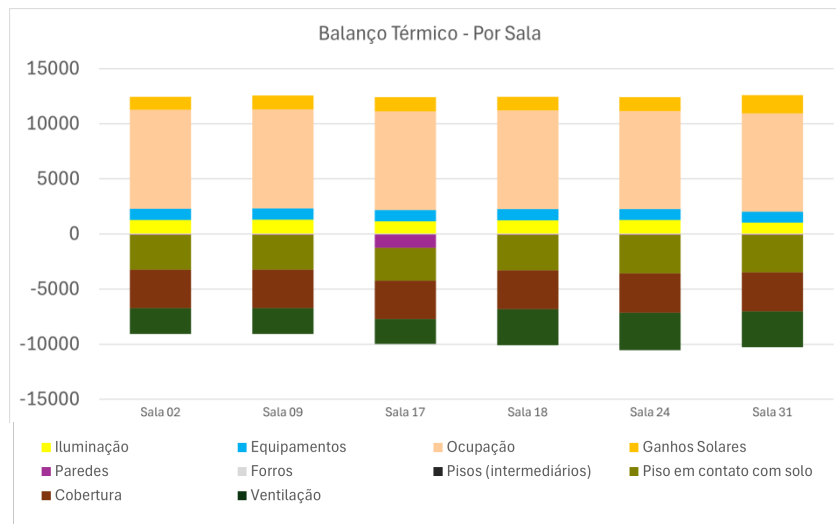
BSAN



CDT



PJC

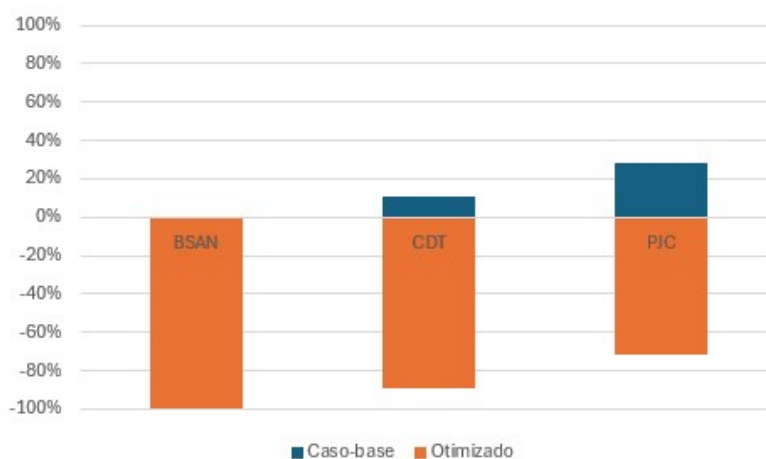


Fonte: *DesignBuilder*, adaptado pelo autor, 2024.

Ao analisarmos o balanço térmico dos três edifícios, fica claro que a aplicação de materiais frios, embora em diferentes substratos / materiais (BSAN – diretamente na laje; CDT – na telha; PJC – na telha), teve um impacto positivo significativo no desempenho térmico anual de cada construção. Esses materiais ajudaram a minimizar os ganhos de calor, principalmente nas coberturas, reduzindo de forma consistente a carga térmica ao longo do ano. Essa estratégia se mostrou particularmente eficaz em mitigar o calor acumulado nas superfícies, o que, por sua vez, contribuiu diretamente para o aumento do conforto interno dos ambientes.

Para o edifício BSAN, a carga térmica da cobertura no caso-base foi de -155,36 kWh. No cenário otimizado, com aplicação do material frio diretamente na laje de cobertura, a carga térmica foi ampliada para -163.318,00 kWh. Isso mostra que o material frio potencializou as perdas térmicas pela cobertura em mais de 1000 vezes em relação ao valor do caso-base. Isso refletiu diretamente no conforto térmico, corroborado pelos gráficos apresentados na Figura 63. No edifício CDT, a carga térmica da cobertura no caso-base foi de 9.812,56 kWh. No cenário otimizado, com a aplicação do material frio diretamente na telha, a cobertura passa a atuar como uma superfície de perda térmica, cuja carga passa a ser de -79.454,30 kWh, representando uma perda térmica de mais de 8 vezes em relação ao valor do caso-base. Por fim, para o edifício PJC, a carga térmica da cobertura no caso-base foi de 60.564,51 kWh. No cenário otimizado, com aplicação do material frio diretamente na telha, a cobertura também passa a atuar como uma superfície de perda térmica, cuja carga passa a ser de -154.994,30 kWh. A Figura 68 apresenta o impacto da aplicação dos materiais frios na carga térmica da cobertura, em um comparativo entre caso-base e cenário otimizado.

Figura 68: Impacto da aplicação dos materiais frios na carga térmica da cobertura.



Fonte: *Design Builder*, 2024.

Além disso, as estratégias de sombreamento e a aplicação de película nas janelas foram essenciais para controlar os ganhos solares. Ao bloquear parte da radiação incidente, essas soluções reduziram os ganhos de calor através das superfícies envidraçadas, reduzindo a carga térmica interna sem comprometer a iluminação natural (ver item 6.2.3). Essa combinação de medidas permitiu um controle mais preciso das trocas de calor, resultando em ambientes mais equilibrados e eficientes ao longo das diferentes estações do ano.

Para o edifício BSAN, os ganhos térmicos pelas janelas (externas) no caso-base foi de 163.822,5 kWh. No cenário otimizado, com aplicação de película e remodelação do brise, os ganhos térmicos reduziram para 30.119,51 kWh, representando uma redução de 81,61%. No edifício CDT os ganhos térmicos pelas janelas (externas) no caso-base foi de 239.144,6 kWh. No cenário otimizado, com aplicação de película e acréscimo de brise nas fachadas leste e sul, os ganhos térmicos reduziram para 141.771,2 kWh, representando uma redução de 40,72%. Por fim, para o edifício PJC, os ganhos térmicos pelas janelas (externas) no caso-base foi de 30537,03 kWh. No cenário otimizado, com aplicação de película e remodelação do brise, os ganhos térmicos reduziram para 25841,41 kWh, representando uma redução de 15,38%.

5.2.2. Desempenho energético

Após a otimização dos edifícios BSAN, CDT e PJC, os resultados indicaram uma redução na demanda energética, especificamente no uso de iluminação artificial. O edifício BSAN apresentou uma redução de 25,55%, seguido pelo CDT com 20,99% e o PJC com 28,40%. Isso demonstra que a principal estratégia ativa adotada, que foi o controle da iluminação artificial para aproveitar ao máximo a iluminação natural, teve um impacto direto e expressivo na redução da demanda por energia elétrica. A Tabela 20 apresenta a demanda energética simulada por uso final anual (kWh/ano) para o cenário otimizado dos edifícios.

Tabela 20 – Demanda energética anual simulada por uso final (kWh/ano) - otimizado.

EDIFÍCIO	EQUIPAMENTOS	ILUMINAÇÃO	TOTAL
BSAN – Bloco de Salas de Aula Norte	64968,42 (46%)	75868,52 (54%)	↓ 25,55% 140836,94
CDT – Centro de Desenvolvimento Tecnológico	50162,65 (42%)	67936,79 (58%)	↓ 20,99% 118099,45
PJC – Pavilhão João Calmon	31676,41 (45%)	39282,09 (55%)	↓ 28,40% 70958,50

Fonte: *Design Builder*, 2024.

(XX%) – demanda simulada anual por uso final para equipamentos.

(XX%) – demanda simulada anual por uso final para iluminação artificial.

↓ XX% – percentual de redução da demanda simulada para iluminação artificial em relação ao caso-base.

Como consequência, reduziu-se também a demanda energética simulada total dos edifícios. O BSAN teve uma redução de 15,60%, o CDT de 13,26% e o PJC de 18%. A Tabela 21 apresenta os resultados normalizados em kWh/ano.m² para a definição da intensidade de uso energético (EUI) do caso-base dos edifícios.

Tabela 21 – Intensidade de uso energético - otimizado - EUI (kWh/ano.m²).

EDIFÍCIO	EUI (KWH/ANO.M ²)	
BSAN – Bloco de Salas de Aula Norte	44,40	↓ 15,60%
CDT – Centro de Desenvolvimento Tecnológico	39,88	↓ 13,26%
PJC – Pavilhão João Calmon	32,48	↓ 18,00%

Fonte: *Desing Builder*, 2024.

(XX) – intensidade de uso energético pós otimização (EUI).

↓ XX% – percentual de redução da intensidade de uso energético (EUI) em relação ao caso-base.

