



UnB



faunb



**OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO
PARA A OBTENÇÃO DE UM
ZERO ENERGY BUILDING:
APLICAÇÃO DE DIRETRIZES
BIOCLIMÁTICAS EM EDIFÍCIO
EDUCACIONAL**

LARISSA TEIXEIRA ANGUETH DE ARAUJO

Brasília | 2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

**OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO PARA A OBTENÇÃO
DE UM *ZERO ENERGY BUILDING*: APLICAÇÃO DE
DIRETRIZES BIOCLIMÁTICAS EM EDIFÍCIO
EDUCACIONAL**

LARISSA TEIXEIRA ANGUETH DE ARAUJO
Orientador: Caio Frederico e Silva
Brasília | 2024

RESUMO

Os *campi* universitários podem ser comparados a pequenas cidades, devido ao tamanho dos edifícios, ao grande número de usuários e à diversidade de funções que desempenham. Fatores diversos como, por exemplo, o tipo de ensino, a área de ocupação, envoltória da edificação, contribuem para uma elevada demanda energética das instituições de ensino superior. Assim, observa-se o potencial dos *campi* para atender às suas necessidades energéticas próprias, por meio da implementação de medidas de eficiência e de geração de energia renovável. Sob essa ótica, os *Zero Energy Buildings (ZEB)* são uma estratégia promissora para a otimização do consumo energético, uma vez que são edificações eficientes e geram sua própria energia. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa consiste em determinar o impacto de diretrizes bioclimáticas para a obtenção de um ZEB, por meio de uma otimização multiobjetivo, a partir de um edifício educacional existente, em Brasília-DF. O método desse trabalho baseia-se em uma otimização cujos objetivos são minimizar as horas de desconforto e reduzir o gasto de energia com iluminação artificial, por meio de um sistema de automação. Nesse sentido, as simulações foram divididas em três etapas. A primeira desenvolve-se por meio de algoritmo evolutivo para encontrar as soluções ótimas de conforto térmico. A segunda é feita uma análise de desempenho das soluções ótimas. Essa etapa investiga o conforto visual das salas de aula e, ainda, inclui o uso de ar-condicionado, para suprir as horas em desconforto por calor e servir como parâmetro comparativo para o consumo de energia dos cenários ótimos. Por fim, promove-se a simulação da geração de energia fotovoltaica e a análise do balanço energético do cenário ótimo. Os resultados da pesquisa mostraram que a implementação de estratégias bioclimáticas associadas ao uso de máquinas de condicionamento de ar eficientes e à integração de recursos de automação para os sistemas de iluminação colaboraram para o avanço do desempenho da edificação. O cenário ótimo encontrado contribuiu para um aumento de 50% no percentual de horas de conforto anual e uma redução de 51% na demanda de energia, além de promover os níveis adequados de iluminância, sem ofuscamento. A combinação desses fatores conduziu o edifício em direção ao balanço energético nulo, com um possível extrapolação dos resultados para o *campus*.

Palavras-chave: Balanço energético nulo; *Campus* universitário, Simulação computacional; Otimização multiobjetivo; Algoritmo genético.

ABSTRACT

University campuses can be compared to small towns due to their substantial building sizes, the large number of users, and the diversity of functions they perform. Various factors, such as the type of teaching, the area of occupation, and the building envelope, contribute to the high energy demand of higher education institutions. As a result, campuses have the potential to meet their own energy needs by implementing efficiency measures and generating renewable energy. From this perspective, Zero Energy Buildings (ZEBs) are a promising strategy for optimizing energy consumption, since they are efficient buildings and generate their own energy, while ensuring good comfort conditions for users of university campuses. In this context, the aim of this research is to determine the impact of bioclimatic guidelines for obtaining a ZEB, by means of multi-objective optimization, from an existing educational building in Brasília, DF. The method of this work is based on an optimization whose objectives are to minimize the hours of discomfort and reduce energy expenditure on artificial lighting, through an automation system. The simulations were conducted in three stages. The first uses an evolutionary algorithm to find optimal thermal comfort solutions. The second stage uses new optimization processes, without an algorithm. This stage analyzes the visual comfort of the classrooms and also includes the use of air conditioning to compensate for the hours of heat discomfort and compare the energy consumption of the optimal scenarios. Finally, photovoltaic energy generation is simulated, and the energy balance of the optimal scenario is analyzed. The results of the research showed that the implementation of bioclimatic strategies associated with the use of efficient air conditioning systems and the integration of automation resources for the lighting systems contributed to improving the building's performance. The optimum scenario found improved the annual Performance of Occupant Comfort (POC) by 50% and energy demand by 51%, as well as promoting adequate illuminance levels without glare. The combination of these factors led the building towards achieving a zero energy balance, with a positive extrapolation of the results to the campus.

Keywords: Zero energy balance; University campus; Computer simulation; Multi-objective optimization; Genetic algorithm.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo geral	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
1.2. Estrutura do trabalho	4
2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO	6
2.1. Panorama energético no Brasil e no mundo	6
2.2. Políticas públicas e regulamentações de incentivo à eficiência energética: Brasil, União Europeia, Estados Unidos e China	8
2.2.1. Contexto internacional: Estados Unidos, União Europeia e China	8
2.2.2. Contexto brasileiro	10
2.3. Medidas de eficiência energética	12
2.3.1. Estratégias passivas de arquitetura bioclimática	13
2.3.2. Estratégias ativas para melhorar a eficiência energética	15
2.4. Geração de energia proveniente de fonte renovável solar	17
2.5. <i>Zero Energy Buildings</i>	20
2.6. Desafios para implementação de edifícios de balanço energético nulo	22
2.6.1. Conceito ZEB	23
2.6.2. Processo de projeto para ZEB	25
2.6.3. Papel dos usuários no desempenho energético das edificações	27
2.6.4. Perspectivas ZEB para edificações novas e existentes	27
2.6.5. Desafios tecnológicos e econômico-financeiros	28
2.7. Eficiência energética em <i>campi</i> universitários	29
2.8. Simulação computacional e otimização multiobjetivo	32
2.9. Considerações finais do capítulo	36
3. MÉTODO	38
3.1. Levantamento bibliográfico	39
3.2. Processo de otimização	39
3.2.1. Preparação	40
a. <i>Caracterização climática local</i>	40
b. <i>Caracterização do objeto de estudo</i>	41

<i>c. Simulação do cenário base</i>	43
3.2.2. Otimização com uso de algoritmo	45
3.2.3. Análise de desempenho das soluções ótimas	50
<i>a. Análise do conforto térmico e desempenho energético</i>	50
<i>b. Diagnóstico do conforto visual</i>	51
3.3. Geração de Energia Fotovoltaica e balanço energético	53
3.4. Considerações finais do capítulo	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1. Resultado do caso base	58
4.2. Resultados da otimização com o uso de algoritmo	60
4.3. Resultados da análise de desempenho das soluções ótimas	62
4.4. Resultados da geração de energia fotovoltaica e do balanço energético	69
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
5.1. Limitações de pesquisa e sugestões para estudos futuros	76
REFERÊNCIAS	78
APÊNDICE A	96
APÊNDICE B	97
APÊNDICE C	99
APÊNDICE D	102
APÊNDICE E	104
APÊNDICE F	110
APÊNDICE G	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Digrama resumo da estrutura da dissertação.....	5
Figura 2 - Principais legislações e regulamentos de incentivo à eficiência energética no Brasil.	11
Figura 3 - Composição dos sistemas fotovoltaicos off grid e on grid.....	19
Figura 4 - Etapas para alcançar um ZEB.	22
Figura 5 - Processo para o projeto de uma edificação com baixo consumo de energia.....	26
Figura 6 - Procedimento de execução do algoritmo evolutivo.	34
Figura 7 - Diagrama de Pareto.	36
Figura 8 - Delineamento metodológico da pesquisa.....	38
Figura 9 – Ficha técnica.....	41
Figura 10 – Planta dos dois pavimentos do BSAN.....	41
Figura 11 – Esquadrias e brises do bloco de salas de aula.....	42
Figura 12 – Implantação do BSAN.....	43
Figura 13 - Blocos das salas de aula do BSAN	43
Figura 14 - Composição dos sistemas construtivos	44
Figura 15 – Modelo simplificado, desenvolvido no software Desing Builder.	46
Figura 16 - Variáveis consideradas para a otimização.....	47
Figura 17 – Modelo desenvolvido no software Rinoceros para simulação com o Climate Studio.....	52
Figura 18 – Exemplo de como pode ser feita a instalação de módulos fotovoltaicos, em um bloco do campus Darcy Ribeiro, considerando a inclinação de telhas metálicas.	54
Figura 19 – Posicionamento dos módulos fotovoltaicos (cobertura total e cobertura do bloco de salas de aula).....	55
Figura 20 - Diagrama de irradiação para qualquer orientação e inclinação na cidade de Brasília	55
Figura 21 - Representação do balanço energético de um edifício.	56
Figura 22 – Percentual de horas de conforto do bloco de salas de aula.....	59
Figura 23 – Comparativo do percentual de horas de conforto por sala de aula.	59
Figura 24 – Balanço térmico do bloco de salas de aula.	60
Figura 25 – Gráfico de Pareto com resultado da otimização	62
Figura 26 – Comparativo de consumo de energia entre o cenário base e os cenários ótimos.	63
Figura 27 – Comparativo do POC entre C03, C04 e CB.	64
Figura 28 - Balanços de calor dos cenários C03 e C04 com indicação comparativa ao cenário base. 65	
Figura 29 - Comparação dos resultados de Useful Daylight Illuminances, no bloco de salas de aula, para CB, C03 e C04.	66
Figura 30 – Exemplo de UDI em um dia típico, para cenário base e cenários otimizados.....	66
Figura 31 - Comparação dos mapas de iluminância, no bloco de salas de aula, para CB, C03 e C04.67	

Figura 32 – Exemplo de iluminância em um dia tipo, para cenário base e cenários otimizados.....	67
Figura 33 - Comparação dos resultados de Annual Glare, no bloco de salas de aula, para CB, C03 e C04.....	68
Figura 34 – Exemplo de Annual Glare em um dia típico, para o cenário base.....	68
Figura 35 – Comparativo entre demanda energética e geração fotovoltaica.	69
Figura 36 – Comparativo mensal.....	70
Figura 37 – Balanço Energético do cenário otimizado e do cenário base.	71
Figura 38 – Intensidade do uso de energia, segundo a plataforma de cálculo do CBS.....	72
Figura 39 – Diretrizes para sala de aula ZEB, em IES.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Panorama de políticas e metas dos países que mais contribuíram com os avanços de ZEB.	12
Tabela 2 - Painel de definições relacionadas à temática ZEB.....	23
Tabela 3 - Quadro de propriedades termofísicas dos materiais	44
Tabela 4 - Quadro de propriedades térmicas dos vidros	44
Tabela 5 - Quadro de cargas internas.....	45
Tabela 6 – Levantamento das estratégias bioclimáticas segundo a literatura.....	48
Tabela 7 – Resumo das configurações do algoritmo de otimização	50
Tabela 8 – Resumo das propriedades dos materiais.....	53
Tabela 9 – Dados de entrada da planilha de dimensionamento básico de sistemas fotovoltaicos	56
Tabela 10 - Cenários ótimos e suas variáveis	61
Tabela 11 - Cenários ótimos	63
Tabela 12 – Comparativo entre a geração de energia fotovoltaica fornecida pelo Design Builder e pela planilha de dimensionamentos básicos do MME.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	<i>American Society of Heating Refrigerating And Air-Conditioning Engineers</i>
BIPV	<i>Building integrated photovoltaics</i>
BSAN	Bloco de Salas de Aula Norte
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CO ₂	Dióxido de carbono
COP 26	26ª Conferência das Partes
EEP	Edificação de Energia Positiva
EERE	<i>Office of Energy Efficiency and Renewable Energy</i>
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
FS	Fator Solar
GBC	<i>Green Building Council</i>
GEE	Gases de efeito estufa
HVAC	<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IES	Instituição de ensino superior
INI-C	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
INI-R	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.
EUI	<i>Energy use intensity</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
NZEB	Edificação de Energia Quase Zero
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PAF	Percentual de abertura na fachada
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PBE Edifica	Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações
POC	Percentual de horas de conforto

PPI	Processo de Projeto Integrado
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia
RAH	Renovações de Ar por Hora
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SFV	Sistema Fotovoltaico
UDI	<i>Useful Daylight Illuminance</i>
UE	União Europeia
UnB	Universidade de Brasília
ZB	Zona Bioclimática
ZEB	Zero Energy Buildings

1. INTRODUÇÃO

No presente ano, mais de 55% da população mundial reside em cidades e estima-se que esse número possa aumentar para 68%, nos próximos 30 anos (CORREIA; AMORIM; SANTAMOURIS, 2024; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021). Essas áreas são responsáveis por dois terços do consumo de toda energia produzida no globo terrestre (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021).

Sob essa ótica, a área global de edificações cresceu mais de 31%, desde 2010, e chegou a 250 bilhões de metros quadrados. Entre os anos de 2021 e 2022, a área útil total dos edifícios aumentou em 2% e deve aumentar em 15% até 2030. As atividades de construção de edifícios nos anos 2022 e 2023, variaram em todo o mundo. Porém, estima-se que mais da metade dessas adições estão em regiões de climas quentes, cuja demanda por resfriamento está crescendo. Nesse âmbito, observa-se que o aumento na construção de edifícios é um impulsionador da demanda energética. (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2024).

Em um contexto nacional, o setor de edificações é responsável por consumir, aproximadamente, 50% da energia elétrica no país (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020). A energia consumida pelas edificações representa, não apenas as demandas operacionais e de manutenção, mas também o funcionamento de sistemas artificiais, que asseguram o conforto ambiental dos usuários, tais como iluminação, climatização e aquecimento de água. Diante disso, fica evidente o potencial de redução no consumo energético desse setor (SUDBRACK, 2017).

Segundo Schinazi e coautores (2018) o consumo de energia pode ser reduzido em 50%, em construções de edifícios projetados. Porém, o grande desafio é conciliar o seu atual modelo de produção e consumo com a exploração dos recursos naturais de forma mais sustentável (CRISTINO *et al.*, 2021), sem comprometer o desempenho da edificação e as necessidades de conforto dos usuário (CABEZA; CHÀFER, 2020).

A conservação dos recursos naturais, que inclui o uso eficiente de energia elétrica e a gestão ambiental em empreendimentos públicos e privados, passou a ocupar posição relevante nas políticas públicas dos organismos nacionais e internacionais, bem como nas pesquisas acadêmicas (SILVA *et al.*, 2019). Nesse contexto, a eficiência energética tem se consolidado como um tema central nas discussões sobre a demanda energética global e também em relação às fontes renováveis. Para Lamberts, Dutra e Pereira (2014) a eficiência energética em edificações caracteriza-se pela capacidade de fornecer serviços com baixa demanda energética,

por meio da otimização do uso e do consumo de energia. Esse processo é potencializado por meio da integração de fontes renováveis de energia, para assegurar o bom desempenho da edificação.

Diante disto, há diversas iniciativas de incentivo ao desenvolvimento sustentável. A Agenda 2030, por exemplo, com o objetivo de promover a eficiência energética, especifica 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, entre os quais existe o reconhecimento da transição energética para fontes renováveis e a mitigação de problemas relacionados ao clima (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO, [s. d.]). Com relação aos *campi* universitários, a implementação de medidas de eficiência energética podem contribuir para o 4º e o 7º objetivo do desenvolvimento sustentável (ODS) da Agenda 2030: “Educação de qualidade” e “energia limpa e acessível”, respectivamente (LEAL FILHO *et al.*, 2019; PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO, [s. d.]).

No que tange às IES, Silva e coautores (2019) argumentam que essas organizações são estratégicas, capazes de despertar na comunidade a importância do desenvolvimento sustentável e fomentar as transformações necessárias para este fim. Com relação ao consumo de energia, alguns autores (ABIDIN *et al.*, 2017; LEAL FILHO *et al.*, 2019; TSANTILI; KORONAKI; POLYDOROS, 2023) comparam os *campi* universitários a pequenas cidades, devido ao grande número de usuários, ao tamanho dos edifícios e à diversidade de funções que desempenham. Nesse sentido, a demanda energética elevada das IES (TSANTILI, KORONAKI, POLYDOROS, 2023) podem variar em função de fatores diversos como, por exemplo, o tipo de ensino, a área de ocupação, envoltória da edificação, entre outros (QUEVEDO; GERALDI; MELO, 2023). Contudo, Leal Filho e coautores (2019) destacam o potencial dos *campi* para atender às suas necessidades energéticas próprias, por meio da implementação de medidas de eficiência e de geração de energia renovável.

Sob essa ótica, os *Zero Energy Buildings* (ZEB) são uma estratégia promissora para a redução do consumo de energia. Os ZEBs são edificações autônomas com demandas energéticas reduzidas ao ponto de que seu abastecimento possa ser suprido por geração própria de energia, proveniente de fonte renovável (OHENE; CHAN; DARKO, 2022). Com esse intuito, a implementação de um ZEB deve seguir duas etapas. A primeira diz respeito à redução da demanda energética por meio da implementação de estratégias bioclimáticas e do uso de iluminação e equipamentos eficientes. Já a segunda refere-se a implementação de sistemas de geração de energia proveniente de fonte renovável (CABEZA; CHÀFER, 2020).

Este tipo de edificação pode reduzir os efeitos nocivos ao meio ambiente, além de contribuir para o cumprimento dos ODS da Agenda 2030. Além disso, as construções que

visam a eficiência energética podem reduzir entre 30% e 50% do seu consumo de energia (SCHINAZI *et al.*, 2018). Para tanto, o projeto de um edifício eficiente requer a otimização de cenários diversos a fim de encontrar a solução ideal (CABEZA; CHÀFER, 2020). Essa análise multiobjetivo pode ser feita com o auxílio de simulações computacionais de otimização, capazes de equacionar indicadores energéticos e de conforto (CORREIA; AMORIM; SANTAMOURIS, 2024).