Esses valores revelam que o controle eficiente da iluminação artificial, aliado ao bom uso da iluminação natural, contribuiu significativamente para a eficiência energética dos edifícios. A estratégia de otimização não envolveu mudanças complexas nos sistemas de iluminação, o que evidencia a importância de pequenas intervenções que visam a maximização do uso de recursos passivos, como a luz natural.

Dentre os pontos positivos, destaca-se o fato de que a redução no consumo energético pode ser obtida sem a necessidade de investimentos robustos em novas tecnologias ou sistemas complexos. A utilização de sensores de controle de iluminação e ajustes no *layout* de brises foram suficientes para melhorar o desempenho energético. Isso reflete não apenas economia nos custos operacionais, mas também um impacto ambiental reduzido, uma vez que menor demanda energética implica em menor emissão de carbono e uso de recursos naturais.

5.2.3. Qualidade da iluminação natural

A Tabela 22 apresenta o Resumo dos resultados das simulações para qualidade da iluminação natural pós otimização.

Tabela 22 – Resumo dos resultados das simulações para qualidade da iluminação natural pós otimização.

MÉTRICA	BSAN		CDT		PJC	
<i>Useful Daylight Illuminance</i> (UDI)	78,7%	↓ 4,3%	74,8%	↑ 5,6%	72,5%	↓ 12,9%
<i>Special Daylight Autonomy</i> (sDA)	93,4%	↓ 5,3%	84,1%	↓ 12,3%	80,8%	↓ 19,2%
<i>Spatial Disturbing Glare</i> (sDG)	1,1%	↓ 39,2%	3,7%	↓ 41,5%	0%	↓ 21,6%

Fonte: *Climate Studio*, 2024.

No edifício BSAN (Figura 69), o UDI reduziu de 83% para 78,7%, indicando uma redução distribuição da luz natural. O sDA reduziu de 98,7% para 93,4%, o que sugere uma leve redução na autonomia da luz natural ao longo do dia. Isso pode ter ocorrido devido a ajustes no sombreamento, que, embora tenham mitigado o desconforto luminoso, reduziu a incidência direta em alguns momentos. Entretanto, para todos os ambientes analisados, essa autonomia atingiu os 40% da área de piso conforme recomendado no Nível I da ABTN NBR 15.215-4. A otimização foi bem-sucedida na diminuição do sDG, que foi de 40,3% para 1,1%, praticamente eliminando probabilidade de ofuscamento pela luz do dia.

Já no CDT (Figura 70), a otimização gerou um aumento considerável no UDI, passando de 69,2% para 74,8%, o que significa uma melhoria na quantidade de luz natural útil nos ambientes. No entanto, houve uma redução mais acentuada no sDA, de 96,4% para 84,1%, o que indica que a autonomia da iluminação natural se tornou um pouco mais limitada. Esse efeito pode estar relacionado à implementação de brises nas fachadas leste e sul que limitaram o excesso de luz natural. Entretanto, assim como no BSAN, a autonomia atingiu os 40% da área de piso. O sDG também foi reduzido, de 45,2% para 3,7%, mostrando que os problemas com a probabilidade de ofuscamento pela luz do dia foram significativamente mitigados, embora ainda haja espaço para melhorias no controle da iluminação excessiva.

No edifício PJC (Figura 71), o UDI apresentou uma redução de 85,4% para 72,5%, indicando que houve uma redução na quantidade de luz natural adequada para as atividades, possivelmente devido a um maior controle da luz direta. O sDA também reduziu de 100% para 80,8%, o que aponta para uma menor autonomia da iluminação natural ao longo do dia. Apesar disso, o sDG foi completamente eliminado, caindo de 21,6% para 0%, sugerindo que o desconforto visual causado pela probabilidade de ofuscamento pela luz do dia foi totalmente resolvido, promovendo ambientes visuais mais agradáveis. De modo geral, as estratégias adotadas atenderam adequadamente às demandas de iluminação, além de assegurarem o conforto visual dos ocupantes.

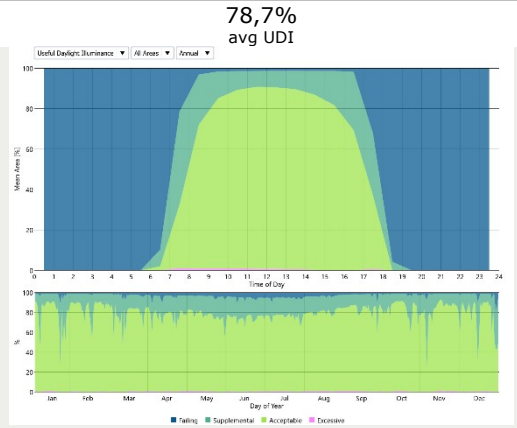
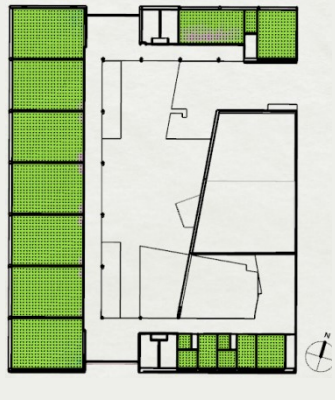
A Figura 69 apresenta os resultados da simulação para análise da qualidade da iluminação natural do edifício BSAN após a otimização.

Figura 69: Análise da Qualidade da Iluminação Natural – otimizado - BSAN.

Useful Daylight Illuminance (UDI)

Térreo

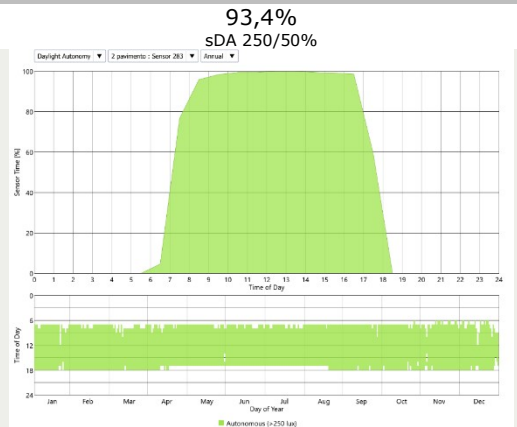
Primeiro Pavimento



Special Daylight Autonomy (sDA)

Térreo

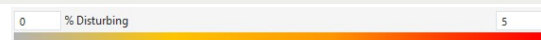
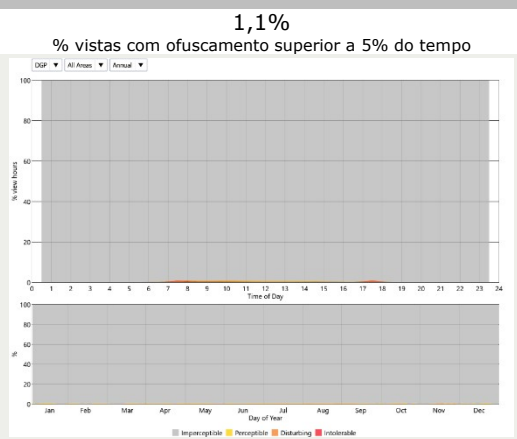
Primeiro Pavimento



Spatial Disturbing Glare (sDG)

Térreo

Primeiro Pavimento



Fonte: Climate Studio, 2024.

A Figura 70 apresenta os resultados da simulação para análise da qualidade da iluminação natural do edifício CDT.

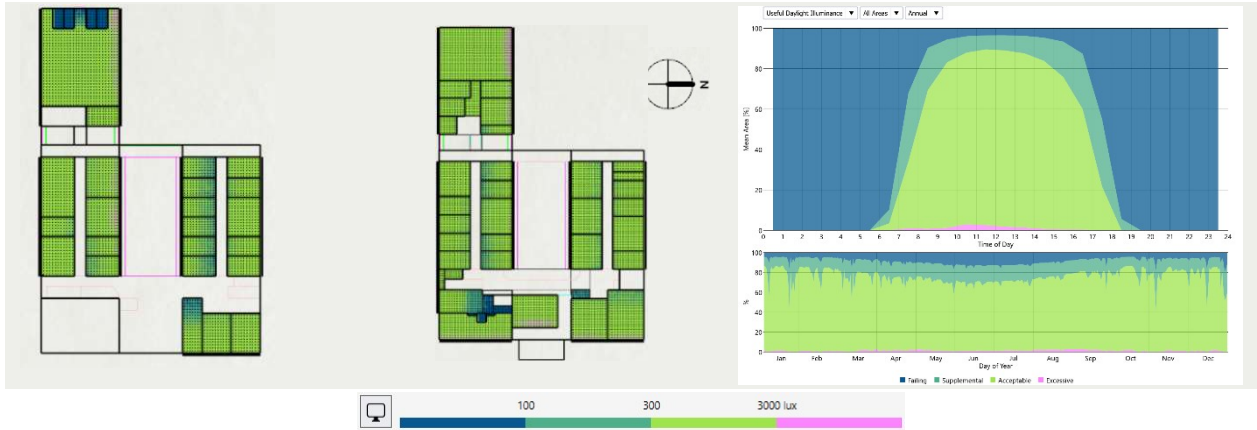
Figura 70: Análise da Qualidade da Iluminação Natural – otimizado – CDT.

Useful Daylight Illuminance (UDI)

Térreo

Primeiro Pavimento

74,8%
avg UDI

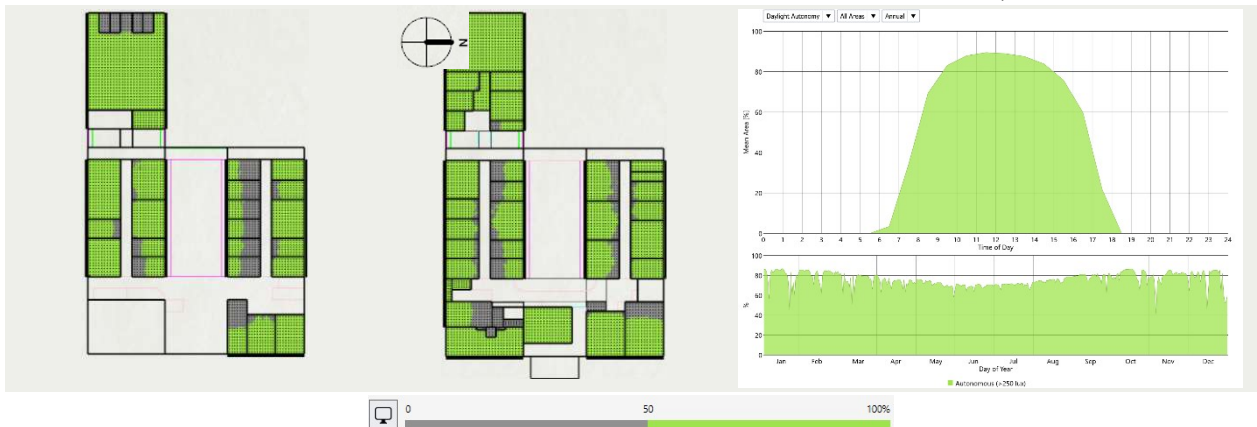


Special Daylight Autonomy (sDA)

Térreo

Primeiro Pavimento

84,1%
sDA 250/50%



Spatial Disturbing Glare (sDG)

Térreo

Primeiro Pavimento

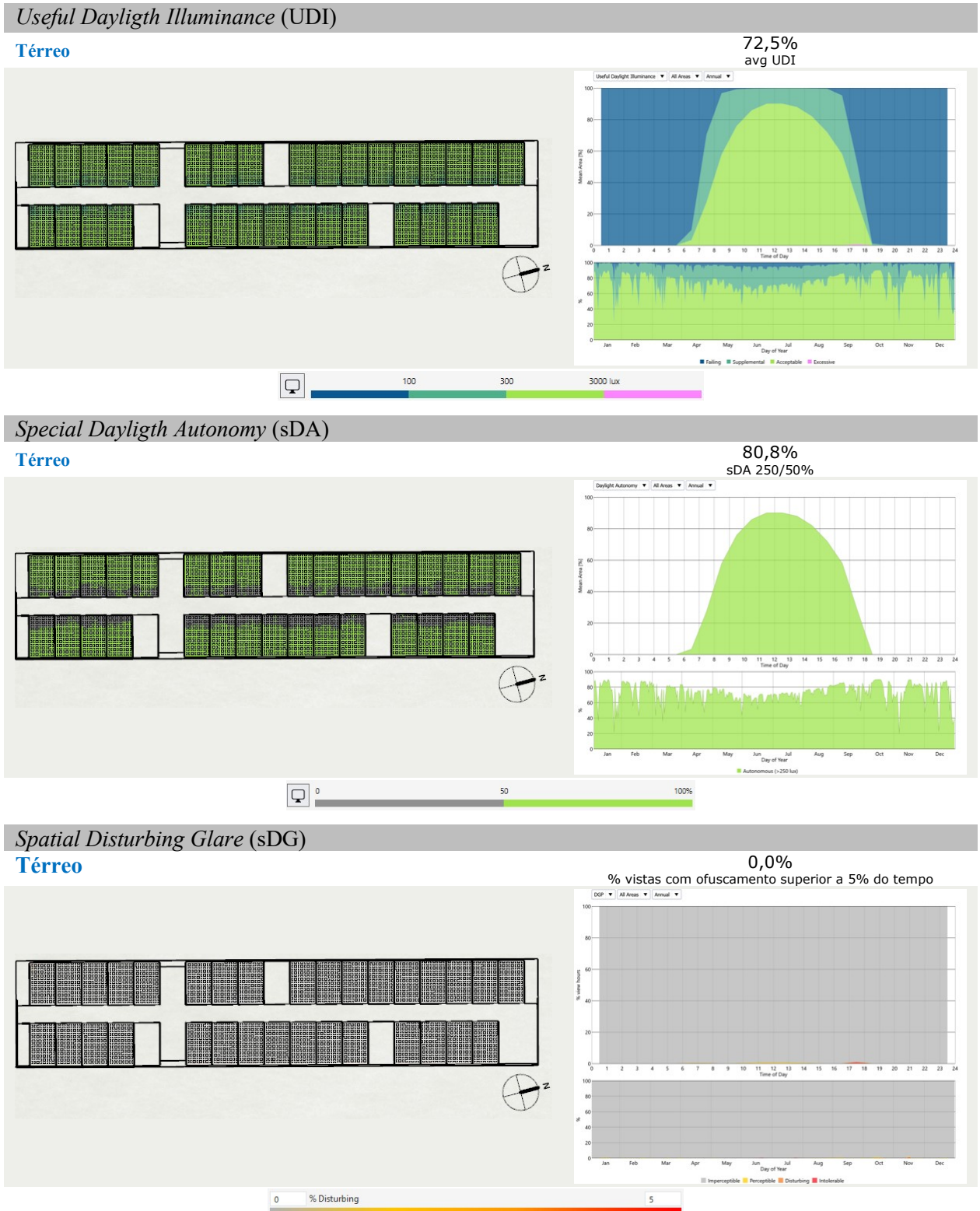
3,7%
% vistas com ofuscamento superior a 5% do tempo



Fonte: Climate Studio, 2024.

A Figura 71 apresenta os resultados da simulação para análise da qualidade da iluminação natural do edifício PJC.

Figura 71: Análise da Qualidade da Iluminação Natural – otimizado – PJC.



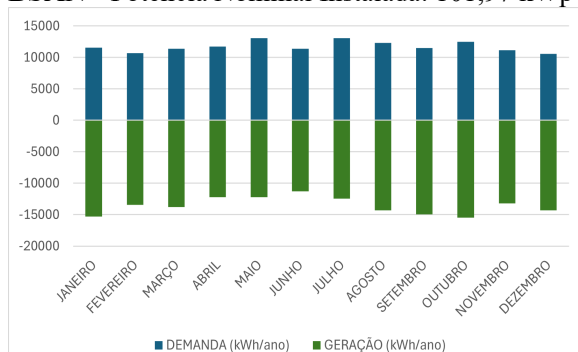
Fonte: Climate Studio, 2024.

5.3. GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

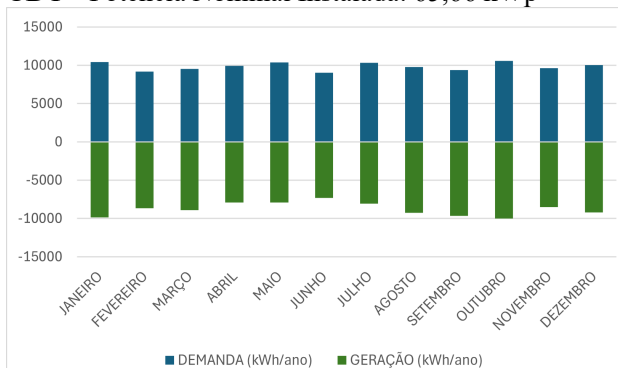
A Figura 72 apresenta a estimativa de geração de energia renovável por edifício e a locação das placas fotovoltaicas nas coberturas.

Figura 72: Estimativa de geração de energia renovável (kWh).