Nesse contexto, justifica-se a necessidade de análises que tenham por objetivo traçar as diretrizes para novos projeto de edifícios eficientes, com balanço energético nulo ou até mesmo positivo. Esta dissertação traz preceitos para implementar sistemas ativos e passivos, capazes de reduzir os usos finais de energia de um edifício educacional, além de contribuir com a melhoria da qualidade do ambiente, ao proporcionar conforto térmico e visual para os espaços internos. Disseminar o conhecimento sobre esse tipo de construção, está em consonância com a tendência mundial de redução de impactos ao meio ambiente e pode, ainda, favorecer a realização de pesquisas futuras. Ademais, esta pesquisa está associada ao projeto de pesquisa “ZEB - *Zero Energy Brasília*”, desenvolvido pela Universidade de Brasília, com apoio da FAP-DF. Uma das metas desse projeto consiste em estimar possíveis reduções no consumo de energia e comprovar a eficiência de estratégias projetuais e tecnológicas para edifícios ZEB. Para tanto, adotou-se uma das edificações da Universidade de Brasília como objeto de estudo, devido ao seu potencial alto para replicabilidade dentro do *campus* e para a implementação de estratégias passivas de eficiência energética.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Determinar o impacto de diretrizes bioclimáticas para a obtenção de um ZEB por meio de uma otimização multiobjetivo, a partir de um edifício educacional existente, no *campus* Darcy Ribeiro, da Universidade de Brasília, localizado em Brasília-DF.

1.1.2. Objetivos específicos

- a. Estabelecer uma base teórica-conceitual aplicada às áreas temáticas e identificar os principais desafios no desenvolvimento de projetos ZEB, no contexto brasileiro;
- b. Analisar soluções ótimas de conforto térmico e lumínico de um edifício educacional, a partir do desenvolvimento de uma análise multicritério; e

c. Verificar a capacidade de um edifício educacional em fornecer um balanço energético nulo, a partir da análise de soluções de otimização.

1.2. Estrutura do trabalho

A presente pesquisa tem natureza aplicada e exploratória e baseia-se em um processo experimental ancorado em simulações computacionais (KAUARK; MEDEIROS; CARLOS HENRIQUE, 2010). Para tanto, esta dissertação divide-se em cinco capítulos (Figura 1).

No capítulo 1, INTRODUÇÃO, apresenta-se uma breve introdução do tema principal e sua relevância para esta pesquisa. Os objetivos da pesquisa e a estrutura do trabalho também são abordados neste capítulo.

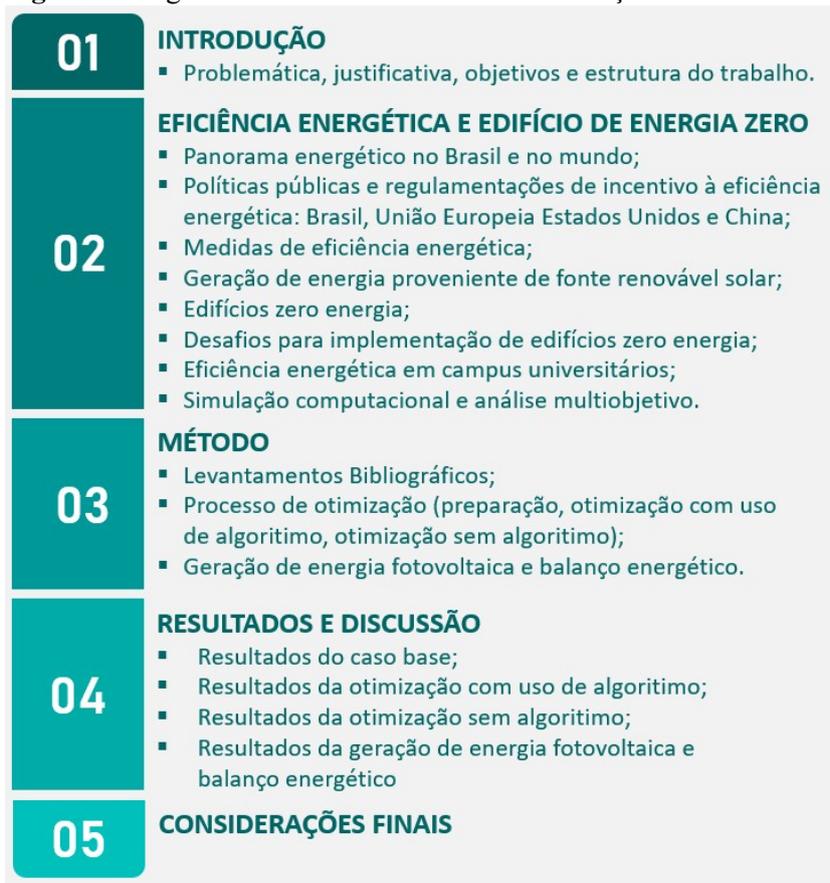
Já o capítulo 2, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO, traz a fundamentação teórica do trabalho. Discorre-se sobre temas referentes ao panorama energético no Brasil e no mundo, bem como as políticas públicas e regulamentações de incentivo à eficiência energética. Além disso, dentro da temática ZEB, apresentam-se as medidas de eficiência energética e os desafios para a implementação de um ZEB. As discussões quanto à aplicação de eficiência energética nos *campi* universitários e a utilização de simulações computacionais para o desenvolvimento de análises lumínicas e termoenergéticas da edificação também são abordados nessa parte do trabalho.

O capítulo 3, MÉTODO, detalha todas as etapas dessa pesquisa. Inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica com objetivos exploratórios inerentes ao cenário ZEB. Em sequência, foi desenvolvida a caracterização do objeto de estudo e do clima local. Com essas informações foi possível desenvolver o cenário base e os cenários hipotéticos do modelo computacional para que a otimização multiobjetivo, baseadas em simulações, pudesse acontecer. Na última etapa ocorre a simulação da geração de energia fotovoltaica e a análise do balanço energético da edificação.

Os RESULTADOS são apresentados no capítulo 4, onde os dados coletados serão expostos por meio de gráficos e imagens para auxiliar na compreensão das decorrências da otimização multiobjetivo e da análise do potencial ZEB. Os dados encontrados são discutidos com foco no conforto térmico e visual, bem como no resultado do balanço energético do BSAN.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as CONSIDERAÇÕES FINAIS desta dissertação. As principais contribuições, limitações de pesquisa e propostas para trabalhos futuros também são retratadas nesse capítulo.

Figura 1 - Digrama resumo da estrutura da dissertação



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO

A eficiência energética ocorre quando é possível assegurar conforto aos usuários, na prestação de serviços de qualidade e no uso da menor quantidade de recursos naturais (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Nesse sentido, Lamberts, Dutra e Pereira (2014, p.5) consideram que “a eficiência energética pode ser entendida como um atributo inerente à edificação representante do seu potencial em possibilitar conforto térmico, visual e acústico aos usuários com baixo consumo de energia”. Dessa forma, quando se unem conceitos de arquitetura bioclimática e eficiência energética, observa-se a oportunidade de minimizar os impactos ambientais e a energia consumida durante a construção e a operação de edifícios eficientes (KRÜGER; MORI, 2012).

Este capítulo aborda a temática das edificações de balanço energético nulo, incluindo subtemas relacionados às medidas de eficiência energética, aos *campi* universitários e às simulações computacionais. Além disso, também apresenta um breve panorama do consumo energético e das políticas públicas de incentivo à eficiência energética no Brasil e nas regiões mais influentes em ZEB, particularmente, a União Europeia, os Estados Unidos e a China.

2.1. Panorama energético no Brasil e no mundo

O consumo mundial de eletricidade aumentou significativamente na última década. Embora o aumento de energia proveniente de fontes renováveis tenha aumentando 41%, em 2019, os combustíveis fósseis ainda representaram 84% do consumo mundial de energia primária, segundo dados do mesmo ano. Nessa mesma data, o uso dessas fontes não-renováveis também foi responsável por 74% das emissões de GEE. No ano seguinte, o setor elétrico foi o responsável por 36% de todas as emissões relacionadas à energia (VALAVANIDIS, 2021).

Por outro lado, o carvão continua sendo a maior fonte de eletricidade do mundo e, conseqüentemente, o responsável por quase três quartos das emissões de dióxido de carbono do setor elétrico. Além disso, essa fonte de energia também foi responsável pela maioria das emissões de metano que, em 2020, equivaleram a 3,5 gigatoneladas de CO₂ (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021).

No que tange às edificações, quase um terço do consumo final total de energia foi atribuído a construções, com uma participação de 15% nas emissões diretas de CO₂, que pode chegar a 30% se forem consideradas as emissões indiretas de eletricidade (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021).

Nesse cenário, discute-se a necessidade de substituição da matriz energética que se baseia, majoritariamente, em combustíveis fósseis tais como petróleo, carvão e gás natural. A questão ambiental torna-se prioritária, bem como o uso diversificado de tecnologias de geração com baixas emissões de CO₂. Para isso, estima-se que os investimentos relacionados à transição de energia limpa sejam de US\$ 4 trilhões, anualmente, até 2030. Boa parte desses investimentos será realizado por desenvolvedores privados, consumidores e financiadores. Todavia, a expansão das fontes públicas de financiamento também será necessária (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021).

Em um contexto distinto da estrutura mundial, o Brasil se destaca por ser um país com alto percentual de fontes renováveis de energia, cuja participação na sua matriz energética manteve-se estável nos últimos 20 anos, com valores correspondentes a 40%, aproximadamente (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020). Diante dessa matriz, predominantemente renovável, a energia hidrelétrica se destaca com 53,4% da oferta interna. No entanto, o setor energético brasileiro possui a desvantagem de estar relacionado à vulnerabilidade das alterações climáticas, o que poderia justificar a queda de 8,6% da geração hídrica, em 2020 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

Assim, para assegurar sua posição de liderança no contexto da transição energética, seriam necessários investimentos da ordem de mais de 3,2 trilhões nos próximos 10 anos, dos quais quase R\$ 530 bilhões deveriam ser destinados para a geração e transmissão de energia elétrica, diante de um cenário de crescimento econômico estimado de 2,9% ao ano (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022). Todavia, o que se observa são investimentos em fontes combustíveis fósseis, sobretudo, em termelétricas.

Sob essa ótica, pode-se apontar como uma estratégia de curto prazo, tomada pelo Governo brasileiro e adotada em virtude da urgência, a instalação de um elevado número de termelétricas de combustíveis fósseis que permaneceram ligadas por quase dois anos, ininterruptamente. Como resultado, houve aumento no uso de combustíveis fósseis da

matriz energética brasileira (FERREIRA; SANTANA; RAPINI, 2021). Outro exemplo da adoção de estratégias de curto-prazo para solucionar problemas de energia ocorreu no estado do Amapá, em 2020. Naquele ano, uma crise de natureza socioeconômica gerada pela pandemia da Covid-19 conduziu à instalação de duas termelétricas.

Nesse cenário, uma premissa para o desenvolvimento e para a segurança do setor elétrico é a diversificação da matriz energética nacional e dos sistemas de geração. Além disso, é necessário buscar soluções técnicas e o uso dos recursos naturais de forma equilibrada para assegurar a sustentabilidade do fornecimento de energia no país.

2.2. Políticas públicas e regulamentações de incentivo à eficiência energética: Brasil, União Europeia, Estados Unidos e China¹

Segundo Ruiz, Jimenez e Carvajal (2022), o sucesso dos ZEBs depende das diretrizes que os países integram em seus governos, por meio de normas e regulamentos. Nesse contexto, essa parte da presente pesquisa se concentra em apresentar as políticas e regulamentações energéticas para o Brasil e para algumas das regiões que mais contribuíram com os avanços de ZEBs nos últimos anos, particularmente, a União Europeia (UE), os Estados Unidos (EUA) e a China (Tabela 1).

2.2.1. Contexto internacional: Estados Unidos, União Europeia e China

Em um contexto internacional, observa-se que a UE apresenta um grande conjunto de metas para garantir o aumento da eficiência no parque imobiliário da Europa (MATA *et al.*, 2020). Entre eles, destaca-se a Diretiva 2010/31/EU, cujo objetivo consiste em promover o avanço do desempenho energético dos edifícios. Essa normativa estabeleceu que, a partir de 2021, todos os edifícios novos deveriam ter necessidades quase nulas de energia (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Para Mata e coautores (2020), a Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios, de 2018, é a principal ferramenta política da UE, uma vez que complementa a Diretiva 2010/31/EU e estabelece uma meta de redução de 40% dos Gases de Efeito Estufa (GEE), até 2030, e entre 80% e 95%, até 2050 (EUROPEAN COMMISSION,

¹ Este tópico, que trata sobre políticas públicas e regulamentações de incentivo à eficiência energética, foi extraído do artigo, derivado desta dissertação, intitulado “Do paradigma internacional aos desafios de implementação dos Zero Energy Buildings no Brasil”, publicado pela autora no encontro latino-americano de conforto e ambiente construído – ENCAC (ANGUETH *et al.*, 2023).

2018). Ademais, a maioria dos Estados-Membros da UE apresenta regulamentos implementados a nível nacional, que seguem as orientações da Comissão Europeia e das diretivas locais.

Nos EUA, a Lei de Independência e Segurança Energética foi outorgada em 2007 e estabeleceu que todos os edifícios comerciais deveriam ter energia zero até 2050. Outro ponto relevante é o *Planning for Federal Sustainability in the Next Decade*, uma ordem presidencial de 2015 que determinou que, a partir de 2020, todos os novos edifícios governamentais deveriam ser projetados para alcançar energia líquida zero (MATA *et al.*, 2020; PANAGIOTIDOU; FULLER, 2013; UNITED STATES OF AMERICA, 2015).

Além das metas governamentais americanas, os códigos e padrões desempenham um papel importante para o estabelecimento de requisitos mínimos para projetos e construções com foco em eficiência energética (WANG *et al.*, 2021). Nesse sentido, destaca-se o *Zero Code 2.0*, cujo objetivo é estabelecer requisitos mínimos de eficiência energética de edifícios e exigir sistemas de energia renovável, visando a redução das emissões de carbono. Porém, outros padrões, com nível de exigência maior ou igual, podem ser adotados igualmente, como é o caso do Padrão ASHRAE 90.1-2016² e do *International Energy Conservation Code*³ 2021 (CHARLES ELEY, 2020; WANG *et al.*, 2021).

Os EUA também dispõem de planos e normativas em nível estadual, principalmente em relação aos códigos de construção, que possuem maior agilidade para decretar planos mais sustentáveis e políticas de ZEB dentro de suas jurisdições. A cidade de Los Angeles, por exemplo, lançou o *Green New Deal*, um plano que, entre outras facetas, exige que todos os edifícios novos e existentes sejam de emissão de carbono zero até 2050 (MATA *et al.*, 2020).

Outro país com grande potencial de implementação de projetos e construções ZEBs, em larga escala, é a China. Entre os anos de 2000 e 2015, devido ao crescimento anual do PIB, a China se tornou o maior consumidor de energia do mundo e, conseqüentemente, o maior emissor de carbono (YUAN *et al.*, 2017). Assim, torna-se inevitável a busca pelo equilíbrio entre a demanda energética e as melhorias de conforto no ambiente construído. Em 2019, foi apresentada a nova versão do *Technical Standard*

² A ASHRAE 90.1-2016 é a base para os códigos de construção. Apresenta os requisitos mínimos de eficiência energética para edifícios comerciais (WANG *et al.*, 2021).

³ *International Energy Conservation Code 2021* é um código que apresenta requisitos mínimos de desempenho para edifícios energeticamente eficientes (ICC, 2022).

for Nearly Zero Energy Buildings (GB/T 51350-2019). Esse documento propôs para o país que 30% dos novos edifícios fossem de energia ultrabaixa, 30% dos edifícios antigos fossem remodelados para atingir energia ultrabaixa e que o abastecimento de 30% de todos os edifícios fosse proveniente de fontes renováveis (LUO *et al.*, 2020). Além disso, as diferentes zonas climáticas desse país contribuem para que o desenvolvimento de tecnologias de eficiência energética atenda a diferentes demandas (CAO; DAI; LIU, 2016).

Ademais, a China possui várias autoridades governamentais responsáveis pela supervisão e gestão das atividades de conservação de energia, que se complementam, para promover a eficiência energética das edificações, de acordo com as responsabilidades delegadas pelo Conselho de Estado. Entre esses órgãos, destacam-se o *National Development and Reform Commission* (NDRC), responsável pela conservação de energia e o *Ministry of Housing and Urban-Rural Development* (MOHURD), que atua na gestão da construção civil (YUAN *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2021). Enquanto as leis especificam os requisitos de desempenho energético, a partir de aspectos relacionados à construção, seleção de materiais e implementação de energias renováveis, os regulamentos apresentam conteúdos mais específicos e atuam como complementos das leis nacionais (YUAN *et al.*, 2017).

Sob a ótica das políticas públicas, observa-se a influência do contexto internacional no Brasil, a medida em que incentiva a criação de diretrizes e padrões relacionados à eficiência energética na construção civil: um terreno fértil para o desenvolvimento dos *zero energy buildings*.

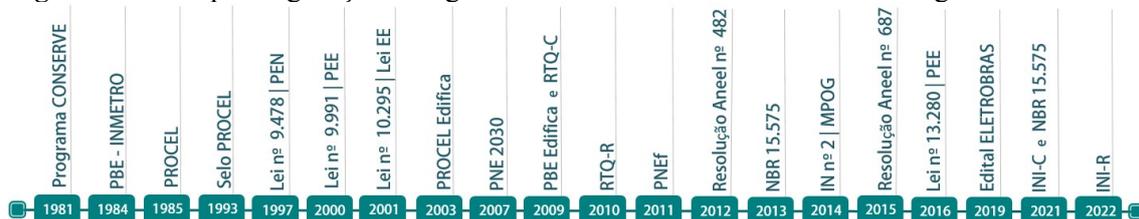
2.2.2. Contexto brasileiro

Assim como nos países desenvolvidos, a demanda de energia, no Brasil, cresce proporcionalmente ao desenvolvimento econômico e ao surgimento de novas tecnologias (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Em 2020, houve um aumento de 4,6% no consumo total de energia no país (EPE, 2022). Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2022), 44% da energia gerada no território nacional é consumida por edifícios, sendo que o setor residencial corresponde a 10,9%, o industrial a 32,2% e o de serviços a 4,8%.

No que diz respeito às políticas e regulamentações nacionais, o Brasil apresentou, nos últimos anos, um conjunto de normativas, ações e programas relacionados à eficiência energética (Figura 2). Entre elas destaca-se o Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações (PBE Edifica) e as nova Instruções Normativas

Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, e Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-R e INI-C).