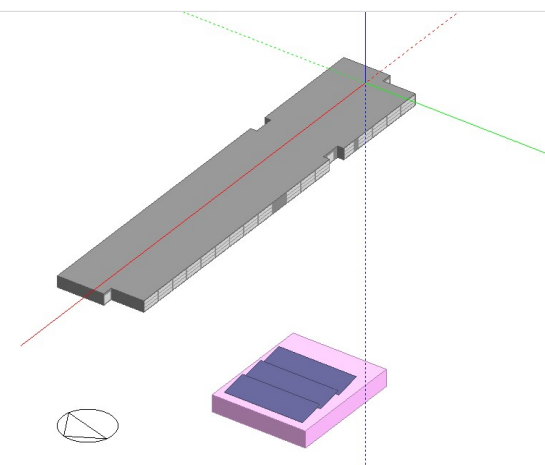
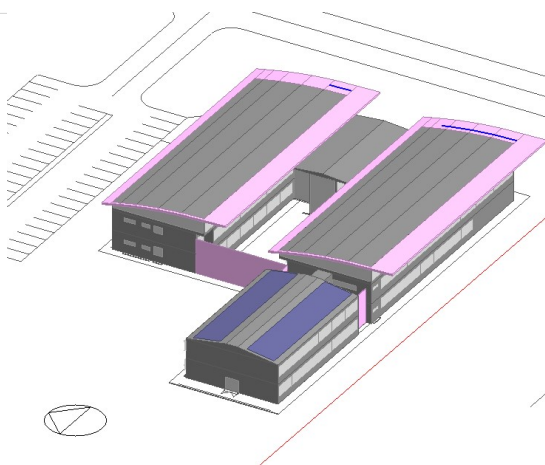
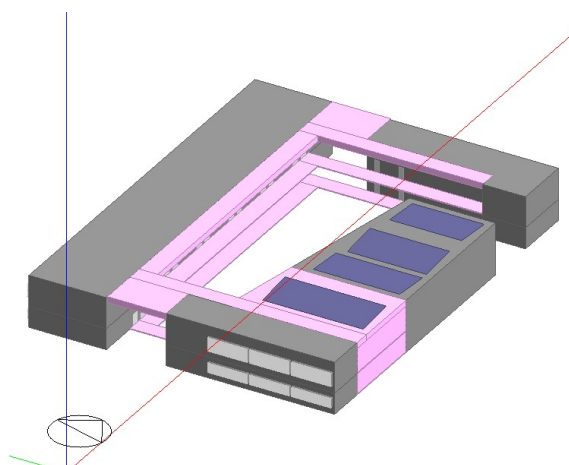
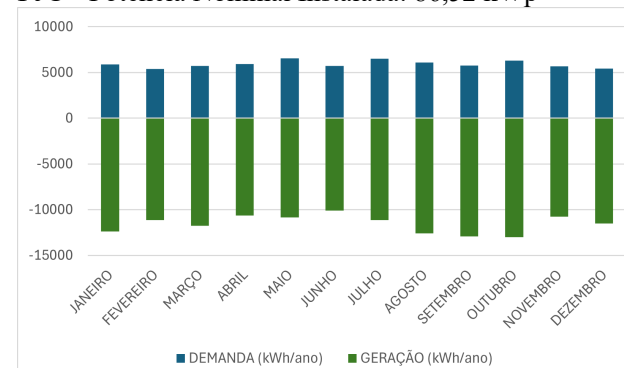
BSAN - Potência Nominal Instalada: 101,97 kWp



CDT - Potência Nominal Instalada: 65,66 kWp



PJC - Potência Nominal Instalada: 86,52 kWp



Fonte: Design Builder, 2024.

No edifício BSAN, as placas foram instaladas sobre o bloco do auditório, a fim de priorizar o uso de materiais frios na cobertura. Já no CDT, as placas fotovoltaicas foram alocadas apenas no edifício anexo, preservando a estética da cobertura dos blocos principais, que possuem um conceito arquitetônico específico. A inserção das placas nessas coberturas acarretaria um comprometimento visual, afetando a harmonia do projeto original. No PJC, optou-se por não instalar as placas na cobertura do edifício, também visando maximizar o efeito dos materiais frios. Como alternativa, utilizou-se a cobertura do edifício MASC Norte, conhecido como "amarelinho", que serve exclusivamente como refeitório. Este edifício, localizado a cerca de 50 metros do PJC, possui uma cobertura de 920 m², ideal para a instalação das placas fotovoltaicas. A análise da estimativa de geração de energia nos edifícios BSAN, CDT e PJC revelou um panorama positivo, principalmente para o BSAN e o PJC. O edifício BSAN apresenta um cenário de energia positiva, gerando 51,4 kWh/ano.m² enquanto consome 44,40 kWh/ano.m². Isso significa que o edifício produz mais energia do que consome, atingindo o status de ZEB, uma vez que sua geração excede sua demanda energética anual. Esse desempenho demonstra a eficiência das estratégias implementadas e a capacidade do BSAN de operar de forma autossuficiente em termos de energia.

No CDT, a geração de energia é de 35,56 kWh/ano.m², enquanto o consumo é de 39,88 kWh/ano.m². Apesar de não atingir o equilíbrio energético, o edifício se aproxima de um ZEB, mostrando que pequenas melhorias na eficiência, como, por exemplo, redução de DPI, ou na ampliação do sistema de geração fotovoltaica poderiam possibilitar a autossuficiência, ou ainda a utilização da energia remanescente de outro edifício. O PJC, utilizando a cobertura do edifício MASC Norte, destaca-se por gerar 63,54 kWh/ano.m² e consumir 32,48 kWh/ano.m², uma diferença expressiva que o classifica também como um edifício de energia positiva. Além de gerar energia suficiente para suas próprias necessidades, o excedente de geração permite alimentar o PAT, edifício replicado do PJC. A Tabela 23 a estimativa de geração de energia renovável por edifício anual por m².

Tabela 23 – Estimativa de geração de energia renovável anual por m².

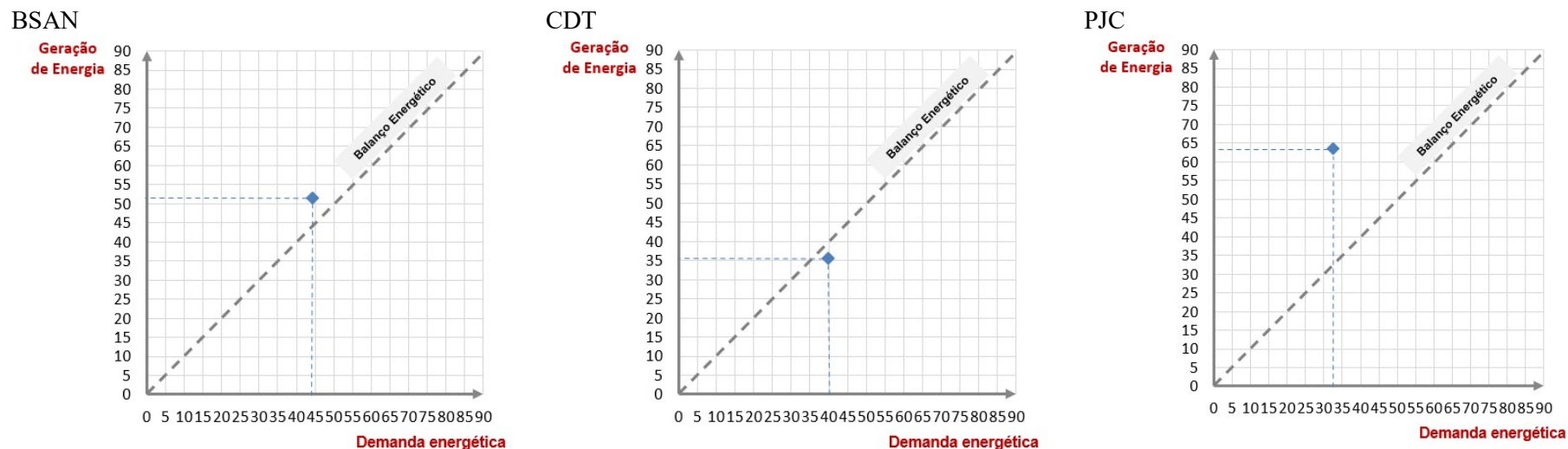
EDIFÍCIO	KWH/ANO	KHW/ANO.M ²
BSAN – Bloco de Salas de Aula Norte	163033,37	51,40
CDT – Centro de Desenvolvimento Tecnológico	105283,31	35,56
PJC – Pavilhão João Calmon	138833,05	63,54

Fonte: *Design Builder*, 2024.