Figura 2 - Principais legislações e regulamentos de incentivo à eficiência energética no Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), deu início às discussões sobre programas de avaliação de desempenho, com foco no uso racional de energia no Brasil. Seu objetivo consiste em informar aos consumidores brasileiros, por meio de uma Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), o nível de consumo dos equipamentos elétricos. Essas etiquetas classificam os produtos do mais eficiente para o menos eficiente. Atualmente, o PBE é composto por quarenta Programas de Avaliação da Conformidade, cuja etiquetagem abrange desde produtos até edificações. Entre esses procedimentos, destaca-se o Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações (PBE Edifica), criado em 2009. Seu objetivo é avaliar a eficiência energética de edificações e, em parceria com o Inmetro, atribuir a etiqueta PBE Edifica (PROCEL, 2020).

Nesse mesmo ano, o processo de etiquetagem para edificações comerciais, de serviços e públicos foi oficializado com a publicação do RTQ-C. Porém, somente no ano seguinte, em 2010, foi publicado o RTQ-R com uma metodologia distinta para edifícios residenciais. Em ambos os regulamentos, as edificações são classificadas em uma escala que varia de “A” (maior eficiência) até “E” (menor eficiência) (CARDOSO, 2015; LABEEE, 2022; MME, 2011; PROCEL, 2006). No entanto, após às constatações de limitações do RTQ-C e o RTQ-R, o Inmetro aprovou o INI-C e o INI-R, nos anos de 2021 e 2022, respectivamente (INMETRO, 2022; PROCEL, 2020).

Com relação aos ZEBs, o Brasil apresenta normativas pouco expressivas. No entanto, a INI-C e a INI-R avaliam o consumo de energia térmica e elétrica da edificação, bem como a geração de energia local proveniente de fonte renovável (PACHECO; FOSSATI, 2020), o que favorece o desenvolvimento de edificações com baixo ou zero consumo de energia.

Nesse sentido, a *Green Building Council* Brasil (GBC) lançou, em 2017, a certificação *GBC Zero Energy*, cujo objetivo é garantir o cumprimento das metas da 21ª Conferência das Partes (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES; SECRETARIA DE POLÍTICAS E PROGRAMAS DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO, 2008), acelerar a transformação do mercado nacional de eficiência energética e a geração de fontes renováveis, além de desenvolver novas tecnologias e promover ambientes saudáveis (GBC BRASIL, 2023a). Até o primeiro semestre de 2023, havia 21 projetos com essa certificação no país (GBC BRASIL, 2023b).

Outro marco relevante para os ZEBs no país foi lançado, pela Eletrobrás, em 2019: a chamada pública PROCEL Edifica – NZEB Brasil, para a seleção de projetos de edificações. O objetivo desse edital é a construção ou *retrofit* de quatro NZEBs em território nacional, além de fomentar o conhecimento, estudo e desenvolvimento de projetos dessa natureza (ELETROBRAS, 2019).

Tabela 1 - Panorama de políticas e metas dos países que mais contribuíram com os avanços de ZEB.

POLÍTICAS E METAS PARA ZEB												
LOCAL	BRASIL			UNIÃO EUROPEIA			ESTADOS UNIDOS			CHINA		
ANO	2021			2010	2012	2016	2018	2016	2018	2019	2015	2013
NORMAS, DIRETRIZES E PADRÕES	NBR 15575	INI-C/ NI-R	Procedimentos do PEE	Diretiva 2010/31/EU	Reg. Delegado N° 244/2012/EU (Complementa a Diretiva 2010/31/EU)	Recomendação N° 2016/1318/EU	Diretiva 2018/844/EU (Altera a Diretiva 2010/31/EU)	ASHRAE 90.1-2016	ZERO CODE (ASHRAE 90.1 e outros padrões)	Norma Técnica para Edifícios de Energia Quase Zero (GB/T51350-2019)	Diretrizes para Edifícios passivos de energia ultrabaixa (MOHURD)	Plano de Ação para Edifícios Verdes (NDRC)
DESEMPENHO	✓	✓						✓	✓	✓		
METAS				✓		✓	✓				✓	✓
CONCEITO ZEB		✓		✓		✓			✓	✓	✓	
FERRAMENTAS DE CÁLCULO	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓		
CUSTO-BENEFÍCIO			✓	✓	✓	✓						

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

2.3. Medidas de eficiência energética

A eficiência energética refere-se à quantidade máxima de serviços que pode ser adquirida com um consumo reduzido de energia (GUPTA; ANAND; GUPTA, 2017). Para alguns autores (HÄCKEL; PFOSSER; TRÄNKLER, 2017; KALANGOS, 2017; ROHDIN; THOLLANDER; SOLDING, 2007), essa temática se tornou o centro de várias políticas em todo o mundo, por ser a forma mais acessível de mitigar o aquecimento global e de preservar os recursos naturais, sem comprometer o desempenho econômico. A partir da década de 1980, na sequência da crise do petróleo, a eficiência energética em

edificações consolidou-se com uma vertente promissora de investigação, expressa pela ampliação da literatura sobre o assunto (COPIELLO, 2021).

Enquanto o foco de alguns pesquisadores, ao projetar edificações eficientes, consiste em assegurar conforto para os usuários, obter economia de energia, reduzir os custos e as emissões de GEE, outros priorizam o uso de inovações tecnológicas para alcançar a sustentabilidade e o alto desempenho energético das edificações (HARKOUSS; FARDOUN; BIWOLE, 2018). Uma edificação ZEB, por sua vez, deve ser concebida dentro de uma perspectiva holística e priorizar o alcance do balanço energético nulo, enquanto proporciona conforto para os usuários.

D'amanzo, Mercado e Karlen (2020) classificam um ZEB como um edifício de alta performance que explora, ao máximo, as estratégias passivas e as tecnologias de alto desempenho. Nesse sentido, medidas de eficiência energética são aquelas que permitem a redução do consumo de energia mas, para isso, é preciso focar na otimização das soluções passivas envolvidas no processo (BELUSSI *et al.*, 2019).

Um projeto com baixo consumo de energia se inicia, portanto, com a compreensão do edifício: suas necessidades de conforto e o estudo das condicionantes ambientais. Por isso, é importante conhecer a demanda energética da edificação, para encontrar a melhor forma de reduzi-la e inserir o melhor sistema de geração de energia renovável. Nesse contexto, as estratégias passivas devem ser desenvolvidas com foco no máximo aproveitamento dos recursos naturais. Isso inclui condições de conforto térmico e luminoso. Além disso, as medidas de eficiência energética também estão relacionadas ao comportamento do usuário e às diretrizes de projeto, bem como ao uso de tecnologias e equipamentos eficientes. (RODRIGUEZ-UBINAS *et al.*, 2014; SOULEY AGBODJAN *et al.*, 2022).

2.3.1. Estratégias passivas de arquitetura bioclimática

A integração de técnicas passivas constitui um dos principais objetivos de um projeto ZEB, uma vez que influencia diretamente na iluminação e no equilíbrio térmico dos ambientes, além de fomentar a redução da demanda energética dos sistemas prediais (ABUGRAIN; ALIBABA, 2017).

Em um contexto nacional, Costa, Amorim e Silva (2020) identificaram estratégias importantes para a eficiência energética na cidade de Brasília - DF, como por exemplo, forma do edifício, a inércia térmica da envoltória, o sombreamento das janelas, a relação entre janelas e paredes (ou percentual de abertura das fachadas), o fator solar do

vidro e a ventilação natural. Essas estratégias atuam, especialmente, na envoltória do edifício e são descritas como de fundamental importância para a economia de energia, pois influenciam, diretamente, nos níveis de conforto térmico da edificação (CAO; DAI; LIU, 2016).

A forma do edifício pode ser uma das estratégias determinantes para o conforto, uma vez que define as áreas de fachada e de telhado que estarão expostas à radiação solar e, conseqüentemente, às trocas térmicas. Por isso, o índice de compactidade e o fator forma também influenciam no resfriamento da edificação (PACHECO; ORDÓNEZ; MARTÍNEZ, 2012). A compactidade é a razão entre o volume e a superfície do edifício e está relacionada à capacidade da fachada de armazenar ou perder calor. Já o fator de forma, é a razão entre a área da envoltória e o volume total da edificação. Esse indicador representa as proporções da edificação .

A massa térmica da edificação tem sido analisada, desde os primeiros estudos de Givoni⁴, como uma estratégia para reduzir a temperatura diurna. (LI, Danny H W; YANG; LAM, 2013). Nesse sentido, os valores de transmitância térmica⁵ podem influenciar significativamente os níveis de consumo de energia, pois atuam na redução de perda/ganho de calor (CAO; DAI; LIU, 2016). Além disso, também acredita-se deve haver uma integração com a ventilação noturna. Segundo Artmann, Manz e Heiselberg (2007), esta estratégia se mostrou eficaz em reduzir as temperaturas internas no verão.

Nesse sentido, vários autores concordam que a ventilação é uma das melhores formas de reduzir as temperaturas internas e o consumo energético (BELUSSI *et al.*, 2019; LOHWANITCHAI, JAREEMIT, 2021; SOULEY AGBODJAN *et al.*, 2022; WEERASURIYA *et al.*, 2019). Em climas quentes e úmidos, a ventilação natural melhora consideravelmente a sensação de conforto dos usuários (MARTÍNEZ; PACHECO; ORDÓ, 2012). Porém, nesse caso, é necessário considerar dispositivos de sombreamento, bem como o tamanho das janelas (ZHOU *et al.*, 2014).

⁴ Baruch Givoni concebeu a "*Building Bioclimatic Chart*", em 1969, para corrigir as limitações carta bioclimática de Olgay (1963). Na década de sessenta, V. Olgay e A. Olgay publicaram o "*Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*", onde o estudo da bioclimatologia na arquitetura está relacionado com o conforto térmico humano e criaram a expressão "projeto bioclimático". (BOGO *et al.*, 1994).

⁵ A transmitância térmica é "a transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo; neste caso, dos vidros e dos componentes opacos das paredes externas e coberturas, incluindo as resistências superficiais interna e externa, induzida pela diferença de temperatura entre dois ambientes" (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a).

Os sistemas de sombreamento solar representam uma das estratégias bioclimáticas mais importantes em fachadas de edifícios, particularmente, em regiões tropicais. Esses componentes construtivos possibilitam o controle das condições térmicas e visuais dos espaços internos, enquanto influenciam, conseqüentemente, suas demandas energéticas (AL-MASRANI et al., 2018).

Outra opção para redução dos ganhos de calor pela envoltória é a redução da relação entre janela e parede (GUO; BART, 2020; LOHWANITCHAI; JAREEMIT, 2021). Segundo Feng e coautores (2019), uma relação adequada entre aberturas e parede traz benefícios tanto para a ventilação quanto para a iluminação natural, particularmente, em climas quente e úmidos. O envidraçamento excessivo, por outro lado, pode ocasionar ganho extra de calor e aumento do consumo de energia de resfriamento.

Com relação aos ZEB, o *U.S. Energy Department Office* destaca algumas técnicas de arquitetura passiva como, por exemplo, a massa térmica, aberturas, sombreamento, orientação predial, entre outros (U.S. ENERGY DEPARTMENT OFFICE, 2022). No entanto, a aplicação de ZEBs em climas quentes tem sido pouco explorada, particularmente no Brasil (MASTER; AMORIM; SILVA, 2020). Dos 30 estudos de caso listados no mapa Task-40, da Agência Internacional de Energia, apenas três casos de estavam localizados em climas dominados pelo arrefecimento (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014). Por isso, é importante a identificação das variáveis arquitetônicas relevantes para atingir o balanço energético nulo, de forma que seja viável aplicar este conceito a edifícios não residenciais, dentro do contexto brasileiro (MASTER; AMORIM; SILVA, 2020).

2.3.2. Estratégias ativas para melhorar a eficiência energética

Estratégias ativas de projeto incluem instalações e equipamentos eficientes, bem como sistemas de gestão e automação predial (SUN; GOU; LAU, 2018). A combinação adequada dessas técnicas pode trazer ganhos em eficiência energética. Além disso, as novas tecnologias estão se tornando parte integrante dos edifícios e existe, ainda, uma tendência de que os custos com esses recursos sejam reduzidos nos próximos anos (AGOSTINO; PARKER, 2020).

Entre as instalações de serviços prediais, os sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC, siga em inglês), bem como os de iluminação elétrica são os maiores consumidores de energia em edifícios, principalmente os não residenciais (LI et al., 2013). No Brasil estima-se que a demanda por condicionadores de ar continue

aumentando nas próximas décadas, cujo crescimento pode chegar a 5,4% ao ano e atingir 48 TWh, em 2035. Por outro lado, caso sejam implementados índices rigorosos de eficiência, a estimativa é que o consumo fique em torno de 15 TWh, no mesmo horizonte de tempo (EPE, 2018).

O sistema de iluminação é o segundo maior consumidor de energia em edifícios comerciais, públicos e de serviços (GIARETTA, 2022). Considera-se imprescindível que os níveis de iluminância ideais sejam mantidos, de acordo com a necessidade de cada ambiente. Nesse sentido, as lâmpadas LED são a tecnologia mais eficiente no que diz respeito aos aspectos de potência da iluminação (BELUSSI *et al.*, 2019a).

Feng e coautores (2019), em seu estudo de revisão sobre estratégias de projeto NZEB, identificaram 23 casos nos quais o uso de LED foi implementado para melhorar a eficiência do sistema de iluminação artificial. Ao substituir lâmpadas fluorescentes por LED, Alazazmeh e Asif (2021) encontraram uma redução de 7% no consumo de energia de um edifício comercial. Já Sun, Gou e Lau (2018) constataram que a iluminação eficiente é a estratégia ativa mais econômica em edifícios de escritórios ZEB, uma vez que foi possível economizar 40% de energia ao trocar lâmpadas fluorescentes T5 por LED.

Além disso, um projeto de iluminação eficiente, desenvolvido em conjunto com dispositivos de sombreamento, pode ampliar o desempenho energético e a melhoria do conforto térmico e visual em um ZEB (FENG *et al.*, 2019). Esses dispositivos podem gerenciar a radiação solar e minimizar os ganhos de calor durante o dia (AL-MASRANI *et al.*, 2018).

No que tange a conservação de energia, vários estudos de caso sobre ZEB adotam dois dos princípios publicados pela *American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE): equipamentos mais eficientes e sistemas de controle (FENG *et al.*, 2019). O primeiro caso diz respeito à compra de equipamentos de baixo consumo como, por exemplo, produtos com o Selo PROCEL (PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2006) ou o *Energy Star* (ENERGY STAR, [s. d.]). Já o segundo princípio abrange o uso de controles inteligentes, gerenciadores de energia e sensores de tempo e ocupação (FENG *et al.*, (2019), Além disso, os sistemas de controle também permitem a coleta de dados para cálculos de desempenho e modelagem de simulação (ANNUNZIATA; FREY; RIZZI, 2013).

Nessa perspectiva, os sistemas de automação predial (SAP) em conjunto com os sistemas de controle tornam-se fundamentais para atingir a meta de energia zero. Os SAP

podem ser aplicados para o gerenciamento e controle de diferentes serviços como, por exemplo, HVAC, aquecimento de água, iluminação e sombreamento, geração de energia, comunicação, segurança, armazenamento de dados, entre outros. Além disso, o sistema de gerenciamento de energia de edifícios representa um outro tipo de solução, cuja estrutura permite conexões com o espaço, por meio do uso de sensores que detectam as variáveis externas e gerenciadores que modificam as condições do ambiente construído (BELUSSI *et al.*, 2019a).

2.4. Geração de energia proveniente de fonte renovável solar

Atualmente, a energia solar é a fonte energética renovável mais acessível, seguida da energia eólica e da biomassa (WU; SKYE, 2021). Nesse contexto, a integração de sistemas fotovoltaicos em edifícios é uma estratégia que está alinhada aos critérios internacionais de sustentabilidade, na busca por eficiência energética (CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN; SÁNCHEZ, 2012).

No Brasil, apesar da alta disponibilidade de irradiação solar, a utilização de energia solar fotovoltaica ainda é incipiente (CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN; SÁNCHEZ, 2012). Porém, na última década, houve um crescimento exponencial da capacidade fotovoltaica. Esse progresso foi impulsionado, em grande parte, pela melhoria da eficiência das células e dos módulos, pela redução nos custos de fabricação e pelo seu baixo custo em relação às outras fontes (WILSON *et al.*, 2020).

Dentro do contexto legal brasileiro, a Resolução ANEEL n.482/2012 fomentou a geração fotovoltaica quando estabeleceu que o consumidor poderia produzir sua própria energia elétrica, por meio de um sistema de compensação (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015). Esse sistema de compensação consiste no empréstimo gratuito da energia gerada por um consumidor à rede do distribuidor local, o qual é compensado pelo consumo subsequente da energia ativa dessa mesma rede. Isso pode ocorrer no mesmo ponto de geração ou em outra localidade pertencente ao mesmo consumidor. A cobrança da energia elétrica é realizada com base na diferença entre a energia consumida e a injetada, considerando-se o período de tarifação. Além disso, uma das inovações desse regulamento é permitir que a geração distribuída seja realizada para unidades de consumo múltiplo, como condomínios e cooperativas (CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN, 2020).

As principais tecnologias aplicadas na produção de células fotovoltaicas são classificadas em três gerações. A primeira, corresponde a 85% do mercado. É constituída de silício e pode ser dividida monocristalino e policristalino. A segunda geração,

caracterizada por películas finas aplicadas sobre substratos rígidos, apresenta maior eficiência que a primeira, porém, uma participação mais modesta no mercado. Por fim, a terceira geração ainda se encontra em fase de pesquisa e desenvolvimento, mas com o objetivo de alcançar altos níveis de eficiência e menores custos de produção (PINHO; GALDINO, 2014).