5.4. BALANÇO ENERGÉTICO

Com base nos resultados da demanda energética e da estimativa de geração de energia renovável, a Figura 73 apresenta o balanço energético dos edifícios.

Figura 73: Balanço energético dos edifícios.



Fonte: *Design Builder*, 2024.

Com base nesses resultados, conclui-se que os edifícios BSAN e PJC atingem o status de energia positiva, uma vez que sua geração de energia supera o consumo. Já o edifício CDT está próximo de alcançar o balanço energético nulo. É importante destacar que, no edifício CDT, o sistema de geração fotovoltaica instalado não aproveitou toda a área disponível da cobertura devido ao formato da mesma. A expansão desse sistema para áreas próximas ao edifício poderia permitir que ele atingisse o status de balanço energético nulo ou até positivo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação atingiu os objetivos propostos, cumprindo as metas estabelecidas para a pesquisa. Ao longo do trabalho, foi possível caracterizar o desempenho termoenergético e luminoso de edifícios representativos do *Campus Darcy Ribeiro*, levando em conta os usos finais de energia, as condições de conforto térmico e a qualidade da iluminação natural. Essa análise, aliada à aplicação de estratégias passivas e ativas, demonstrou a viabilidade da transformação desses edifícios em *Zero Energy Buildings (ZEB)* dentro do contexto climático de Brasília-DF.

A aplicação de estratégias passivas se mostrou altamente eficaz para a redução da demanda energética e a melhoria do conforto ambiental. A escolha por estratégias passivas, como o controle da radiação solar, uso de materiais frios e dispositivos de sombreamento, mostrou-se adequada ao clima de Brasília, com melhoria do conforto térmico nos edifícios. Para o BSAN, houve um aumento de 20,14% das horas ocupadas em conforto térmico, passando de 72,50% para 92,64% (média anual). Para o CDT, houve um aumento de 4,35 das horas ocupadas em conforto, passando de 95,18% para 99,53% (média anual). Para o PJC, o aumento foi de 13,40% das horas ocupadas, passando de 83,35% para 96,75% (média anual).

Além disso, houve também uma redução média na demanda energética de aproximadamente 15,62%, com reduções específicas de 15,60% no BSAN, 13,26% no CDT e 18% no PJC. Em relação à iluminação natural, os resultados de sDG mostraram uma melhora significativa, com uma redução média de 34,10% nas situações de ofuscamento perturbador ou intolerável ($DGP > 38\%$) por pelo menos 5% das horas ocupadas. Especificamente, o BSAN teve uma redução de 39,2%, o CDT de 41,5% e o PJC de 21,6%. Para as métricas UDI e sDA, houve uma leve redução média de 3,87% e 12,27%, respectivamente, em consequência do remodelamento dos brises para melhorar as condições de conforto térmico. No entanto, esses valores continuam dentro dos parâmetros normativos, assegurando que a qualidade da iluminação natural não foi comprometida.

Com relação às estratégias passivas, conclui-se que o uso de materiais frios nas coberturas dos edifícios apresentou resultados variáveis, dependendo das características construtivas de cada caso. No edifício BSAN, onde o material frio foi aplicado diretamente sobre a laje, a estratégia mostrou-se altamente eficiente. A cobertura já atuava como uma superfície de perda térmica (-155,35 kWh). Pós otimização, a perda térmica da cobertura foi potencializada em mais de 1000 vezes (-163.318,00 kWh) em relação à carga térmica do caso-base. No edifício CDT, onde o material foi aplicado sobre a telha, o resultado não foi tão

expressivo, o que é bastante coerente com a literatura, que afirma que o material frio em climas como o de Brasília, tem melhor resultado quando aplicado em um substrato com maior inércia térmica (Correia, Amorim e Santamouris, 2023) A grande câmara de ar entre a laje e o telhado limitou a eficácia do material frio. Embora a cobertura tenha passado a atuar como uma superfície de perda térmica (caso-base: 9812,56 kWh; otimizado: -79.454,32 kWh), a camada de ar de cerca de 1,5 metro impediu que essa mudança resultasse em melhorias perceptíveis de conforto térmico nos espaços internos. Já no edifício PJC, onde o material também foi aplicado diretamente na telha, a estratégia mostrou-se altamente eficiente. A cobertura passou a atuar como uma superfície de perda térmica (caso-base: 60.564,51 kWh; otimizado: -154.994,3 kWh), resultando em melhorias no conforto interno da edificação. Isso sugere que a aplicação dos materiais frios deve sempre considerar as particularidades construtivas de cada edifício e do clima específico.

Ainda com relação a estratégias passivas, a redução do fator solar por meio de películas e o redimensionamento dos dispositivos de sombreamento foram soluções essenciais para controlar o ganho de calor e otimizar a iluminação natural. A radiação solar, que em climas quentes pode ser uma grande fonte de desconforto térmico, foi adequadamente gerida, permitindo que os edifícios aproveitassem a luz natural sem comprometer o conforto térmico. A redução média nos ganhos térmicos pelas janelas (externas) foi de 45,90%, com reduções específicas de 81,61% no BSAN, 40,72% no CDT e 15,38% no PJC.

Embora o foco principal da pesquisa tenha sido nas estratégias passivas, o controle da iluminação artificial também desempenhou um papel crucial na redução do consumo de energia. A automação dos sistemas de iluminação, baseada nos níveis de luz natural disponível, permitiu uma economia significativa de energia, sem prejudicar o conforto visual dos usuários. O controle eficiente da iluminação reduziu, em média, 25% do consumo com iluminação artificial, com redução específica de 25,55% no BSAN, 20,99% no CDT e 28,40% no PJC. uma economia que poderia ser ainda maior com a adoção de tecnologias mais eficientes, como a substituição de lâmpadas e equipamentos por versões de menor consumo.

As simulações computacionais desempenharam um papel central na pesquisa, permitindo a análise do desempenho termoenergético e da qualidade da iluminação natural dos edifícios. Com o uso dos softwares *DesignBuilder*, *Rhinoceros* e *Climate Studio* foi possível criar modelos dos edifícios e simular diferentes cenários de uso de energia e conforto térmico e lumínico. As simulações forneceram insights valiosos sobre como as estratégias

passivas e ativas podem ser combinadas para maximizar a eficiência energética dos edifícios sem comprometer a qualidade dos ambientes, especialmente o conforto visual.

Além disso, as simulações permitiram avaliar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica, um dos principais recursos para alcançar o balanço energético nulo. Os resultados mostraram que, com a instalação de módulos fotovoltaicos adequadamente dimensionados, é possível suprir a demanda energética dos edifícios, contribuindo para a transformação dos mesmos em ZEBs.

A pesquisa demonstrou que a transformação dos edifícios estudados em *Zero Energy Buildings* é viável, desde que as estratégias passivas sejam implementadas de maneira adequada e combinadas com o uso de energia renovável. No caso dos edifícios BSAN e PJC, os resultados indicam que essas edificações já podem ser classificadas como "energia positiva", ou seja, produzem mais energia do que consomem. Esse status foi alcançado principalmente à eficiente gestão da iluminação natural e dos ganhos térmicos, além da integração dos módulos fotovoltaicos para produção de eletricidade. Já o edifício CDT, embora ainda não tenha alcançado o balanço energético nulo, está próximo de atingir essa meta.

É essencial destacar que os resultados obtidos refletem uma resposta adequada da arquitetura às condições climáticas locais de Brasília. A viabilidade de transformar essas edificações em *Zero Energy Buildings* está, em grande parte, ancorada na utilização de estratégias que maximizam os recursos naturais do ambiente, como, por exemplo, a iluminação natural. Este potencial reforça a importância do planejamento e da gestão integrada das estratégias passivas e ativas, evidenciando que arquitetura quando projetada tendo em vistas as condições climáticas locais tende a responder positiva e eficiente.

Por fim, a dissertação conclui que, com a adoção das estratégias adequadas e o uso de tecnologias eficientes, é possível transformar edifícios universitários em ZEBs, contribuindo para a redução do consumo de energia, melhoria nas condições de conforto térmico e visual e, sobretudo, para a sustentabilidade do ambiente construído. A aplicação prática dessas estratégias poderá inspirar a replicação de soluções similares em outros contextos, ajudando a acelerar a transição para edifícios mais sustentáveis e energeticamente autossuficientes.