O conjunto de células fotovoltaicas forma um módulo, também conhecido como placa solar ou painel fotovoltaico (SILVA, 2015). Esses módulos podem ser agrupados em sistemas que são, geralmente, classificados de acordo com a sua relação com a rede de distribuição, da seguinte forma (PINHO; GALDINO, 2014):

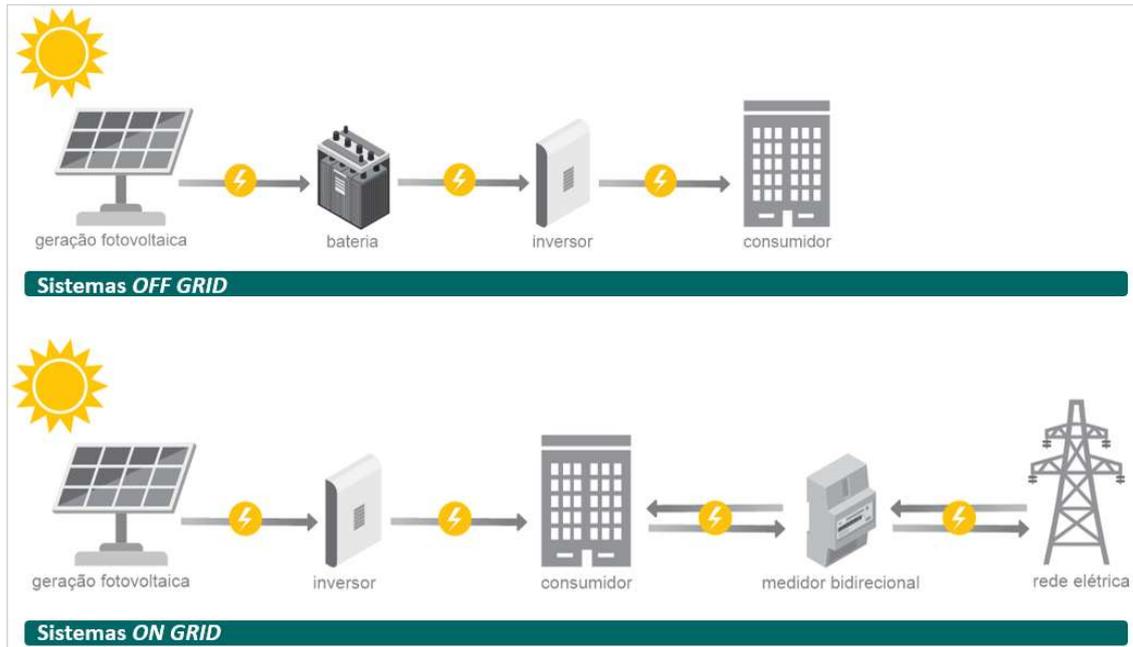
a. Sistemas isolados da rede (*off grid*): Ocorre em locais isolados, que não são atendidos pela rede geral de distribuição elétrica. Esse tipo de sistema opera de forma autônoma, sem integração com a rede pública e, por isso, geralmente possuem algum sistema de armazenamento de energia (PINHO; GALDINO, 2014).

b. Sistemas conectados à rede (*on grid*): Ocorre quando o imóvel está conectado à rede pública de distribuição de energia elétrica. A energia produzida pelo sistema é utilizada pelo próprio imóvel. O excedente é entregue à concessionária e devolvido na forma de créditos ao consumidor. Por outro lado, nos dias em que a produção de energia for insuficiente, o imóvel será abastecido pela rede elétrica (PINHO; GALDINO, 2014).

O sistema fotovoltaico é composto pelo agrupamento dos módulos, por um inversor, por componentes elétricos, de proteção e, se necessários, por um sistema de armazenamento. Esses módulos podem ser ligados em série, em paralelo ou utilizando ambas as configurações, para obter a corrente e a tensão necessária para determinado fim. A partir disso, o inversor transforma a corrente contínua produzida pelos módulos em corrente alternada para ser consumida pelo imóvel ou injetada na rede elétrica. No caso dos sistemas *off grid* (Figura 4), são utilizados acumuladores ou baterias, devido à necessidade de armazenamento da energia para o consumo nos horários em que a geração não é possível. Já no sistema *on grid* (Figura 4), a energia gerada, que não é consumida instantaneamente, passa por um medidor bidirecional antes de chegar à rede elétrica. Esse equipamento mede o consumo de energia elétrica fornecida pela concessionária e registra o excedente gerado pelo sistema fotovoltaico. Assim, o imóvel obtém a energia gerada pelo sistema fotovoltaico de forma que a rede pública recebe, apenas, o excedente ao seu consumo. Com isso, a diferença entre a energia consumida e a energia injetada na rede pode ser calculada e convertida em créditos na conta de luz do consumidor. No entanto,

caso a energia gerada não seja suficiente para suprir o consumo, a rede pública fará o fornecimento da energia complementar que será registrada pelo medidor bidirecional.

Figura 3 - Composição dos sistemas fotovoltaicos *off grid* e *on grid*



Fonte: Elaborado pela autora.

Nesse cenário, Cronemberger, Caamaño-Martín e Sánchez (2012) afirmam que o maior objetivo de um sistema fotovoltaico é maximizar a irradiância solar disponível, ao passo que previne ou reduz as perdas devido ao sombreamento, temperatura da célula, acúmulo de sujeira dos módulos, entre outros. Essa questão pode ser definida pela localização geográfica, bem como pela orientação e ângulos de inclinação dos módulos fotovoltaicos. Contudo, em áreas urbanas, nem sempre são possíveis os melhores ângulos de inclinação e orientação. Isso ocorre devido a fatores que precisam ser gerenciados durante o projeto como, por exemplo, condições do lote, regulamentos urbanos, forma e função do edifício, sistemas construtivos ou materiais disponíveis.

Com relação ao ângulo de inclinação, existem várias referências na literatura quanto a definição de um ângulo ótimo. A recomendação mais comum é orientar os módulos em direção ao Equador (Norte no hemisfério Sul) e inclinar a superfície em angulação igual à latitude local (CORREIA, 2024; GUNERHAN; HEPBASLI, 2007; CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN, 2020). Porém, Cronemberger, Caamaño-Martín e Sánchez (2012) em seu estudo que analisou aproveitamento do potencial de irradiação solar em diversas cidades brasileiras, argumentam que o Brasil possui boa disponibilidade de irradiação solar em uma ampla gama de orientações e inclinações.

Além disso, este recurso solar será sempre potencialmente igual ou maior que 89%⁶, para um intervalo de inclinações em qualquer uma das latitudes verificadas, quando os módulos estiverem orientados para o Norte.

Já no que diz respeito aos ZEBs, a energia solar fotovoltaica é a tecnologia de energia renovável mais comumente adotada (FENG *et al.*, 2019; JAYSAWAL *et al.*, 2022). Além disso, a adoção de painéis fotovoltaicos, tanto na cobertura quanto nas fachadas do edifício, pode ser considerada uma solução para a demanda energética dos edifícios. (LOHWANITCHAI, JAREEMIT, 2021; MANSUELO *et al.*, 2021).

2.5. *Zero Energy Buildings*

Entre as soluções estudadas para reduzir a demanda de energia no setor da construção civil, destaca-se o propósito de atingir níveis de energia zero ou quase zero (CONTI; SCHITO; TESTI, 2019). Assim, o conceito *Zero Energy Building* (ZEB) pode ser entendido, de forma geral, como um edifício cuja demanda de energia foi reduzida, tanto quanto possível, para que a energia renovável produzida consiga proporcionar um equilíbrio energético entre geração e consumo (LOHWANITCHAI, JAREEMIT, 2021). Nesse contexto, energia fornecida deve ser igual ou superior à energia consumida, ao longo de um ano (YEGANEH *et al.*, 2021).

Alguns autores afirmam que o conceito de ZEB surgiu em meados do século XX. No entanto, estima-se que o primeiro artigo sobre esse assunto seja da década de 70, quando uma casa de energia zero foi estudada. Nessa época, a crise do petróleo fomentou a discussão sobre o uso da energia e de combustíveis fósseis e deu início a trabalhos focados em tecnologias de eficiência energética. (MARSZAL; HEISELBERG, 2009; OHENE; CHAN; DARKO, 2022; ZHANG *et al.*, 2021). Dessa forma, vários outros estudos surgiram, com o passar dos anos, trazendo definições (Tabela 2), métodos, tecnologias e diretrizes sobre ZEB (OHENE; CHAN; DARKO, 2022).

Os conceitos ligados aos ZEB foram estabelecidos de acordo com diferentes objetivos e podem ter mais afinidade com projetistas, proprietários ou organizações (D'AGOSTINO; MAZZARELLA, 2019). Contudo, representam, em comum, um

⁶ Com relação à proporção da quantidade de irradiação, considera-se “ótimo” aproveitar a partir de 90% da irradiação anual, e “muito bom” entre 80% e 90% (CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN; SÁNCHEZ, 2012).

direcionamento positivo quanto à redução dos impactos ambientais e à conservação de recursos não-renováveis (ASHRAE, 2008).

Com base nos tipos de fornecimento e nas formas de uso da energia, os ZEBs podem ser classificados em (AHMED *et al.*, 2022):

a. *Net zero site energy building*: Um edifício que produz, para cada unidade de energia consumida, uma unidade de energia renovável.

b. *Net zero source energy building*: Este edifício também produz uma unidade de energia renovável para cada unidade de energia consumida, porém a geração de energia é quantificada na fonte. A vantagem, sobre a primeira classificação, é que esta considera a energia que pode ser perdida ou desperdiçada durante a geração ou distribuição.

c. *Net zero energy emissions*: Um edifício que produz energia livre de emissões de CO₂, ao passo que consome energia produtora de emissões.

d. *Net zero energy costs*: Um edifício que gera zero contas de serviços públicos para o proprietário. No entanto, os custos com manutenção podem inviabilizar esse tipo de projeto.

De acordo com Ahmed e coautores (2022), existem três maneiras básicas para alcançar um balanço energético nulo (Figura 3). Inicialmente, deve-se reduzir o consumo de energia (estratégias passivas) e melhorar a eficiência energética dos sistemas e equipamentos (estratégias ativas). Posteriormente, deve-se adotar a geração de energia limpa para suprir a demanda de energia elétrica do edifício, a fim de atingir o balanço energético nulo. Tais medidas já foram amplamente debatidas na literatura, inclusive com uma abordagem mais detalhada (ANDRI; KOC; AL-GHAMDI, 2019; CAO; DAI; LIU, 2016; COSTA; AMORIM; SILVA, 2020; D'AMANZO; MERCADO; KARLEN, 2020; GUPTA; ANAND; GUPTA, 2017; HARKOUSS; FARDOUN; BIWOLE, 2018; LI; YANG; LAM, 2013; LIU; REN, 2018 e MANSUELO *et al.*, 2021).

No cenário brasileiro, Pacheco e Lamberts (2013) recomendam que o Brasil crie suas próprias estratégias ZEB, uma vez que as condições climáticas, culturais e econômicas do país são muito complexas e variadas. Além disso, as características e peculiaridades brasileiras diferem dos países desenvolvidos e, por isso, forçam o desenvolvimento de novos modelos de edifícios com balanço energético nulo para o panorama nacional, tema ainda carente de estudos e pesquisas.

Figura 4 - Etapas para alcançar um ZEB.



Fonte: Harkouss, Fardoun e Biwole (2018), adaptado pela autora.

Assim, os ZEBs mostram-se alinhados com as metas de redução dos impactos ambientais negativos. Esse tipo de construção deve ter a sua demanda energética reduzida por meio da adoção de estratégias passivas de conforto e pelo uso de sistemas ativos mais eficientes (TORCELLINI *et al.*, 2006). Além disso, o atendimento a essa demanda é feito por meio de fontes renováveis, disponíveis localmente. Isso significa que os ZEBs devem fornecer um ambiente confortável, de maneira eficiente, ao mesmo tempo que propiciam um balanço energético nulo, ao longo de um ano (ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015)⁷.

2.6. Desafios para implementação de edifícios de balanço energético nulo ⁸

A aplicabilidade de projetos e construções de ZEB enfrentam vários desafios inter-relacionados (NDUKA *et al.*, 2019). Ruiz, Jimenez e Carvajal (2022) identificam esses desafios como resultado das medidas de eficiência ativas e passivas. Os desafios ativos estão ligados à falta de integração entre os serviços prediais e os de automação. Já os desafios passivos vão desde a necessidade de criação de materiais construtivos adaptados ao clima regional, até às ações do usuário que, em busca de conforto, afetam a eficiência energética da edificação.

Além disso, Harkouss, Fardoun e Biwole (2018) mostram que muitos trabalhos abordam as barreiras encontradas para o desenvolvimento de um ZEB. Como exemplo, é possível citar a qualificação profissional, o alto custo inicial, as incertezas quanto ao retorno dos investimentos, a ausência de uma metodologia comum, falta de espaço nas edificações para geração de energia, edifícios com envoltória pouco eficiente e o

^{7 e 8} Trechos retirados de ANGUETH *et al* (2023), ref. 1.

consequente superdimensionamento fotovoltaico, entre outros que serão abordados a seguir.

2.6.1. Conceito ZEB

É possível encontrar alguns exemplos de conceitos ZEB na literatura (Tabela 2), porém o grande desafio é definir um entendimento sobre esses termos, uma vez que existem mais de setenta definições em todo o mundo (WILLIAMS *et al.*, 2016).

Tabela 2 - Painel de definições relacionadas à temática ZEB.

	DEFINIÇÃO	FONTE
Casa de energia zero	Uma casa autossuficiente onde não são consumidos combustíveis fósseis e o consumo anual de eletricidade é igual à sua produção. Combina tecnologias de energia renovável com tecnologias de eficiência energética.	Esbensen; Korsgaard (1977); Iqbal (2004); Mertz; Raffio (2007); Rosta <i>et al.</i> (2016)
Casas solares de energia zero	Casas que utilizam energia solar térmica e fotovoltaicas para gerar tanta energia quanto sua carga anual	Charron (2005)
Edifício de energia zero	Um edifício energeticamente eficiente cuja a energia anual fornecida é menor ou igual à energia renovável exportada no local.	Sartori, Napolitano e Voss (2012); U.S. Department of Energy (2015)
Edifício com energia líquida zero	Edifício que produz tanta energia quanto usa, quando medido no local.	Jens Laustsen (2008); ASHRAE (2008); Torcellini <i>et al.</i> (2006)
Edifício com energia zero e conectado à rede	Edifício conectado à rede que gera tanta energia quanto usa ao longo de um ano.	Salom <i>et al.</i> (2011); Sartori, Napolitano e Voss (2012);
Edifício de energia de fonte líquida zero	O edifício que gera a mesma quantidade de energia renovável que consome ao longo de um ano. A energia usada no transporte da rede para o edifício também está incluída.	Torcellini <i>et al.</i> (2006)
Edifício com necessidades quase nulas de energia	Edifício com necessidades de energia quase nulas e que devem ser supridas por energia proveniente de fontes renováveis.	European Commission (2010)
Edificação de energia quase zero	Edificação energeticamente eficiente cuja geração de energia renovável produzida supre 50% ou mais de sua demanda anual de energia.	INMETRO (2022)

Edifício de energia positiva	Edifícios que fornecem mais energia aos sistemas de abastecimento do que consomem.	Jens Laustsen (2008)
Edificação de energia positiva	Edificação energeticamente eficiente cuja geração de energia renovável é superior à sua demanda anual de energia	INMETRO (2022)
Edifícios com energia de ciclo de vida zero	Edifício em que a energia utilizada no edifício em operação somada a energia incorporado em seus materiais e sistemas constituintes, ao longo da do seu ciclo de vida, seja igual ou menor que sua energia produzida, ao longo de sua vida útil.	Hernandez; Kenny (2010)
Edifício com custos líquidos de energia zero	As contas líquidas pagas, entre o edifício que exporta energia para a rede e a concessionária, devem ser nulas ou a favor do edifício.	Torcellini <i>et al.</i> (2006)
Edifício de emissões líquidas zero	O edifício gera ou compra energia livre de emissões, em quantidade suficiente para compensar as emissões formadas pelo seu consumo anual.	Torcellini <i>et al.</i> (2006)
Edifícios zero carbono	Edifícios que, ao longo de um ano, não utilizam energia que provoque emissão de dióxido de carbono.	Jens Laustsen (2008)

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Segundo Domingos e Gabriel (2020), essa falta de definição abre um ponto cego para que edifícios energeticamente ineficientes, mas que possuam uma quantidade exacerbada de módulos fotovoltaicos, possam ser considerados ZEB. Para o Brasil, essas autoras ressaltam que as pesquisas nessa área ainda não geraram uma base de dados suficientemente sólida para desenvolver uma referência de ZEB que atenda toda a extensão territorial do país.

Da mesma forma, para D’agostino e Mazzarella (2019, p.203), não existe uma definição precisa sobre edifícios energeticamente eficientes, mas é possível limitar a terminologia ZEB a “edifícios que demonstrem, através de medições anuais, que a energia fornecida é menor ou igual a energia produzida no local”. A ASHRAE concorda quando adota o termo *Net Zero Energy Building* (nZEB) e propõe uma definição única: um edifício que produz tanta energia proveniente de fonte renovável quanto consome, ao passo que mantém os níveis aceitáveis de funcionalidade. Essas edificações também podem trocar energia com a rede elétrica, desde que o balanço energético anual seja nulo (ASHRAE, 2008; WILLIAMS *et al.*, 2016).

Existe uma gama de informações disponíveis para auxiliar no processo de projeto de ZEB, mas as fontes são dispersas e variadas. Por isso, as informações existentes devem ser coletadas, avaliadas e organizadas para torná-las mais acessíveis (MCNABB, 2013). Além disso, cada país deve desenvolver sua própria definição de acordo com o seu contexto. O que se observa, apesar das diferenças, é que os objetivos são consistentes na intenção de reduzir o consumo de energia fóssil e exibir o potencial de economia de energia do setor da construção civil (ZHANG *et al.*, 2021).

Nesse contexto, as Instruções Normativas para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços, Públicas (INI-C) e Residenciais (INI-R) trouxeram, pela primeira vez, no rol das regulamentações do Inmetro, o conceito de “edificação de energia quase zero (NZEB)” e de “edificação de energia positiva (EEP)”. Enquanto no primeiro caso a geração de energia corresponde a, no mínimo, 50% da sua demanda, no segundo, a geração precisa ser superior à sua demanda energética anual (INMETRO, 2022; PROCEL, 2020).

Outra consideração a ser feita diz respeito à adoção de medidas de eficiência energética para a redução do consumo de energia, com o objetivo de atingir um ZEB (OHENE; CHAN; DARKO, 2022). No entanto, esse pré-requisito não aparece em todas as definições e os edifícios não são, necessariamente, projetados para esse fim. Dessa forma, um ZEB pode ser alcançado por meio de um sistema fotovoltaico superdimensionado, sem acarretar mudanças no consumo ou no comportamento do usuário (PANAGIOTIDOU; FULLER, 2013).

2.6.2. Processo de projeto para ZEB

De uma forma geral, a maioria dos projetistas segue o processo de projeto tradicional, que pode ser entendido como um processo linear com rotinas de trabalho sequenciais (LÖHNERT; DALKOWSKI; SUTTER, 2003; ZHANG *et al.*, 2021). Kwok e Grondzik (2018) consideram esse processo uma “passagem de bastão” de um especialista para outro. O problema é que essa forma de projetar, geralmente, impede que os edifícios ultrapassem os níveis convencionais de desempenho o que, conseqüentemente, acarreta altos custos operacionais (LÖHNERT; DALKOWSKI; SUTTER, 2003).

Por outro lado, quando o objetivo é projetar e construir um ZEB, surgem novas preocupações quanto ao conforto, ao consumo de energia e ao impacto ambiental (ATHIENTIS; O'BRIEN, 2015). Por isso, o desenvolvimento desse tipo de edificação

exige uma combinação de expertises associada a uma organização adequada das diversas etapas do processo de projeto. Uma das chaves para a promoção em larga escala dos ZEBs seria a transformação do processo tradicional para um processo de projeto integrado (PPI), que incorpore uma abordagem mais colaborativa entre os profissionais (ZHANG *et al.*, 2021).

O PPI considera a edificação como um sistema e enfatiza a integração dos conceitos de projeto desde o início, por meio de uma equipe coordenada de especialistas (LÖHNERT; DALKOWSKI; SUTTER, 2003). Aplica distintas habilidades, conhecimentos e integra diferentes sistemas de construção para produzir edifícios mais eficientes e responsáveis, com um custo operacional mais baixo. Além disso, promove ciclos de *feedback* crescentes entre todas as partes interessadas do projeto, desde o proprietário, arquitetos, engenheiros e construtores, até os usuários e operadores da edificação. Isso permite compartilhar o aprendizado, descobrir soluções com múltiplos benefícios, além de aperfeiçoar o processo como um todo (ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015; ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015).

Outro ponto importante é a definição de um processo de projeto, onde se destaca um esforço para reduzir a quantidade de energia consumida e manter níveis altos de conforto térmico. Ademais, deve-se promover a maximização da eficiência dos equipamentos mecânicos e assegurar seu funcionamento adequado. Dessa forma, caso o processo tenha sido realizado de forma assertiva, a energia a ser consumida será suprida por fontes renováveis (Figura 5). Assim, quanto maior for a eficiência energética de todo o edifício, menor será o sistema de produção de energia renovável (BUTERA, 2013).

Figura 5 - Processo para o projeto de uma edificação com baixo consumo de energia.



Fonte: Keeler e Vaidya (2018), adaptado pela autora.

2.6.3. Papel dos usuários no desempenho energético das edificações

A forma como o edifício é operado e o comportamento de seus ocupantes representam um papel crítico no desempenho energético e pode ser considerado tão importante quanto os avanços tecnológicos (BUTERA, 2013; VINÍCIUS *et al.*, 2019). Ademais, uma das necessidades das pessoas em relação a uma edificação é o conforto humano (RUIZ; JIMENEZ; CARVAJAL, 2022). Por isso, o comportamento do usuário influencia diretamente a demanda de energia para resfriamento e aquecimento, da mesma forma que o consumo de eletrodomésticos e a iluminação artificial (ZHANG *et al.*, 2021).

Os edifícios de energia zero geralmente possuem sistemas prediais avançados que incluem o controle de sistemas de refrigeração, iluminação, incêndio, segurança, entre outros (ZHANG *et al.*, 2021). Diante disso, pode-se argumentar que edifícios eficientes, totalmente automatizados, são fundamentais para alcançar a eficiência energética, uma vez que não dependem das incertezas relacionadas ao comportamento humano. No entanto, tecnologias e sistemas que excluem as pessoas dos processos de tomada de decisão são pouco aceitos, o que consolida a necessidade de interação harmônica entre os aspectos técnicos e comportamentais (VINÍCIUS *et al.*, 2019).

Independente dos esforços da indústria para aprimorar tecnologias de desempenho, nenhuma aplicação será assertiva sem o envolvimento de todas as partes interessadas (projetistas, proprietários, operadores, construtores etc.). Por isso, os usuários do edifício devem ser educados quanto ao uso de tais tecnologias e notificados constantemente sobre o tipo de dados que estão sendo coletados e de que maneira essas informações estão sendo usadas para melhorar o desempenho do edifício (VINÍCIUS *et al.*, 2019). Além disso, também devem integrar rotinas sobre o uso adequado de equipamentos (SOULEY AGBODJAN *et al.*, 2022). O conhecimento desses dados permite a detecção precoce de problemas, incluindo configurações inadequadas de controle e mau comportamento dos ocupantes (BUTERA, 2013).

2.6.4. Perspectivas ZEB para edificações novas e existentes

As edificações de energia zero proporcionam oportunidades tanto para os edifícios novos, quanto para os existentes (OHENE; CHAN; DARKO, 2022; RUIZ; JIMENEZ; CARVAJAL, 2022). No entanto, a maioria dos trabalhos de pesquisa está relacionada aos novos edifícios, enquanto os *retrofits* de energia recebem pouco destaque. São raros os estudos que levam em consideração a manutenção de ZEB e a integração de edifícios eficientes com novas tecnologias (HARKOUSS; FARDOUN; BIWOLE, 2018).

As edificações existentes possuem um papel importante nas metas de redução do consumo de energia, uma vez que se apresentam em maior número (RUIZ; JIMENEZ; CARVAJAL, 2022). No caso dos *retrofits*, as características reais do edifício devem ser consideradas e analisadas sob uma perspectiva multidomínio. Dessa forma, todas as soluções técnicas devem estar integradas entre si e com o ambiente construído (BELUSSI *et al.*, 2019).

No entanto, para Belussi *et al.* (2019), muitos edifícios existentes estão sendo excluídos da otimização energética. Na Europa, por exemplo, aplicar os novos padrões energéticos em seus edifícios históricos pode ser muito caro e, por vezes, não aplicável. Já nos países em desenvolvimento, o foco está em novas construções e os *retrofits* também apresentam pouco progresso em direção à eficiência energética (URGEOVORSATZ *et al.*, 2020). Ohene, Chan e Darko (2022), em sua exploração sistemática sobre ZEBs, também constataram uma maior ênfase dos estudos no projeto de novas edificações, uma vez que oferecem maior flexibilidade quanto ao uso de novas tecnologias.

2.6.5. Desafios tecnológicos e econômico-financeiros

As inovações tecnológicas estão no cerne da concepção de um ZEB, tanto no que diz respeito aos recursos para redução do consumo energético, quanto à geração de energia limpa local (CIELO; SUBIANTORO, 2021). Por outro lado, WEI e coautores (2023) argumentam sobre a dificuldade de se projetar apenas com o uso dessas tecnologias. Como os ZEBs são produzidos em diferentes escalas e adotam diversos métodos e custos, o compartilhamento de informações e tecnologias torna-se complexo. Por isso, edificações eficientes são difíceis de popularizar.

Quando o abastecimento dos ZEB é feito por energia solar fotovoltaica, surgem outras barreiras tecnológicas, uma vez que a produção de energia está limitada à área disponível para instalação dos sistemas, bem como à geometria e à orientação dos edifícios (SOULEY AGBODJAN *et al.*, 2022). Essa limitação do projeto à escala do edifício impõe um limite máximo de consumo de energia (BELUSSI *et al.*, 2019). Por isso, Butera (2013) defende que os ZEBs precisam avançar para a escala da cidade. Dessa forma, o passo seguinte seria o distrito de energia zero, onde é mais fácil atender à demanda energética por meio de diferentes formas de geração e armazenamento, com menores custos.

Questões relacionadas ao custo da eficiência energética são frequentemente levantadas (URGE-VORSATZ *et al.*, 2020). De acordo com Kock, Theiss e Filho (2020), um empreendimento sustentável e socialmente justo também precisa ser economicamente viável. No entanto, Marszal e coautores (2011) argumentam que o viés econômico é deixado de lado nos ZEB, mas é de grande importância para a implementação deste conceito, uma vez que os custos também influenciam na tomada de decisão.

Nesse contexto, o custo-benefício da adoção de medidas energéticas ainda é uma questão debatida pelos profissionais da construção civil. Principalmente, porque o sucesso de um ZEB depende das condições climáticas e locais, o que traz condicionantes específicas para cada projeto. Além disso, as medidas de eficiência energética são individuais, o que dificulta a reprodução exata das estratégias passivas e do dimensionamento de geradores de energia renovável. Para Kapsalaki, Leal e Santamouris (2012), a existência de vários ZEBs construídos pelo mundo indica que essas edificações são passíveis de acontecer. Porém não há comprovação de que as escolhas de projeto sejam eficientes do ponto de vista econômico. Por isso, a análise da viabilidade econômica para esse tipo de edificação torna-se tão necessária (DOMINGOS; GABRIEL, 2020).

Para usuários, fornecedores, equipes de projeto e proprietários de edifícios, os custos iniciais são uma barreira significativa para alcançar edificações de alto desempenho (TORCELLINI; PLESS; LEACH, 2015; ZHANG *et al.*, 2021), particularmente nos países em desenvolvimento (COSTA; AMORIM; SILVA, 2020). Da mesma forma, para muitos investidores, esses gastos iniciais elevados são sinônimo de insegurança e ocorrem devido aos altos custos de tecnologias e equipamentos eficientes (NDUKA *et al.*, 2019). No entanto, essa percepção considera, apenas, o custo inicial do empreendimento e descarta a redução do consumo energético e a recuperação do valor investido, a longo prazo (DOMINGOS, 2020).

2.7. Eficiência energética em *campi* universitários

Os *campi* universitários têm sua escala, frequentemente, comparada à vilas, bairros ou a pequenas cidades. Isso ocorre devido à sua extensão territorial, ao grande número de usuários, à diversidade de atividades que são desenvolvidas e à variedade de edifícios que estão presentes em seu território (salas de aula, laboratórios, auditórios, escritórios, residências, instalações para alimentação, prática esportiva e recreação, entre outros) (ABIDIN *et al.*, 2017; LEAL FILHO *et al.*, 2019). Esses espaços, muitas vezes,

também são considerados laboratórios vivos, de experimentação, devido a sua capacidade de testar e implementar novas estratégias e estabelecer novos padrões de desenvolvimento sustentável (REBELATTO *et al.*, 2019).

Nesse sentido, as discussões sobre o uso da energia e as suas diversas formas de conservação reverberam em diferentes iniciativas dentro da universidade (YASUOKA *et al.*, 2023). Embora muito possa ser feito para melhorar a conexão entre os *campi* universitários e a sociedade (SALVIA *et al.*, 2020), o principal impacto proporcionado por projetos sustentáveis dentro do campus é a difusão do conhecimento e a consciência de que as Instituições de Ensino Superior precisam ser relevantes para suas comunidades e regiões (GROULX *et al.*, 2021).

Sob essa ótica, Moura, Frankenberger e Tortato (2019) concordam que as universidades são impulsionadoras da sustentabilidade, uma vez que formam profissionais e desenvolvedores de pesquisa nessa área. Por isso, esses centros educacionais podem se tornar modelos de referência para o desenvolvimento sustentável e serem reconhecidos como um núcleo de aprendizagem nessa área, além de proporcionar uma integração com a comunidade e sugerir mudanças de comportamento. Esses mesmos autores identificaram 92 IES como detentoras de iniciativas de sustentabilidade para melhorias sociais e ambientais como, por exemplo, a busca pela eficiência energética e a geração de energia elétrica proveniente de fonte solar.

A Universidade de Brasília (UnB) também apresenta iniciativas sustentáveis e projetos de pesquisa voltados para a eficiência energética. Um deles é o projeto LabZero, uma edificação que será construída na UnB e destinada a abrigar um espaço para laboratórios e grupos de pesquisa dedicados ao estudo da sustentabilidade e do balanço energético nulo das edificações. Esse projeto conquistou o 4º Lugar da chamada pública da Eletrobrás, por meio do programa PROCEL Edifica, para selecionar os melhores projetos de edificação de balanço energético nulo (TORRES, 2020). Além disso, outro projeto de pesquisa relacionado a essa temática é o “Zero Energy Brasília: Plano estratégico de eficiência energética para parque construído de balanço energético nulo”, cujo objetivo geral consiste na conversão do parque edificado dos *campi* da UnB (Darcy Ribeiro, Gama, Ceilândia e Planaltina) em distritos de balanço energético nulo.

Para Tsantili, Koronaki, Polydoros (2023) o *campus* universitário é um local estratégico para o desenvolvimento de projetos de eficiência energética, uma vez que os edifícios de ensino superior apresentam, em geral, uma demanda energética elevada. Esse impacto ambiental causado por meio das atividades, operações e serviços de apoio, pode

ser consideravelmente reduzido por medidas organizacionais, tecnológicas e de otimização energética (REBELATTO *et al.*, 2019). Por isso, é importante compreender a forma como as universidades consomem energia.

De acordo com o Ministério da Educação (MEC), o consumo de energia elétrica está entre os maiores custos de uma Universidade (OLIVEIRA; SILVA; ALTOÉ, 2021). Por isso, Garcia, Souza e Reis (2023) reforçam a importância do desenvolvimento de estudos sobre eficiência energética no Brasil, para a redução de custos de operação, particularmente, em edificações educacionais.

Sendo assim, o desenvolvimento de *benchmarks* é uma forma de verificar como as edificações educacionais consomem energia (QUEVEDO, 2021). Nesta abordagem, compara-se o desempenho anual de uma edificação a um desempenho de referência, representativo do estoque de edificações (*benchmark*), a fim de evidenciar se um edifício é eficiente em relação a edificações similares (GERALDI; BAVARESCO; GHISI, 2020).

O Brasil está avançando na formulação de uma política de *benchmark*, com métodos específicos, tipologias definidas e processos de coleta de dados. Uma dessas práticas é disponibilizada pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), na qual uma análise estatística foi adotada para determinar o consumo médio de energia da edificação, seguida por simulações realizadas no *software Design Builder* em edificações não residenciais. Inicialmente, esse trabalho foi proposto para agências bancárias, mas os estudos finais concluíram que o método pode ser aplicado para qualquer tipologia não residencial brasileira (QUEVEDO, 2021). No que tange as tipologias de ensino, o banco de dados do estoque é constituído por 606 edificações de instituições de ensino técnico e superior, cuja a intensidade de uso de energia (EUI, sigla em inglês) anual média é de 63,2 kWh/m²/ano. Além disso, 54% das edificações apresentaram consumo anual entre 25 kWh e 100 kWh (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2021).

Com relação à demanda energética, um estudo realizado na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), analisou EUI de todos os seus 127 edifícios e encontrou a média de 57 kWh/m² para as unidades acadêmicas. Segundo o autor desse estudo (GARCIA *et al.*, 2021), o EUI dos edifícios da UFMG está próximo dos valores mais baixos de EUI em outras partes do mundo, o que pode ser um indicativo de baixo conforto térmico ou de poucas horas de uso das instalações do *campus*. Outro estudo desenvolvido por Batlle e coautores (2020) na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), em Minas Gerais, levantou o consumo de energia de três edificações representativas do

campus. Nessas benfeitorias, foram registrados os consumos anuais médios de 554 kWh, 243 kWh e 417 kWh. O maior consumo foi atribuído aos sistemas de ar condicionado, seguido pelo uso da iluminação artificial.

Além da eficiência energética, outro aspecto relevante para IES diz respeito ao conforto térmico e lumínico, para melhoria do aspecto ambiental dos ambientes educacionais (OCHOA *et al.*, 2012). Lakhdari, Sriti e Painter (2021) destacam que os efeitos da luz natural (ZHANG *et al.*, 2017) e do conforto térmico (BARBHUIYA; BARBHUIYA, 2013) influenciam na saúde e no desempenho de estudantes e professores. Em alguns casos, a iluminação inadequada e o calor excessivo têm um impacto negativo na aquisição de conhecimento (ZAHIRI; ALTAN, 2016). Bakmohammadi e Noorzai, (2022) concordam que existe uma ligação direta entre o nível de conforto dos alunos e sua capacidade de aprendizagem.

Segundo Zeiler e Boxem (2009), o conforto térmico é um aspecto relevante para o desempenho dos alunos. Enquanto o calor excessivo do ambiente tende a reduzir o desempenho em determinada tarefa, as temperaturas muito frias reduzem a destreza e a velocidade de execução (ZEILER; BOXEM, 2009). Além disso, os diferentes aspectos de qualidade lumínica podem ser associados à melhoria do humor e redução da fadiga (EDWARDS; TORCELLINI, 2002), bem como auxiliar os alunos na redução do estresse, na socialização, na melhoria da aprendizagem e da concentração (LAKHDARI; SRITI; PAINTER, 2021).

Em face do exposto, observa-se que equilibrar conforto térmico e lumínico associado à redução do consumo de energia é uma atividade complexa e requer um projeto cuidadoso para atender a objetivos diversos. Por isso é importante projetar as envoltórias do edifício fazendo bom uso de estratégias passivas, sempre que possível (LAKHDARI; SRITI; PAINTER, 2021).

2.8. Simulação computacional e otimização multiobjetivo

A fase de concepção do projeto arquitetônico é uma etapa complexa, caracterizada pela tomada de várias decisões relacionadas a parâmetros diversos (CLARKE; HENSEN, 2015). Com relação ao conforto ambiental, por exemplo, vários são os fatores que o influenciam: orientação solar, propriedades físicas dos materiais construtivos, dimensão das janelas, sombreamento, renovação de ar, entre outros (LINCZUK; BASTOS, 2020). Nesse sentido, a simulação computacional é capaz de imitar os comportamentos físicos de um sistema e, por isso, é uma das metodologias mais

utilizadas para a análise de desempenho de edificações (SENEL, 2019). Ademais, antecipar o comportamento de um edifício é mais eficiente e econômico do que tentar solucionar possíveis problemas durante a fase de utilização dos espaços construídos (CAROLINE *et al.*, 2021).

Nesse cenário, a simulação computacional tem se tornado uma ferramenta eficaz para a avaliação das condições de conforto e de eficiência energética dos edifícios. (LINCZUK; BASTOS, 2020), uma vez que pode gerar um modelo aproximado da realidade e prever o comportamento do edifício em vários aspectos (FARIA *et al.*, 2020). Caroline e coautores (2021) apresentam, em seu estudo sobre simulações computacionais aplicadas ao processo de projeto de arquitetura, uma série de ferramentas que buscam replicar os princípios da física que estão ligados ao ambiente construído como, por exemplo, análise climática, termoenergética, de iluminação e de ventilação natural.