6.1. LIMITAÇÕES DA PESQUISA E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

As principais limitações desta pesquisa estão relacionadas ao tempo e ao cronograma estabelecido, que não permitiram uma análise abrangente dos três *clusters* planejados devido ao tempo necessário para modelagem e simulação computacional. Para uma análise mais detalhada e representativa, será necessário avançar a pesquisa pelo Laboratório (LACAM), de modo a abranger os demais *clusters* / edifícios.

Outro desafio encontrado foi a dificuldade de acesso aos dados de consumo real de energia dos edifícios analisados, uma vez que não há medição individualizada. Essa limitação impediu uma comparação mais precisa entre os consumos simulados e os reais, o que seria essencial para uma validação mais robusta das estratégias de eficiência energética adotadas.

Além disso, a pesquisa não incluiu a análise de custos das estratégias aplicadas, como a substituição de equipamentos ou a instalação dos módulos fotovoltaicos, o que poderia fornecer uma visão mais holística das implicações econômicas das soluções propostas.

No campo da iluminação natural, embora as principais métricas tenham sido avaliadas, não foi incluída a análise das vistas para o exterior nos edifícios, que é um aspecto importante da norma NBR 15215 e que deve ser considerado em pesquisas futuras para complementar a qualidade ambiental das construções.

Ainda, pode-se considerar a possibilidade para um trabalho futuro, de extrapolação destes resultados considerando os demais *clusters* e o *campus* como um todo, calculando a economia energética global, além de possíveis usos para a energia remanescente poupada, na direção de um *campus* de balanço energético nulo.

Por fim, análises de cenários com arquivos climáticos futuros seria de grande relevância em trabalhos subsequentes, para identificar o comportamento dos edifícios em condições futuras, além de verificar a resposta das estratégias passivas nas condições térmicas e luminosas desses edifícios.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15.220-3**: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: 2005.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **2º Projeto de Revisão ABNT NBR 15.220-3**: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho. (Consulta Pública) Rio de Janeiro: 2024.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.215**: Iluminação Natural. Rio de Janeiro: 2005.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de Revisão **ABNT NBR 15.215**: Iluminação Natural Parte 3: procedimentos para avaliação da iluminação natural em ambientes internos (Consulta Pública). Rio de Janeiro: 2024.
- Abdul Fusi, M.; Budaiwi, I. M. Energy performance of windows in office buildings considering daylight integration and visual comfort in hot climates. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 307-316, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.024>.
- Akhtar, S.; Sujod, M. Z. B.; Rizvi, S. S. H. An Intelligent Data-Driven Approach for Electrical Energy Load Management Using Machine Learning Algorithms. **Energies**, v. 15, n. 5742, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15155742>.
- Albatayneh, A. Optimisation of building envelope parameters in a semi-arid and warm Mediterranean climate zone. **Energy Reports**, v. 7, p. 2081-2093, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.011>.
- Alghoul, S. K.; Rijabo, H. G.; Mashena, M. E. Energy consumption in buildings: A correlation for the influence of window to wall ratio and window orientation in Tripoli, Libya. **Journal of Building Engineering**, v. 11, p. 82–86, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2017.04.003>.
- Alshibani, A. Prediction of the Energy Consumption of School Buildings. **Appl. Sci.**; v. 10, n. 5885, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/app10175885>.
- Al-Saadi, A.; Al-Saadi, S.; Khan, H.; Al-Hashim, A.; Al-Khatri, H. Judicious design solutions for zero energy school buildings in hot climates. **Solar Energy**, v. 264, n. 112050, 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2023.10.005>.
- Amato, A.; Bilardo, M.; Fabrizio, E.; Serra, V.; Spertino, F. Energy Evaluation of a PV-Based Test Facility for Assessing Future Self-Sufficient Buildings. **Energies**, v. 14, n. 329, 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/en14020329>.
- Amorim, C. N. D. Diagrama morfológico - Parte 1: instrumento de análise e projeto ambiental com uso de luz natural. **Paranoá**: cadernos de arquitetura e urbanismo, Brasília, n. 3, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/32118>. Acesso em 21 jun. 2023.
- Amorim, C. N. D. Eficiência energética em edificações: ações e perspectivas para a Universidade de Brasília. In.: Catalão, V. M. L.; Layrargues, P. P.; Bacelar, I. C. B. (orgs.) **Universidade para o século XXI**: educação e gestão ambiental na Universidade de Brasília. Brasília: Cidade Gráfica e Editora, 2011.

Amorim, C.N.D.; Cronemberger, J.; SOARES, M. T. Relatório parcial do projeto de pesquisa “Cenários e propostas para eficiência energética em edifícios e *campus* de balanço energético nulo”, Edital Demanda Espontânea 2022, FAPDF. Brasília, 2024.

Andrade, M. M. **Revestimentos frios para coberturas e fachadas no Brasil**: caracterização e avaliação do desempenho térmico. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-06062023-155549/>. Acesso em: 03 nov. 2024.

Ballarini, I.; Luca, G.; Paragamyan, A.; Pellegrino, A.; Corrado, V. Transformation of an Office Building into a Nearly *Zero Energy Building* (nZEB): Implications for Thermal and Visual Comfort and Energy Performance. **Energies**, v. 12, n. 895, 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/en12050895>.

Barth, F.; Vefago, L. H. M.; Vasconcelos, C. Compacidade dos espaços arquitetônicos. **Mix Sustentável**, UFSC, ed. 05, v.3, n. 1, 2017.

Cabeza, L. F.; de Gracia, A.; Pisello, A. L. Integration of renewable technologies in historical and heritage buildings: A review. **Energy and Buildings**, n. 177, p. 96-111, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.058>.

Castrilon-Mendonza, R.; Manrique-Catillo, P. A.; Rey-Hernandez, J. M.; Rey-Martinez, F.J.; Gonzalez-Palomino, G. PV Energy Performance in a Sustainable *Campus*. **Electronics**, v. 9, n. 1874, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/electronics9111874>.

Castaldo, V. L.; Pisello, A. L.; Piselli, C.; Fabiani, C.; Cotana, F.; Santamouris, M. How outdoor microclimate mitigation affects building thermal-energy performance: A new design-stage method for energy saving in residential near-zero energy settlements in Italy. **Renewable Energy**, v. 127, p. 920-935, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.090>.

CGEE - Centro De Gestão E Estudos Estratégicos. **Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica: evolução tecnológica nacional no segmento de eficiência energética**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2017. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/aneel_2017_6-8.pdf/8ffe175bf2ac-4aab-bad6-37b7fd597aec?version=1.4. Acesso em 13 jun. 2023.

CEPLAN – Centro de Planejamento Oscar Niemeyer. **Campus Universitário Darcy Ribeiro**. Disponível em: http://ceplan.unb.br/index.php?option=com_content&view=article&id=17&Itemid=693. Acesso em 25 jan. 2023.

Correia, C. M. A.; Amorim, C. N. D.; Santamouris, M. Use of Passive Cooling Techniques and Super Cool Materials to Minimize Cooling Energy and Improve Thermal Comfort in Brazilian Schools. **Available at SSRN**, 2023. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4655986>

Cortinhas, J. M. L. **Design Cons/eficiente**: o impacto do fator de forma no consume energético dos edifícios. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade do Porto, Portugal, 2022.

Costa, J. F. W.; Amorim, C. N. D.; Silva, J. C. R. Retrofit guidelines towards the achievement of net *Zero Energy Buildings* for office buildings in Brasilia. **Journal of Building Engineering**, v. 32, n. 101680, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.10168>

CODEPLAN - Companhia De Planejamento Do Distrito Federal. **Atlas do Distrito Federal: Caracterização Ambiental**. Brasília: 2020. Disponível em: <https://www.codeplan.df.gov.br/>. Acesso em 26 jun. 2023.

Chel, A.; Kaushik, G. Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 2, p. 655-669, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2017.02.027>.

Cronemberger, J.; Caamaño-Martín, E. Irradiação solar: ferramenta de análise para o uso de energia solar fotovoltaica em edifícios no Brasil. In.: Silva, C. F. *et al.* **Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, p. 173 - 214, 2020.

D'Agostino, D.; Mazzarella, L. (2019). What is a Nearly *Zero Energy Building*? Overview, implementation and comparison of definitions. *Journal of Building Engineering*, 21, 200-212. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.019>.

Dias, A. R. D.; Carvalho, J. P. V.; Hazboun, V. D.; Pedrini, A. Influência de métricas dinâmicas na avaliação do aproveitamento da luz natural em clima tropical. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 29-47, jul./set. 2018. ISSN 1678-8621. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000300266>.