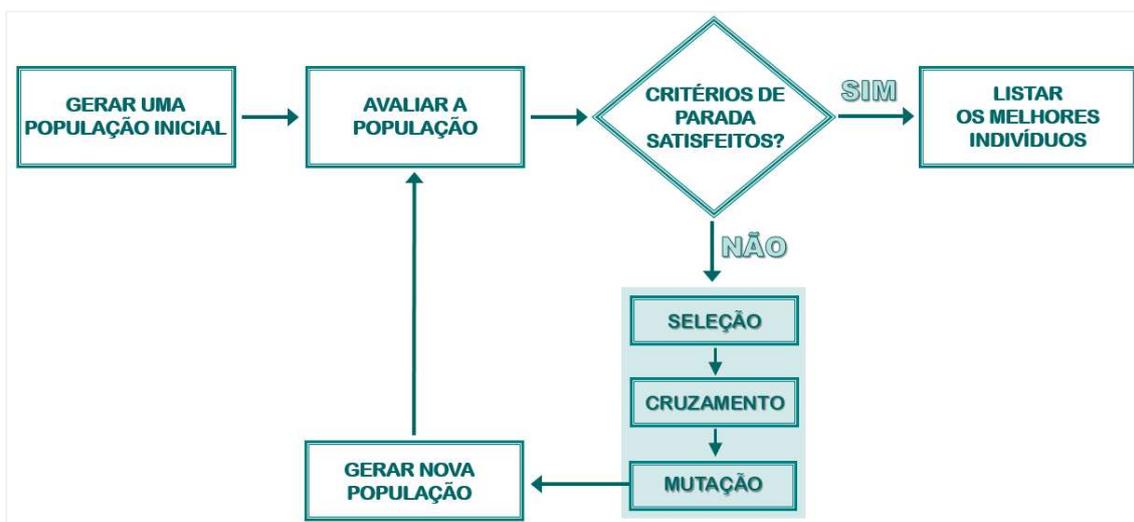
Diante da multiplicidade de fatores relacionados ao projeto, que incluem restrições normativas e construtivas, conforto ambiental e eficiência energética, tem se tornado comum o uso de ferramentas computacionais capazes de executar simulações paramétricas (LINCZUK; BASTOS, 2020). Esse tipo de *software* permite o desenvolvimento de formas complexas, capazes de construir uma relação de dependência entre variáveis diversas e buscar soluções mais próximas de um ponto ótimo, que atenda a determinado objetivo (FONSECA *et al.*, 2017).

De forma geral, os projetistas realizam simulações paramétricas, variando um critério por vez (ØSTERGÅRD; JENSEN; MAAGAARD, 2016). Todavia, isso pode levar a um processo longo e, por vezes, inviável (TUHUS-DUBROW; KRARTI, 2010). Por isso, os estudos que envolvem processos de otimização⁹, particularmente os relacionados ao desempenho da edificação, vem ganhando cada vez mais importância na arquitetura (SILVA; CARLO; BOSCO, 2018). Para Bai e coautores (2022), a otimização multiobjetivo é uma técnica capaz de avaliar várias opções de projeto a fim de obter a melhor solução para uma determinada finalidade. Esse mesmo autor reúne, em sua pesquisa, vários estudos recentes sobre otimização em ZEBs.

⁹ O processo destinado a encontrar os melhores valores para um problema específico é chamado de otimização. Inicialmente, deve-se identificar os parâmetros do problema, aos quais serão aplicadas as restrições. Posteriormente, os problemas devem ser investigados e classificados em objetivo único ou multiobjetivo. Por fim, o *software* otimizador mais adequado será escolhido com base nos tipos de parâmetros identificados, restrições, número de objetivos e empregado para resolver o problema em questão (SAREMI *et al.*, 2017).

Sob essa ótica, o processo de otimização multiobjetivo, por meio de simulação computacional, pode ser feito de várias formas. Uma delas abrange os métodos clássicos, que envolvem a soma ponderada de diversos objetivos. Outra opção, mais sofisticada, emprega algoritmos evolutivos (Figura 6) para otimizar os processos de escolha (LINCZUK; BASTOS, 2020). Esses algoritmos mostram-se eficazes para processos de otimização multiobjetivo, pois são capazes de lidar com variáveis contínuas e problemas multimodais. Por esse motivo, também são recomendados para estudos que utilizam simulação de desempenho de edificações (FONSECA *et al.*, 2017; JI *et al.*, 2024).

Figura 6 - Procedimento de execução do algoritmo evolutivo.



Fonte: Linczuk e Bastos (2020), adaptado pela autora.

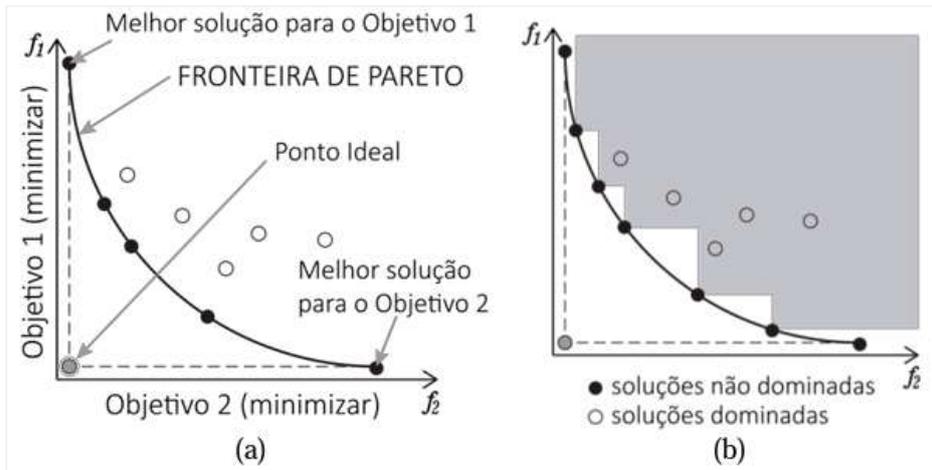
Entre os tipos de *software* disponíveis para esse tipo de otimização, o *Energy Plus* e sua interface gráfica *Design Builder* estão entre os programas mais comumente usados para simulações de eficiência energética (CORREIA; AMORIM; SANTAMOURIS, 2024; WANG; POURAMINI, 2024). Dessa forma, os edifícios podem ser modelados para avaliar seu consumo de energia, incluindo resfriamento, ventilação e iluminação (WANG; POURAMINI, 2024).

No que tange os processos de otimização, o *Design Builder* adota um algoritmo genético baseado no NSGA-II, que se fundamenta em um método de classificação não dominada, comprovadamente eficaz na classificação de objetivos concorrentes (DEB *et al.*, 2002). Além disso, também incorpora melhorias em relação à algoritmos anteriores, ao garantir maior diversidade de soluções ótimas (DEB *et al.*, 2002), o que favorece seu uso no campo da otimização do desempenho de edifícios (JI *et al.*, 2024).

Um algoritmo genético é um método que simula o processo de evolução biológica para encontrar soluções ótimas por meio de critérios baseados na teoria da eficiência de Pareto (JI *et al.*, 2024). Essa ferramenta resulta em um diagrama que permite a identificação e classificação dos problemas, em ordem de importância (SILVA, S. B. *et al.*, 2019), de forma que qualquer tentativa de melhorar uma variável, piora os demais parâmetros (CORREIA; AMORIM; SANTAMOURIS, 2024). Nesse caso, todas as soluções apresentadas na sua fronteira podem ser consideradas igualmente satisfatórias (DA SILVA *et al.*, 2019).

Nesse diagrama estão representados pontos definidos, que correspondem às soluções. Esses pontos podem representar soluções dominadas e soluções não dominadas (Figura 7b), sendo que estas últimas configuram a fronteira de Pareto. Dessa forma, pode-se dizer que uma solução domina outra quando apresenta desempenho igual em todas as funções-objetivo ou superior em, pelo menos, uma. A figura 7a mostra uma solução que é melhor para o objetivo 1 e outra que é melhor para o objetivo 2, além de identificar o ponto ideal para ambas as funções-objetivo. Por esse motivo, no caso de objetivos conflitantes, a otimização aponta o conjunto de soluções (não dominadas) mais apropriadas para objetivos diferentes (LINCZUK; BASTOS, 2020).

Figura 7 - Diagrama de Pareto.



Fonte: Linczuk e Bastos (2020).

2.9. Considerações finais do capítulo

O setor da construção civil detém grande potencial para redução da demanda de energia e das emissões de GEE, que pode ser estimulado a partir da implementação de medidas de eficiência energética nos edifícios. Nesse sentido, a implementação de políticas e regulamentações energéticas contribuíram para o avanço dos ZEBs, no últimos anos, tanto no Brasil, quanto em um contexto internacional, particularmente, a União Europeia, os Estados Unidos e a China.

Diante disso, os ZEBs assumem uma função cada vez mais significativa para o meio ambiente, além de atuar como agentes mitigatórios das mudanças climáticas, ao reduzirem o consumo de energia elétrica e as emissões de GEE (BELUSSI *et al.*, 2019). Essas edificações são caracterizadas pela alta eficiência energética. Para tanto, existem três formas de alcançar o balanço energético nulo: pela adoção de estratégias bioclimáticas, pela melhoria da eficiência de equipamentos e pela geração de energia elétrica proveniente de fonte renovável limpa (AHMED *et al.*, 2022; WU *et al.*, 2022).

Por outro lado, a aplicabilidade de um projeto ZEB encontra vários desafios inter-relacionados, como por exemplo, a inexistência de uma definição clara sobre edifícios energeticamente eficientes e os altos custos iniciais. Já a forma tradicional de projetar o edifício, sem a integração de expertises profissionais, é outro obstáculo que impede que os níveis convencionais de desempenho sejam ultrapassados. Outras dificuldades esbarram em questões que vão desde o modo como o edifício é operado pelos

seus ocupantes e os altos custos para implementação, até a análise das superfícies disponíveis para a geração de energia limpa¹⁰.

No tocante aos *campi* universitários, observa-se o papel catalisador das IES ao estimular o debate e fomentar a busca por soluções para as problemáticas ambientais e energéticas. Nesse sentido, o *campus* universitário pode atuar como modelo de sustentabilidade, em escala local, bem como agente mitigatório dos problemas energéticos (AMORIM, 2011). Além disso, outro papel importante das Universidades está relacionado à melhoria do ambiente educacional (OCHOA *et al.*, 2012), uma vez que o conforto térmico e visual podem influenciar a saúde e o desempenho de estudantes e professores (BARBHUIYA; BARBHUIYA, 2013; LAKHDARI; SRITI; PAINTER, 2021; ZAHIRI; ALTAN, 2016; ZHANG *et al.*, 2017).

Perante o exposto, observa-se que atrelar níveis de conforto satisfatórios com baixo consumo de energia requer uma análise paramétrica das medidas de modernização dos edifícios (RABANI; MADESSA; NORD, 2021). Isso ocorre devido à necessidade de explorar um grande número de possíveis soluções de projeto, que sejam capazes de atingir intenções específicas, para um clima particular (ABDOU *et al.*, 2021). Assim, o processo de otimização, decorrente das simulações computacionais, poderá indicar as melhores estratégias para conciliar o conforto dos usuários com baixo consumo de energia.

¹⁰ Trechos retirados de ANGUETH *et al.* (2023), ref. 1.

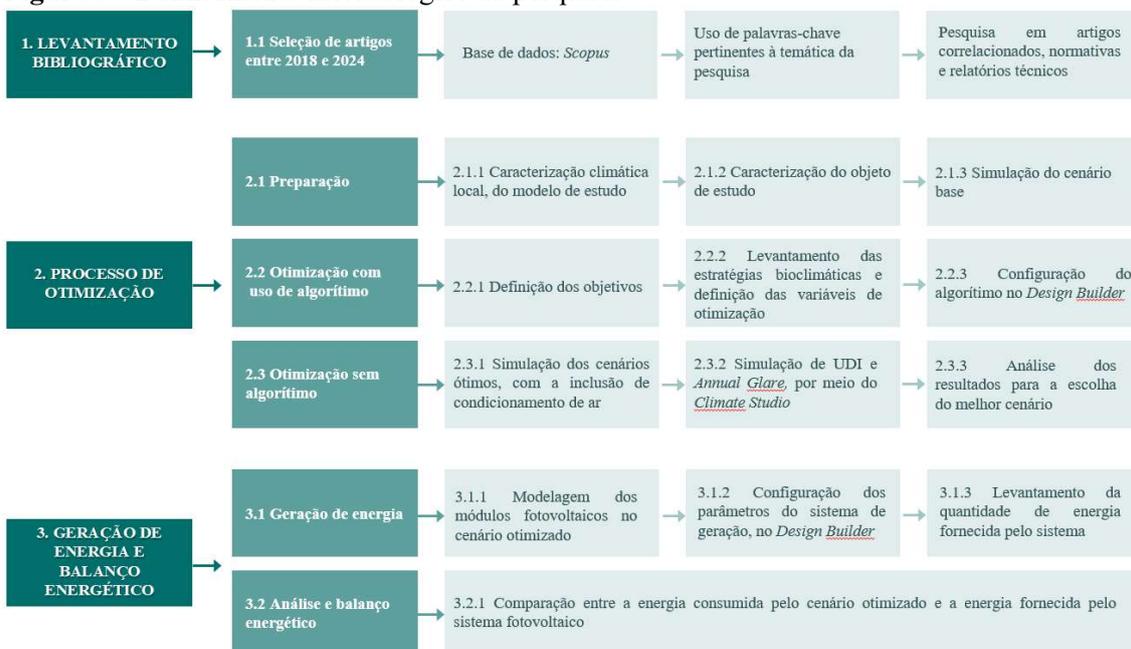
3. MÉTODO

A presença de adequadas condições térmicas e de iluminação natural nos edifícios, particularmente nos ambientes educacionais, desempenha um papel importante para promover um bom processo de aprendizagem. Por outro lado, níveis de conforto insuficientes podem impactar, negativamente, tanto o desempenho físico e intelectual de alunos, quanto o de professores. Pondera-se que desenvolver projetos para salas de aula, bem-sucedidos nesse sentido, é uma tarefa complexa que envolve o equilíbrio de vários fatores interdependentes. Diante desse cenário, a busca por soluções bioclimáticas de projeto de alto desempenho encontra benefícios significativos quanto ao uso de algoritmos evolutivos, para a resolução de problemas complexos (LAKHDARI; SRITI; PAINTER, 2021);

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos de pesquisa, nos quais são detalhadas as etapas do desenvolvimento e os recursos utilizados nesse trabalho, que se subdivide-se em três etapas:

1. Levantamento bibliográfico;
2. Processo de otimização;
3. Geração de energia fotovoltaica e balanço energético

Figura 8 - Delineamento metodológico da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O delineamento metodológico (Figura 8) é apresentado a seguir, de forma detalhada, discriminando as etapas envolvidas, bem como as técnicas e os procedimentos aplicados.

3.1. Levantamento bibliográfico

A análise bibliográfica adotou o *Scopus (Elsevier)* como sua principal base de dados e priorizou artigos revisados por pares, publicados no intervalo de 2018 a 2024. O critério de seleção para a escolha desses artigos foi a presença de palavras-chave como, por exemplo, “*energy efficiency, zero energy building, energy-efficient measures, renewable energy technologie, university buildings, higher education, buildings energy retrofitting, multi-objective optimisation, genetic algorithms, thermal comfort, daylight performance e Design Builder*” no título, no resumo e nas palavras-chave dos textos. No entanto, outros trabalhos também foram selecionados por meio da pesquisa indireta de artigos correferenciados. Nesse caso, a seleção foi feita por afinidade ao tema abordado previamente.

Entre os trabalhos selecionados encontram-se artigos científicos, teses, dissertações, normas e relatórios técnicos, entre outros. Os critérios adotados para a leitura dos artigos foram associados à qualidade e à abrangência dos dados relacionados aos subtemas dessa pesquisa.

3.2. Processo de otimização

Este trabalho tem como base o projeto de pesquisa *Zero Energy Brasília*, da Universidade de Brasília, cujo objetivo é “construir cenários para conversão do parque construído dos quatro *campi* da UnB (Darcy Ribeiro, Gama, Ceilândia e Planaltina) em Distritos de Balanço Energético Nulo”. Uma das suas metas é identificar tipologias de edifícios, estimar possíveis reduções de consumo energético e comprovar o desempenho de estratégias projetuais e tecnológicas para edifícios ZEB (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2020). Dentro dessa análise tipológica, o Bloco de Salas de Aula Norte (BSAN), uma das edificações do *campus* Darcy Ribeiro (Figura 9), foi selecionado para ser o projeto piloto das simulações.

Dessa forma, esta dissertação propõe um aprofundamento metodológico no projeto de pesquisa, com foco na verificação do desempenho do BSAN. Para tanto, foram incluídas variáveis adicionais com influência no conforto térmico e visual, tais como:

opções de envoltória (parede externa, cobertura, sombreamento, tipo de vidro e percentual de aberturas de fachada) e de orientação da fachada do bloco de salas de aula. Ademais, optou-se por uma otimização em duas etapas, sendo a primeira com o uso de algoritmos evolutivos (ver item 3.2.2 e 3.2.3). Essas modificações permitem que a análise seja conduzida a nível de projeto arquitetônico, de forma a fomentar a replicabilidade do edifício, em vez de abordar, apenas, algumas estratégias possíveis para retrofit de edificações existentes, conforme proposta do projeto de pesquisa.

O processo de otimização foi dividido em três etapas: preparação, simulações de otimização com o uso de algoritmos e análise de desempenho das soluções ótimas (CORREIA et al., 2024). A geração fotovoltaica com análise do balanço energético nulo foi realizada, posteriormente, com base no cenário otimizado. A modelagem paramétrica foi desenvolvida com a interface gráfica *Design Builder*, versão 7.0.2.006, que adota o *EnergyPlus* como seu motor de simulação. Este software foi utilizado em várias pesquisas internacionais envolvendo otimização e análise termoenergética (ASCIONE et al., 2016; MEHRPOUR et al., 2024; JI et al., 2024; VAKILINEZHAD, KHABIR, 2024; WANG, POURAMINI, 2024).

3.2.1.Preparação

A etapa de preparação consiste na coleta de informações que antecede a otimização: caracterização do clima e do objeto de estudo, levantamento do projeto arquitetônico, informações quanto ao uso e ocupação do edifício, equipamentos elétricos, entre outros. Além disso, as simulações termoenergética e lumínica do cenário base (CB) também são desenvolvidas nesta etapa.

a. Caracterização climática local

De acordo com a nova proposta de Zoneamento Bioclimático Brasileiro, o território nacional está dividido em 10 zonas bioclimáticas (ZB), segundos os parâmetros de: temperatura média anual, desvio padrão da temperatura média, amplitude média anual e desvio padrão de amplitude. Nesse contexto, a cidade de Brasília encontra-se na ZB4, quente e seca (ABNT, 2003).