Doulos, I. T.; Kontadakis, A.; Madias, E. N.; Sinou, M.; Tsangrassoulis, A. Minimizing energy consumption for artificial lighting in a typical classroom of a Hellenic public school aiming for near *Zero Energy Building* using LED DC luminaires and daylight harvesting systems. **Energy and Buildings**, v. 194, p. 201-217, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.033>.

Duarte, D. C.; Rosa-Jiménez, C. Cost-optimal nZEB reform strategies and the influence of building orientation for Mediterranean university buildings: case study of the University of Málaga. **Heliyon**, v. 8, n. e09020, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09020>.

Dresch, A.; Antunes Júnior, J. A. V.; Lacerda, D. P. **Design Science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Elnagar, E.; Munde, S.; Lemort, V. Energy Efficiency Measures Applied to Heritage Retrofit Buildings: A Simulated Student Housing Case Study in Vienna. **Heritage**, v. 4, p. 3919-3937, 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/heritage4040215>.

Eurostat. **Energy statistics - an overview**. 2023. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview. Acesso em 20 dez. 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Ações para promoção da eficiência energética nas edificações brasileiras: no caminho da transição energética**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2020.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2023: Ano base 2022**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em 28 jun. 2023.

ESTAT - Empresa Júnior de Estatística. **Cálculo amostral para um estudo de caso**. Brasília, 2023.

Fabiani, C.; Gambucci, M.; Chiatti, C.; Zampini, G.; Latterini, L.; Pisello, A. L. Towards field implementation of photoluminescence in the built environment for passive cooling and

lighting energy efficiency. **Applied Energy**, v. 324, n. 119687, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119687>.

Feng, W.; Zhang, Q.; Jia, H.; Wang, R.; Zhou, N.; Ye, Q.; Hao, B.; Li, Y.; Luo, D.; Lau, S. S. Y. A review of net *Zero Energy Buildings* in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109303>.

Figueiredo, A.; Kämpf, J.; Vicente, R.; Oliveira, R.; Silva, T. Comparison between monitored and simulated data using evolutionary algorithms: Reducing the performance gap in dynamic building simulation. **Journal of Building Engineering**, v. 17, p. 96-106, 2018.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2018.02.003>.

Garcia, M. S.; Bitarães, T. G.; Oliveira, I. C. F.; Ferreira, D. C. M.; Eulario, D. M. S.; Souza, R. V. G. Eficiência Energética e Benchmarking em *Campi* Universitários: oportunidades de pesquisa a partir de análise bibliométrica. In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 18.; 2020, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

Garcia, M. S. **Consumo de energia e conforto térmico em *campus* universitário**: uma proposta de benchmarking. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2022.

Garcia, M. S.; Souza, R. V. G.; Reis, I. A. Consumo de energia elétrica de *campi* universitários com edifícios de diferentes usos. In: **ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 17., 2023. **Anais [...]. [S. l.]**, 2023. p. 1–10. DOI: 10.46421/encac.v17i1.3874. Disponível em:
<https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/3874>. Acesso em: 10 set. 2024.

Global Solar Atlas. **Global Photovoltaic Power Potential by Country**. 2020; Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study>. Acesso em 27 set. 2023.

Gonçalves, J. C. S.; Baker, N. A reabilitação de edifícios. In: Gonçalves, J. C. S.; Bode, K. (orgs.) **Edifício ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. pp 399-416.

IEA – International Energy Agency. **Net Zero Energy Solar Building**. 2013. Disponível em: <https://task40.iea-shc.org/>. Acesso em 10 out. 2023.

IEA – International Energy Agency. **Renovating Historic Buildings Towards Zero Energy**. 2021. Disponível em: <https://task59.iea-shc.org/>. Acesso em 10 out. 2023.

IEA – International Energy Agency. **Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables**. 2023. Disponível em: <https://annex75.iea-ebc.org/>. Acesso em 10 out. 2023.

IEA - International Energy Agency. **Energy Systems – Buildings**, 2022a. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/buildings>>. Acesso em 27 dez. 2023.

IEA - International Energy Agency. **Efficiency action accelerates as countries move to contain economic pain from the energy crisis**, 2022b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022/executive-summary>. Acesso em 12 jun. 2023.

IES - Illuminating Engineering Society. **ANSI/IES LM-83-23, Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**. New York, USA, 2022.

- Jia, X.; Zhang, H.; Yao, X.; Yang, L.; Ke, Z.; Yan, J.; Huang, X.; Jin, S. Research on Technology System Adaptability of Nearly Zero-Energy Office Buildings in the Hot Summer and Cold Winter Zone of China. **Sustainability**, v. 15, n. 13061, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151713061>.
- Khalil, A. M. R.; Hammouda, N. Y.; El-Deeb, F. K. Implementing sustainability in retrofitting heritage buildings. Case study: Villa Antoniadis, Alexandria, Egypt. **Heritage**, v. 1, p. 57-87, 2018. DOI: doi.org/10.3390/heritage1010006.
- Kim, D. W.; Jung, J. W.; Seok, H. T.; Yang, J. H. Survey and Analysis of Energy Consumption in University *Campuses*. In: **Proceedings of the SB10 SEOUL Symposium Panel Discussion**, International Conference on Sustainable Building Asia, Seoul, Republic of Korea, 24 February, 2010. Disponível em: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB17386.pdf>. Acesso em 03 jan. 2024.
- Kiliç, G. A. Al, K.; Dağtekinb, E.; Ünverç, U. Technical, economic and environmental investigation of grid-independent hybrid energy systems applicability: a case study. **Energy Sources**, 2020. <http://dx.doi.org/10.1080/15567036.2020.1825565>.
- Knoop, M.; Stefani, O.; Bueno, B.; Matusiak, B.; Hoday, R.; Wirz-Justice, A.; Martiny, K.; Kantermann, T.; Aarts, M.P.J.; Zemmouri, N.; Appelt, S.; Norton, B. Daylight: what makes the difference? **Lighting Research & Technology**, n. 52, p. 423-442. 2020. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1477153519869758>.
- Kruisselbrink, T.; Dangol, R.; Rosemann, A. Photometric measurements of lighting quality: an overview. **Building and Environment**, n. 138, p. 42-52. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.028>.
- Kunwar, N.; Cetin, K. S.; Passe, U.; Zhou, W.; Li, Y. Energy savings and daylighting evaluation of dynamic venetian blinds and lighting through full-scale experimental testing. **Energy**, v. 197, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.117190>.
- Lamberts, R; Dutra, L.; Pereira, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. [3.ed.] Rio de Janeiro, 2014.
- Lan, L.; Wood, K. L.; Yuen, C. A holistic design approach for residential net-Zero *Energy Buildings*: A case study in Singapore. **Sustainable Cities and Society**, v. 50, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2019.101672>.
- Liu, Q., Ren, J. Research on the building energy efficiency design strategy of Chinese universities based on green performance analysis. **Energy and Buildings**, v. 224, n. 110242, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110242>.
- Litardo, J.; Palme, M.; Hidalgo-Leon, R.; Amoroso, F.; Soariano, G. Energy Saving Strategies and On-Site Power Generation in a University Building from a Tropical Climate. **Applied Sciences**; v. 11, n.542, 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/app11020542>.
- Litardo, J.; Hidalgo-Leon, R.; Soriano, G. Energy Performance and *Benchmarking* for University Classrooms in Hot and Humid Climates. **Energies**, v. 14, n. 7013, 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/en14217013>.
- Lo Basso, G; Rosa, F.; Garcia, D. A.; Cumo, F. Hybrid systems adoption for lowering historic buildings PFEC (primary fossil energy consumption): a comparative energy analysis. **Renewable Energy**, v. 117, p. 414-433, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.099>.