Com relação ao clima, Brasília tem duas estações distintas. Uma delas é marcada por um período quente, de outubro a abril, e outra por um período quente e seco, de maio a setembro. Além disso, a capital brasileira apresenta altos níveis de irradiação solar, entre 5,25 kWh/m² e 5,3 kWh/m² ao longo do dia, o que favorece a geração de energia solar

fotovoltaica (COSTA; AMORIM; SILVA, 2020). As simulações computacionais foram realizadas com base em um arquivo climático *EnergyPlus Weather Format* (TMY) (CRAWLEY; LAWRIE, 2022), para a cidade de Brasília-DF (Latitude 15.763° e Longitude 47.870°).

b. Caracterização do objeto de estudo

O Bloco de Salas de Aula Norte (BSAN) está localizado no *campus* Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB), em Brasília-DF, e foi projetado para apoiar as atividades de ensino (Figura 9). Essa edificação possui 4.795 m² e é composta por dois pavimentos. No térreo encontram-se salas de aula, salas de estudo, espaços administrativos e de serviços. O primeiro pavimento comporta mais salas de aula e um auditório (Figura 10).

Figura 9 – Ficha técnica

FICHA TÉCNICA	Edificação	BSAN – Bloco de Sala de Aula Norte
	Tipologia	Sala de Aula Administrativo
	Localização	Campus Darcy Ribeiro, UnB Brasília - DF
	Latitude	15°50'16" Sul
	Longitude	47°42'48" Oeste
	Altitude	1.032 metros
	Área total construída	5748 m ² , aprox.
	Autor do projeto	Arq. Alberto Alves de Faria, Fabiana Couto Garcia e Fátima Lauria Pires
	Ano do projeto	2015

Fonte: LABORATÓRIO DE CONTROLE AMBIENTAL (2023), adaptado pela autora, 2024.

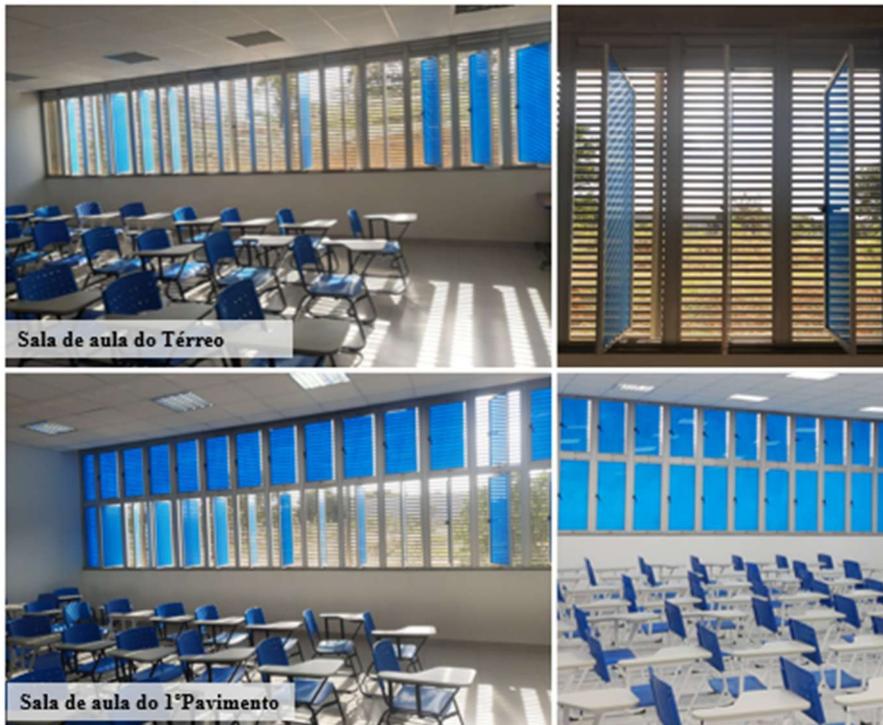
Figura 10 – Planta dos dois pavimentos do BSAN.



Fonte: CEPLAN, adaptada pela autora, 2023.

As salas de aula foram projetadas com grandes esquadrias pivotantes de acionamento manual, compostas por vidro simples e incolor. Essas aberturas estão orientadas para o oeste e protegidas da radiação solar direta por brises horizontais. Adicionalmente, após a conclusão da construção do edifício, foi aplicada uma película azul aos vidros das esquadrias (Figura 11), o que resultou em uma redução significativa da transmissão luminosa. Contudo, essa modificação no projeto original não será considerada para as simulações do cenário base.

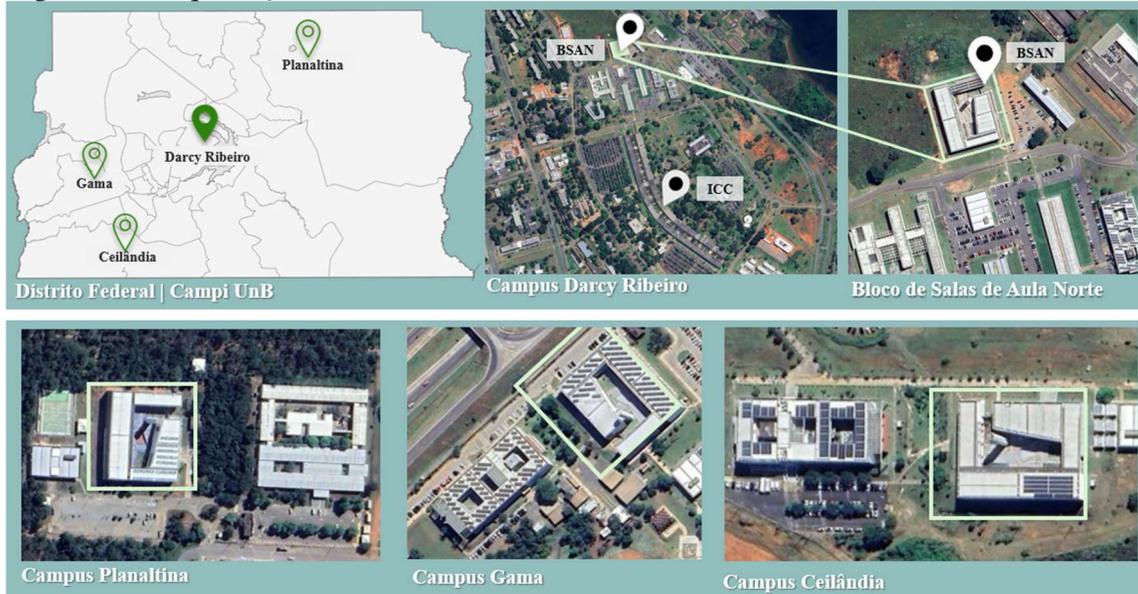
Figura 11 – Esquadrias e brises do bloco de salas de aula



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Um estudo realizado por Soares e Amorim (2023) classificou os edifícios do *campus* Darcy Ribeiro quanto ao potencial de utilização de estratégias passivas para a eficiência energética. Foi estabelecida uma escala de 0 a maior que 3, onde a menor pontuação indicou o maior potencial de utilização de estratégias passivas no edifício, com o objetivo de atingir níveis maiores de eficiência energética. De acordo com esse estudo, o BSAN teve classificação 1 (nível alto). Ademais, esta unidade acadêmica também foi construída nos *campi* de Planaltina, Gama e Ceilândia, o que traduz seu potencial de replicabilidade dentro da UnB e justifica sua escolha como objeto deste estudo (Figura 12).

Figura 12 – Implantação do BSAN

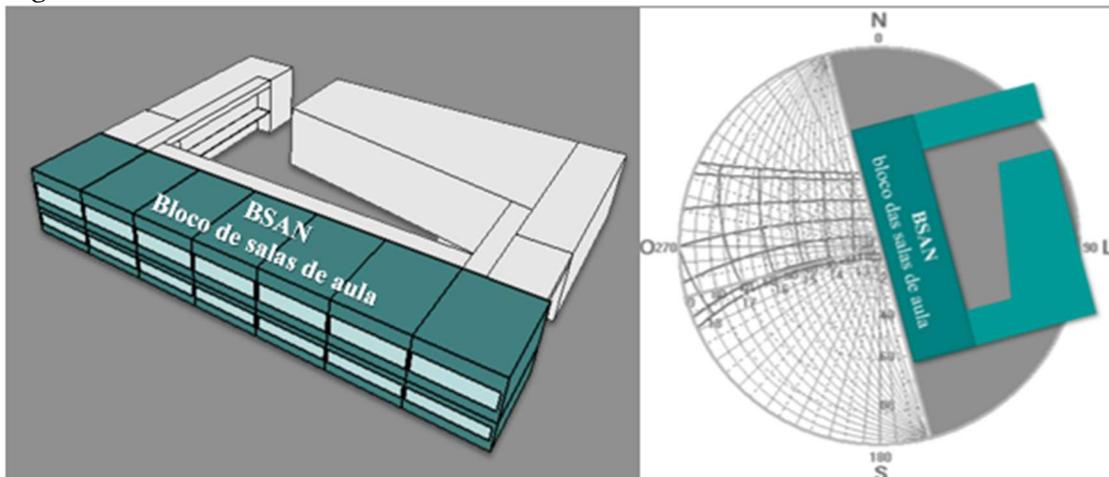


Fonte: Elaborado pela autora, 2024

c. Simulação do cenário base

O modelo computacional que representa o cenário base (CB) possui as mesmas características da edificação do projeto original. O desenvolvimento desta modelagem foi pautado tanto pelo projeto de arquitetura, quanto por levantamentos feitos *in loco*. Todos os ambientes foram modelados. No entanto, o bloco das salas de aula foi adotado como recorte da pesquisa para a análise termoenergética e para as otimizações (Figura 13). Além de representar a atividade fim de um IES, este bloco também corresponde a, aproximadamente, 50% da área total da edificação. Além disso, as aberturas deste bloco estão orientadas para o oeste, fachada que recebe incidência solar durante todo o período vespertino, ao longo do ano (Figura 13).

Figura 13 - Blocos das salas de aula do BSAN



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A composição dos sistemas construtivos foi desenvolvida de acordo com o método de programação do *Desing Builder* e está descrita na Figura 14. Já a especificação das propriedades termofísicas dos materiais foi desenvolvida conforme os dados das Tabela 3 e 4.

Figura 14 - Composição dos sistemas construtivos

SISTEMAS EXTERNOS		SISTEMAS INTERNOS		
COBERTURA	PAREDE EXTERNA	LAJE ENTRE PISOS	PISO INTERNO	PAREDE INTERNA
Telha metálica Ar Laje maciça Ar Forro mineral	Argamassa Tijolo (6 furos, 9x14x19cm) Ar Tijolo Argamassa	Piso cerâmico Contrapiso Laje maciça Ar Forro mineral	Piso cerâmico Contrapiso Laje maciça	Argamassa Tijolo (6 furos, 9x14x19cm) Ar Tijolo Argamassa

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Tabela 3 - Quadro de propriedades termofísicas dos materiais

Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (Kg/m³)	Calor Espec (J/Kg.K)	Absortância	R-Value (m²°C/W)
Argamassa	0.025	1.15	2000	1000	0.30	
Tijolo cerâmico	0.0134	0.9	1600	920		
Telha metálica	0.0006	55	7800	460	0.46	
Piso cerâmico	0.075	1,05	2000	920		
Contrapiso	0.07	1.15	2000	1000		
Laje maciça	0.15	1.75	2200	1000		
Forro Mineral	0.013	0.05	290	800		
Ar (tijolo)	0.032					0.175
Ar (cobertura/forro)	0.85					0.21

Fonte: Dornelles (2008), Dornelles (2021) e Weber e coautores (2017), adaptado pela autora.

Tabela 4 - Quadro de propriedades térmicas dos vidros

Material	Fator solar	Transmitância (W/m²K)	Térmica	Transmissão da luz visível
Vidro simples incolor	0.85	5.8		0.85

Fonte: PROJETEER (s. d.), adaptado pela autora.

As salas de aula possuem 130m² e capacidade para acomodar 100 pessoas, aproximadamente. Seu período de funcionamento ocorre das 8h às 12h e das 14h às 22h, com uma densidade de ocupação 0,77 pessoas/m². Essa rotina de uso também foi adotada como padrão para uso dos equipamentos e da iluminação artificial.

Com relação às cargas internas, levantou-se *in loco* os equipamentos elétricos e de iluminação do bloco de salas de aula para determinar os valores da densidade de potência correspondentes. Para os demais ambientes, foram adotados os valores padrão, devido à dificuldade em se levantar dados sobre pessoal e todos os equipamentos e lâmpadas existentes. A densidade de ocupação foi definida conforme as diretrizes da INI-C (INMETRO, 2021), enquanto as densidades de potência foram estabelecidas de acordo com as recomendações da ASHRAE (2021) (Tabela 5).

Tabela 5 - Quadro de cargas internas

AMBIENTES	DENSIDADE DE POTÊNCIA		DENSIDADE DE OCUPAÇÃO
	Equipamentos	Iluminação	
Sala de Aula	5 W/m ²	6.15 W/m ²	0.77 pessoas/m ²
Salas Administrativas	7.5 W/m ²	8.72 W/m ²	1.5 pessoas/m ²
Sala Informática	26.5 W/m ²	8.72 W/m ²	1.5 pessoas/m ²
Auditório	5 W/m ²	8.72 W/m ²	1.5 pessoas/m ²

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Esta fase da pesquisa considerou o modelo ventilado naturalmente. Para a configuração da ventilação natural, o *Design Builder* utiliza o *Airflow Network*, um algoritmo do *EnergyPlus*, que considera o tamanho das aberturas e a diferença de pressão do vento para calcular as taxas de ventilação (DESIGN BUILDER HELP, 2024; LOPES, 2020). Ademais, o ponto de ajuste da temperatura foi definido em 24°C, momento em que o modelo considera a janela fechada e o resfriamento por meio da ventilação é interrompido.

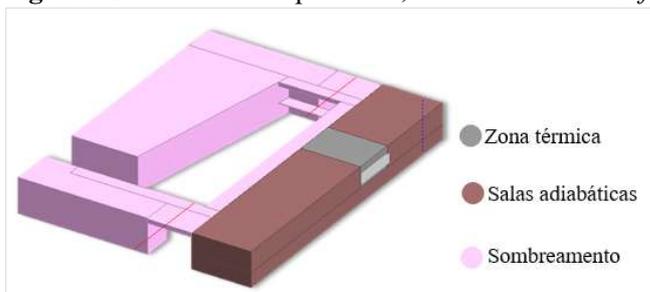
A avaliação do conforto térmico foi definida por meio da porcentagem de horas ocupadas em um ambiente, que se encontra dentro de uma faixa de temperatura de conforto. A determinação dessas condições, bem como a aceitabilidade dos usuários, em espaços ventilados naturalmente, foi determinada com base nos índices adaptativos da ASHRAE *Standard 55*, para uma taxa de aceitabilidade de 90%. Esta abordagem é recorrente em pesquisas internacionais, além de fazer parte do PBE Edifica (CORREIA; AMORIM; SANTAMOURIS, 2024; INMETRO, 2021).

3.2.2. Otimização com uso de algoritmo

Esta etapa abrange as simulações computacionais de otimização multiobjetivo com uso de algoritmo, para identificar os cenários ótimos. O recorte da pesquisa foi no

bloco de salas de aula. No entanto, optou-se pela simplificação do modelo para uma única zona térmica. A sala escolhida foi a que apresentou o menor POC no cenário base. As demais salas de aula foram modeladas como zonas adiabáticas, e os demais blocos, como elementos de sombreamento (Figura 15). As condições reais de operação, densidade de ocupação e potência foram mantidas.

Figura 15 – Modelo simplificado, desenvolvido no *software Desing Builder*.



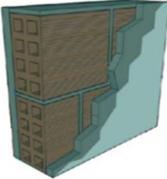
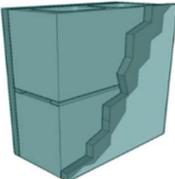
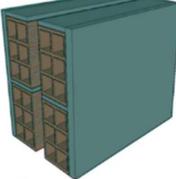
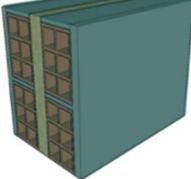
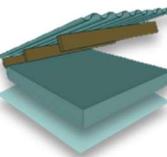
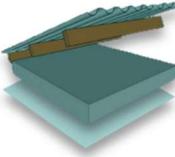
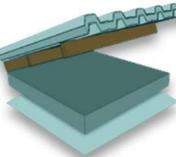
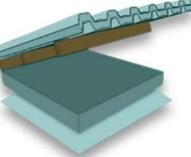
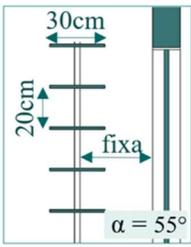
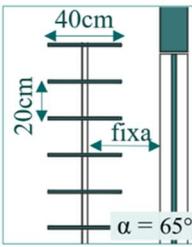
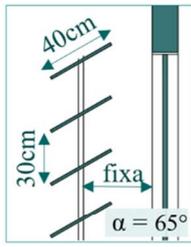
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A otimização tem como objetivo minimizar as horas de desconforto¹¹ e reduzir o gasto de energia com iluminação artificial, por meio de um sistema de automação. No segundo objetivo, esse sistema permite controlar as luzes elétricas de acordo com a disponibilidade de luz natural (DESIGN BUILDER HELP, 2024). Dessa forma, determinou-se um ponto de ajuste mínimo de 500 lux para as salas de aula (ABNT, 2013), para que os níveis de iluminância fossem calculados durante a simulação, a fim de determinar a quantidade de luz elétrica que poderia ser reduzida.

A escolha das variáveis está fundamentada em estratégias bioclimáticas capazes de impactar o desempenho do edifício, tanto com relação ao conforto térmico, quanto à disponibilidade de luz natural (Figura 16). Essas estratégias foram selecionadas mediante pesquisa na literatura, com o uso da base de dados *Scopus* e de palavras-chave como, por exemplo, “*passive strategy OR bioclimatic strategy*”, “*zero energy building OR ZEB OR NZEB*”, “*school buildings*”, “*building envelope*”, “*dry and hot climate OR hot climate*”, no título, no resumo e nas palavras-chave dos textos. Essa pesquisa contemplou artigos publicados entre 2019 e 2024 (Tabela 6).