- Lohwanitchai, K.; Jareemit, D. Modeling Energy Efficiency Performance and Cost-Benefit Analysis Achieving Net-Zero *Energy Building* Design: Case Studies of Three Representative Offices in Thailand. **Sustainability**, v. 13, n. 5201, 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/su13095201>.
- Luo, X.; Sun, T.; Liu, X.; Gao, Y.; Sun, H.; Liu, Y. Course timetable optimization for a university teaching building considering the building energy efficiency and time-varying thermal perception of students. **Building and Environment**, v. 219, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109175>.
- Maciel, T. S.; Leitzke, R. K.; Duarte, C. M.; Schramm, F. K.; Cunha, E. G. Otimização termoenergética de uma edificação escolar: discussão sobre o desempenho de quatro algoritmos evolutivos multiobjetivo. *Ambiente Construído*, [S. l.], v. 21, n. 4, p. 221–246, 2021. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/109133>. Acesso em: 27 jan. 2024.
- Mardaljevic, J. The implementation of natural lighting for human health from a planning perspective. **Lighting Research and Technology**, v. 53, n. 5, p. 489–513, 2021. <https://doi.org/10.1177/14771535211022145>.
- Marino, C.; Nucara, A.; Pietrafesa, M. Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? A parametric analysis in Italian climate conditions. **Journal of Building Engineering**, v. 13, p. 169-183, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2017.08.001>.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Projeteec**: projetando edificações eficientes energeticamente. 2024. Disponível em; http://www.mme.gov.br/projeteec/dados-climaticos/?cidade=DF+-+Bras%C3%ADlia&id_cidade=bra_df_brasilia-kubitschek.intl.ap.833780_try.1962. Acesso em 10 fev. 2024.
- Manzano-Agugliaro, F.; Montoya, F. G.; Sabio-Ortega, A.; García-Cruz, A. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 736-755, set. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>.
- Nagpal, S.; Hanson, J.; Reinhart, C. A framework for using calibrated *campus*-wide building energy models for continuous planning and greenhouse gas emissions reduction tracking. **Applied Energy**, v. 241, p. 82-97, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.010>.
- Nutkiewicz, A.; Yang, Z.; Jain, R. K. Data-driven Urban Energy Simulation (DUE-S): A framework for integrating engineering simulation and *machine learning* methods in a multi-scale urban energy modeling workflow. **Applied Energy**, v. 225, p. 1176-1189, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.023>.
- Ohene, E.; Chan, A. P. C.; Darko, A. Review of global research advances towards net-zero emissions buildings. **Energy and Building**, v. 266, 2022. doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112142.
- Ohene, E.; Hsu, S. C.; Chan, A. P. C. Feasibility and retrofit guidelines towards net-Zero *Energy Buildings* in tropical climates: A case of Ghana. **Energy and Buildings**, v. 269, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112252>.
- Pazouki, M.; Rezaie, K.; Bozorgi-Amiri, A. A fuzzy robust multi-objective optimization model for building energy *retrofit* considering utility function: A university building case study. **Energy & Buildings**, v. 241, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110933>.

Pisello, A. L. State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities. **Solar Energy**, 144, 660-680, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.068>.

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. Rio de Janeiro: PROCEL, 2021. Disponível em: <http://www.pbedificio.com.br/inic>. Acesso em 10 jun. 2022.

Quevedo, T. C.; Geraldi, M. S.; Melo, A.P. Applying machine learning to develop energy benchmarking for university buildings in Brazil. **Journal of Building Engineering**, v. 63, 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobee.2022.105468>.

Rey-Hernández, J. M.; Velasco-Gómez, E.; San José-Alonso, J. F.; Tejero-González, A.; Rey-Martínez, F. J. Energy Analysis at a Near *Zero Energy Building*. A Case-Study in Spain. **Energies**, v. 11, n. 857, 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/en11040857>.

Rose, J.; Thomsen, K. E.; Domingo-Irigoyen, S.; Bolliger, R.; Venus, D.; Konstantinou, T.; Mlecnik, E.; Almeida, M.; Barbosa, R.; Terés-Zubiaga, J.; Johansson, E.; Davidsson, H.; Conci, M.; Dalla Mora, T.; Ferrari, S.; Zagarella, F.; Sanchez Ostiz, A.; San Miguel-Bellod, J.; Monge-Barrio, A.; Hidalgo-Betanzos, J. M. Building renovation at district level – Lessons learned from international case studies. **Sustainable Cities and Society**, v. 72, n. 103037, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103037>.

Rosa, F. Building-integrated photovoltaics (BIPV) in historical buildings: Opportunities and constraints. **Energies**, v. 13, p. 1-28, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/en13143628>.

Rucińska, J.; Trzaski, A. Measurements and Simulation Study of Daylight Availability and Its Impact on the Heating, Cooling and Lighting Energy Demand in an Educational Building. **Energies**, v. 13, n. 2555, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/en13102555>.

Santamouris, M.; Yun, G. Y. Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island. **Renewable Energy**, v. 161, 792-807, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.109>.

Sandhya, Y. B.; Anand, B. V.; Prasad, S. Energy-Efficient Design Optimization of a Building Envelope using DOE-2. **International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)**, 8(3), 2019, ISSN: 2277-3878.

Salvalai, G.; Sesana, M. M.; Brutti, D.; Imperadori, M. Design and Performance Analysis of a Lightweight Flexible nZEB. **Sustainability**, v. 12, n. 5986, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/su12155986>.

Şevik, S. Techno-economic evaluation of a grid-connected PV-trigeneration-hydrogen production hybrid system on a university *campus*. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, p. 23935-23956, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.193>.

Silva, C. (org.) *et al.* **Relatório de Atividades do Eixo 1: morfologia arquitetônica**. Brasília: Universidade de Brasília, 2023.

Sima, C. A.; Popescu, C. L.; Popescu, M. O.; Roscia, M.; Seritan, G.; Panait, C. Techno-economic assessment of university energy communities with on/off microgrid. **Renewable Energy**, v. 193, p. 538-553, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.047>.

SOLLEMA LLC. **Annual Glare**. Disponível em: <https://ClimateStudiosdocs.com/docs/annualGlare.html>. Acesso em: 17 out. 2024.

- Soares, M. T. B.; Amorim, C. N. D. Estudo de potencial de estratégias passivas para eficiência energética em *campus* universitário. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2023. **Anais [...]**. [S. l.], 2023. p. 1–10. DOI: 10.46421/encac.v17i1.3981. Disponível em: <http://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/3981>.
- Souza, L. P.; Costa, V. A. C.; Melo, A. P.; Lamberts, R. O impacto do uso de isolamento na cobertura de acordo com a NBR 15575. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19.; 2022, Canela. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2022.
- Sudimac, B.; Urganovic, A.; Jurcevic, M. The application of photovoltaic systems in sacred buildings for the purpose of electric power production: the case study of the Cathedral of St. Michael the Archangel in Belgrade. *Sustainability*, v. 12, p. 1-18, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/su12041408>.
- Terés-Zubiaga, J.; Bolliger, R.; Almeida, M. G.; Barbosa, R.; Rose, J.; Thomsen, K. E.; Montero, E.; Briones-Llorente, R. Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables– Methodology assessment proposed in IEA EBC *Annex 75* and a demonstration case study. *Energy & Buildings*, v. 224, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110280>.
- Tsantili, A.; Koronaki, I; Polydoros, V. Maximizing Energy Performance of University *Campus* Buildings through BIM Software and Multicriteria Optimization Methods. **Energies**, v. 16, n. 2291, 2023. <http://dx.doi.org/10.3390/en16052291>.
- Turan, I.; Chegut, A.; Fink, D.; Reinhart, C. The value of daylight in office spaces. **Building and Environment**, n. 168, p. 1-13. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106503>.
- Vakilinezhad, R.; Khabir, S. Evaluation of thermal and energy performance of cool envelopes on low-rise residential buildings in hot climates. **Journal of Building Engineering**, v. 72, n. 106643, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106643>.
- Xing, M.; Luo, X.; Liu, X.; Ma, Z.; Li, N. Impacts of Building Energy Consumption Information on Energy-Saving Intention of College Students. **Buildings**, 12, 769, 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings12060769>.
- Yildiz, Y., Koçyiğit, M. A study on the energy-saving potential of university *campuses* in Turkey. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, v. 173, p. 379-396, 2020. <https://doi.org/10.1680/jensu.20.00006>.
- Zalamea-Léon, E.; Mena-Campos, J.; Barragan-Escadon, A.; Gonzalez, A. P.; Méndez-Santos, P. Urban photovoltaic potential of inclined roofing for buildings in heritage centers in equatorial areas. **Journal Green of Building**, v. 3, n. 3, p. 45-69, 2017. <http://dx.doi.org/10.3992/1943-4618.13.3.45>.
- Zalamea-León, E. F.; Mena-Campos, J. D.; Moscoso-Cordero, M. S.; Barragán-Escandón, E. A.; Méndez-Santos, P. Architectural perspectives and photovoltaic roofs in heritage urban contexts. *ACE: Architecture, City and Environment*, v. 13, n. 38, p. 185-210, 2018. <http://dx.doi.org/10.5821/ace.13.38.5369>.
- Zhang, Y. Jia, Q. A. Simulation-Based Policy Improvement Method for Joint-Operation of Building Microgrids With Distributed Solar Power and Battery. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 6, 2018. <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2017.2707098>.

APÊNDICES E ANEXOS

https://drive.google.com/drive/folders/1gUVhyD5S3r_o3DM9w76iOT3h2TWq-PuN?usp=drive_link