¹¹ O *Design Builder* calcula os dados de horas em desconforto no nível do edifício por meio da média ponderada da área do piso de todas as zonas térmicas. Adicionalmente, utiliza os critérios da ASHRAE 55, que considera o tempo em desconforto como a soma do número de horas, ao longo do ano, em que uma ou mais zonas no edifício falham nos seus critérios de conforto (DESIGN BUILDER HELP, 2024).

Figura 16 - Variáveis consideradas para a otimização.

VARIÁVEIS									
CENÁRIO BASE	CENÁRIOS HIPOTÉTICOS								
PAREDE EXTERNA	 <p>Argamassa Bloco cerâmico 9x14x19cm Argamassa U: 2.37 W/m²K CT: 151 KJ/m²K</p>	 <p>Argamassa Bloco concreto 14x19x39cm Argamassa U: 2.87 W/m²K CT: 192 KJ/m²K</p>	 <p>Argamassa Bloco cerâmico 9x14x19cm Câmara de ar Bloco cerâmico 9x14x19cm Argamassa U: 1.27 W/m²K CT: 195 KJ/m²K</p>	 <p>Argamassa Bloco cerâmico 9x14x19cm Lã de rocha 4cm Bloco cerâmico 9x14x19cm Argamassa U: 0.68 W/m²K CT: 199 KJ/m²K</p>					
COBERTURA	 <p>Telha metálica Laje maciça Forro mineral U= 1.15 W/m²K R=20%</p>	 <p>Cobertura fria Telha metálica Laje maciça Forro mineral U= 1.15 W/m²K R= 90%</p>	 <p>Telha metálica com PE Laje maciça Forro Mineral U= 0.52 W/m²K R=20%</p>	 <p>Telha metálica com PU Laje maciça Forro Mineral U= 0.44 W/m²K R=20%</p>					
SOMBREAMENTO	 <p>fixa 3x3cm d=3cm α = 47°</p>	 <p>30cm 20cm fixa α = 55°</p>	 <p>40cm 20cm fixa α = 65°</p>	 <p>40cm 30cm fixa α = 65°</p>					
PAF	 <p>0.45</p>	 <p>0.25</p>	 <p>0.35</p>	 <p>0.55</p>					
VIDRO	 <p>FS: 0.85 TVIS: 0.85</p>	 <p>FS: 0.67 TVIS: 0.69</p>	 <p>FS: 0.50 TVIS: 0.58</p>	 <p>FS: 0.35 TVIS: 0.39</p>					
ORIENTAÇÃO	 <p>254°</p>	 <p>0°</p>	 <p>45°</p>	 <p>90°</p>	 <p>135°</p>	 <p>180°</p>	 <p>225°</p>	 <p>270°</p>	 <p>315°</p>

Fonte: Lopes (2020), adaptado pela autora.

Tabela 6 – Levantamento das estratégias bioclimáticas segundo a literatura

ESTRATÉGIA	REFERÊNCIA
Tranmitância de paredes e/ou coberturas	Abdul-Zahra, Al Jubori (2021); Al-Saadi <i>et al.</i> (2023); Alyami <i>et al.</i> (2021); Aram <i>et al.</i> (2022); Díaz-López <i>et al.</i> (2022a); Gindi (2024); Matana Júnior <i>et al.</i> (2023); Sarir, Sharifzadeh (2024); Shrestha, Rijal (2023); Zinzi <i>et al.</i> (2021).
Sombreamento de janelas e fachadas	Albatayneh (2021); Al-Saadi <i>et al.</i> (2023); Díaz-López <i>et al.</i> (2022b); Gindi (2024); Lohwanitchai, Jareemit (2021); Matana Júnior <i>et al.</i> (2023); Walter Costa <i>et al.</i> (2020); Zinzi <i>et al.</i> (2021).
Percentual de abertura das fachadas	Abdul-Zahra, Al Jubori (2021); Albatayneh (2021); Jia <i>et al.</i> (2023); Litardo <i>et al.</i> (2021); Lohwanitchai, Jareemit (2021); Sarir, Sharifzadeh (2024); Walter Costa <i>et al.</i> (2020); Zinzi <i>et al.</i> (2021).
Tipos de vidro	Abdul-Zahra, Al Jubori (2021); Al-Saadi <i>et al.</i> (2023); Alyami <i>et al.</i> (2021); Aram <i>et al.</i> (2022); Díaz-López, <i>et al.</i> (2022b); Gindi (2024); Lohwanitchai, Jareemit (2021); Sarir, Sharifzadeh (2024); Zinzi <i>et al.</i> (2021).
Materiais frios ¹² (parede e cobertura)	Cabeza <i>et al.</i> (2018); Correia <i>et al.</i> (2024); Díaz-López, <i>et al.</i> (2022b); Mastrapostoli <i>et al.</i> (2014);
Mudança na orientação do edifício	Abdul-Zahra, Al Jubori (2021); Albatayneh, (2021); Bekele, Atakara (2023); Cillari <i>et al.</i> (2020); Fernandez-Antolin <i>et al.</i> (2019); Ohene <i>et al.</i> (2024); Spanodimitriou <i>et al.</i> (2022);

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Para a combinação das variáveis, o *Design Builder* adota um algoritmo genético baseado no método NSGA-II, que provou ser eficiente na classificação de objetivos concorrentes (DEB *et al.*, 2002). Além disso, optou-se pelo uso do operador genético JEA, que seleciona descendentes melhores, por meio de cruzamento (CORREIA, 2024). Nesse contexto, existem algumas configurações de parâmetros de algoritmo que são fundamentais como, por exemplo, o tamanho da população, a taxa de cruzamento e a taxa de mutação (ZHAO; DU, 2020).

¹² São considerados materiais frios aqueles que apresentam alta refletividade solar, alta emissividade térmica do calor absorvido e, conseqüentemente, alto potencial de resfriamento. Entre os mais comuns estão os materiais naturais de cor clara, revestimentos brancos de alta refletividade, materiais asfálticos coloridos de alta refletividade infravermelhos, revestimentos retrorefletivos, termocrômicos, fluorescentes e espectralmente seletivos, que podem ser aplicados como revestimento em pisos, paredes ou telhados (CORREIA, 2024).

O tamanho da população, assim como o número de interações, influenciam a eficiência computacional do algoritmo. Enquanto populações muito pequenas levam à convergência local, as muito grandes reduzem significativamente a velocidade computacional (ZHAO; DU, 2020). O tamanho máximo da população permitida pelo *Design Builder* é de 500 (CORREIA, 2024). Porém, alguns autores (ZHAO; DU, 2020; LI et al., 2009) afirmam que o tamanho da população pode ser definido de 2 até 10 vezes o número total de variáveis. Esta pesquisa considerou o valor equivalente a 5 vezes o número total de variáveis, aproximadamente.

A taxa de cruzamento está relacionada à probabilidade de uma nova solução ser criada (DESIGN BUILDER HELP, 2024). Uma taxa muito alta faz com que as gerações sejam totalmente cruzadas, porém aumenta a possibilidade de danificar indivíduos excelentes. Por outro lado, se a taxa de cruzamento for muito pequena, o algoritmo pode estagnar e acarretar em uma evolução lenta (ZHAO; DU, 2020).

A taxa de mutação, por sua vez, ajuda a manter a diversidade da população e evita a perda de soluções ótimas (DESIGN BUILDER HELP, 2024). Dessa forma, uma taxa muito alta pode aumentar a diversidade da população, mas também pode destruir indivíduos excelentes (ZHAO; DU, 2020).

Ademais, o tamanho do torneiro, o viés objetivo e a geração de convergência são outros parâmetros relevantes para o sucesso da otimização. O tamanho do torneio seleciona indivíduos aleatoriamente na população para um cruzamento. Torneios maiores aumentam a chance de indivíduos mais fortes continuarem nos próximos cruzamentos em busca dos objetivos desejados. Já o viés objetivo controla o nível do impulso para a inviabilidade. Um valor próximo a zero indica que soluções com as menores pontuações de inviabilidade são melhores. A geração de convergência determina o momento em que as simulações de otimização devem parar, uma vez que a maioria das soluções já foi encontrada. Para tanto, o valor máximo permitido pelo *Design Builder* é 100 (DESIGN BUILDER HELP, 2024).

Nesse contexto, Ahn e coautores (2006) argumentam sobre ausência de teorias suficientes para a definição destes fatores. Por isso, os parâmetros adotados para esta pesquisa foram definidos à luz de alguns estudos anteriores (ASCIONE et al., 2015; ASCIONE et al., 2016; CORREIA, 2024; LI et al., 2009; ZHAO; DU, 2020) e das diretrizes do manual do *software* (DESIGN BUILDER HELP, 2024) (Tabela 7).

Tabela 7 – Resumo das configurações do algoritmo de otimização

Período de simulação	1 de janeiro a 31 de dezembro
Tamanho inicial da população	150
Gerações por convergência	100
Taxa de mutação	0.5
Taxa de cruzamento	0.8
Tamanho do torneio	2
Viés objetivo	0

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.3. Análise de desempenho das soluções ótimas

Os cenários otimizados formaram um diagrama de Pareto, que indica que todas as combinações apresentadas na sua fronteira foram consideradas ótimas. A partir dessas informações, teve início um novo processo de otimização, sem algoritmo, com base nos cenários ótimos encontrados. Esta etapa abrange tanto a análise do conforto térmico e visual, quanto do desempenho energético.

a. Análise do conforto térmico e desempenho energético

As combinações ótimas das estratégias bioclimáticas foram aplicadas ao bloco de salas de aula, com o intuito de investigar as alterações no conforto térmico e no consumo de energia, em comparação ao cenário base.

Tendo em vista a Instrução Normativa INI-C/2021, do INMETRO, os edifícios com ventilação natural devem atingir, pelo menos, 90% das horas ocupadas em conforto térmico. Caso contrário, deve-se adotar um sistema de condicionamento de ar para os períodos em desconforto e calcular o consumo de energia (INMETRO, 2022). Diante disso, um dos objetivos dessa análise é verificar o percentual de horas de conforto dos cenários ótimos. Complementarmente, Zhang e coautores (2021) destacam que as alterações climáticas globais podem resultar em um aumento tanto na frequência, quanto na intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor. Nesse contexto, as novas simulações incluíram o uso de ar-condicionado para suprir as horas em desconforto por calor.

A configuração dos parâmetros de HVAC foi feita conforme Correia (2024) e considerou o sistema simplificado do *Design Builder*, que calcula o consumo de energia,

considerando as cargas espaciais e o valor do coeficiente de performance (COP)¹³ (DESIGN BUILDER HELP, 2024). Nesse sistema, o controle operacional é efetuado por meio de pontos de ajuste, baseados na de temperatura do ar e variando entre 12°C e 26°C. Além disso, a ventilação natural foi configurada para operar de forma híbrida e não simultânea com o sistema de climatização. Assim, sempre que a temperatura interna do ar ultrapassar 22°C, o sistema de resfriamento entrará em operação.

Com base na comparação dos cenários, o COP adotado para o cenário base foi de 3.78, que corresponde ao valor mínimo para o Selo A do Programa Brasileiro de Etiquetagem (INMETRO, 2022). Em contraste, para os cenários otimizados, adotou-se um COP de 5.5 (INMETRO, 2024), diante da expectativa de melhoria na eficiência dos sistemas de climatização.

No que diz respeito à verificação do desempenho energético no processo de otimização, Lakhdari, Sriti e Painter (2021) afirmam que a Intensidade de Uso de Energia (EUI, sigla em inglês) é um indicador cada vez mais adotado para esse tipo análise, uma vez que abrange parâmetros relevantes de utilização de energia como, por exemplo, cargas anuais de aquecimento, arrefecimento e iluminação artificial. Para tanto, o cálculo do EUI foi realizado dividindo-se o consumo de energia anual e total do edifício pela sua área útil total (LAKHDARI; SRITI; PAINTER, 2021). Nesse contexto, o consumo da edificação foi calculado com base nas demandas energéticas de equipamentos, iluminação e ar-condicionado, de todos os blocos do edifício, determinadas por meio de simulação com o *Design Builder*.

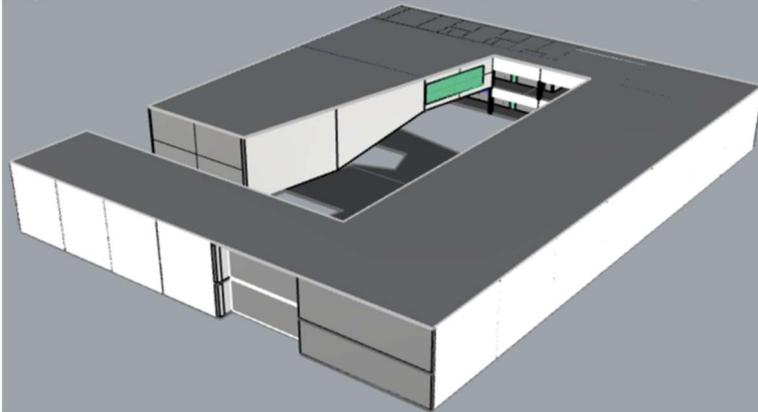
b. Diagnóstico do conforto visual

Uma das limitações do *Design Builder*, que diz respeito a sua incapacidade de incluir investigações relacionadas ao conforto visual no seu processo de otimização. Isso ocorre devido à ausência de objetivos mais específicos de otimização, que envolvem o cálculo de UDI ou *Annual Glare*, por exemplo. Por este motivo, optou-se por uma nova etapa de simulações de iluminação natural. Essa investigação foi aplicada aos cenários ótimos que apresentaram o maior POC e o menor consumo de energia elétrica, em comparação ao cenário base.

¹³ O Coeficiente de performance (COP) é a “relação entre a capacidade do resfriamento do sistema de condicionamento de ar e a potência absorvida pelos motores dos seus equipamentos em plena carga” (INMETRO, 2022).

Para o diagnóstico do conforto visual, o recorte da pesquisa volta a ser o bloco de salas de aula. O modelo foi desenvolvido no software *Rhinoceros* (Figura 17) e simulado pelo *plugin Climate Studio*, que permite os cálculos de *Useful Daylight Illuminances (UDI)*, de *Annual Glare*, bem como do mapa de iluminância média. A análise dessas métricas, de forma conjunta, possibilita uma melhor compreensão do espaço e investigação da qualidade da iluminação natural.

Figura 17 – Modelo desenvolvido no *software Rhinoceros* para simulação com o *Climate Studio*.



Fonte: Elaborado pela autora.

O *Useful Daylight Illuminance* pode ser definido com uma porcentagem para o número de horas em que a iluminância fornecida pela iluminação natural se encontra dentro de uma faixa de conforto (LAKHDARI; SRITI; PAINTER, 2021); (NABIL; MARDALJEVIC, 2005). De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2023), é desejável que os valores entre 300 lux e 3000 lux sejam mantidos em, pelo menos 50% do tempo, durante o horário de ocupação. Para este cálculo, adotou-se um plano de trabalho a 0,75m de altura do piso e sensores espaçados a cada 0,50m. Além disso, a simulação de UDI relata a frequência em que os níveis de luz natural estão enquadrados em um dos campos abaixo (SOLEMMA LLC, 2024):

- Baixo: menos de 100 lux;
- Suplementar: entre 100 e 300 lux;
- Autônomo: entre 300 e 3000 lux;
- Excessivo: mais de 3000 lux.

Além do UDI, também foi desenvolvido um mapa de iluminância média, sobre a área de piso das salas de aula, em todas as horas ocupadas. Este indicativo contemplou valores entre 300 lux e 3000 lux com o intuito de mostrar a distribuição da luz no ambiente e fornecer dados de iluminância média e horária (SOLEMMA LLC, 2024).

O *annual glare* é uma métrica que mede a probabilidade de ofuscamento pela luz natural. Nesse sentido, a recomendação para o conforto visual é que o ofuscamento não exceda um valor de 0,45 em mais de 5% do tempo de ocupação dos ambientes (ABNT, 2024). Para tanto, o *Climate Studio* desenvolve esse cálculo com base em valores de ofuscamento por hora, para oito direções de vista diferentes em cada posição no edifício, com uma altura de vista padrão de 1,2m do piso de acabado (altura dos olhos de um observador sentado). Os valores de ofuscamento estão divididos nas quatro faixas a seguir, cuja frequência pode ser visualizada pela interface gráfica do *Rhinoceros*, com cores que indicam sua ocorrência de 0% a 5% do tempo (SOLEMMA LLC, 2024):

- Imperceptível: menor ou igual 34%;
- Perceptível: maior que 34% e menor ou igual a 38%;
- Perturbador: maior que 38% e menor ou igual a 45%;
- Intolerável: maior que 45%.

As especificação das propriedades dos materiais foi realizada mediante seleção do banco de dados do *Climate Studio* e estão detalhadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo das propriedades dos materiais

Material	Refletância	Transmitância
Piso	66.8%	
Parede	89.4%	
Teto	89.4%	
Porta	85.7%	
Brise	83.4%	
Cobogó	71.1%	
Vidro (CB)	8.4%	87%
Vidro (C03 e C04)	5.9%	56%

Fonte: Solemma (s. d.), adaptado pela autora.

O melhor cenário otimizado seguiu para a última etapa de simulação da geração de energia local e análise do balanço energético.

3.3. Geração de Energia Fotovoltaica e balanço energético

Esta etapa final da pesquisa visa o aprofundamento da análise dos princípios de balanço energético nulo e uma possível extrapolação dos resultados (energia gerada) para a escala do *campus*. Para isso, geração de energia fotovoltaica foi obtida por meio de

simulação, com o uso do *software Design Builder*, para possibilitar a verificação do balanço energético do BSAN.

As simulações para a análise do balanço energético consideraram as cargas de todos os blocos do edifício, para extrair a demanda energética. Para o dimensionamento da potência final, considerou-se os mesmos parâmetros adotados nas simulações termoenergéticas. Além disso, o dimensionamento da potência final seguiu os mesmos critérios adotados nas simulações termoenergéticas.

A configuração dos parâmetros do sistema de geração de energia fotovoltaica seguiu a arranjo básico do *Design Builder* (CORREIA, 2024; DESIGN BUILDER HELP, 2024). Os módulos fotovoltaicos foram modelados no próprio *software*, ajustados para uma eficiência de 20% e acoplados ao edifício. Seu posicionamento considerou a inclinação do telhado existente e a área disponível na cobertura (Figura 18), com uma distância de 1m das bordas dos telhados (IBRAP, 2024).

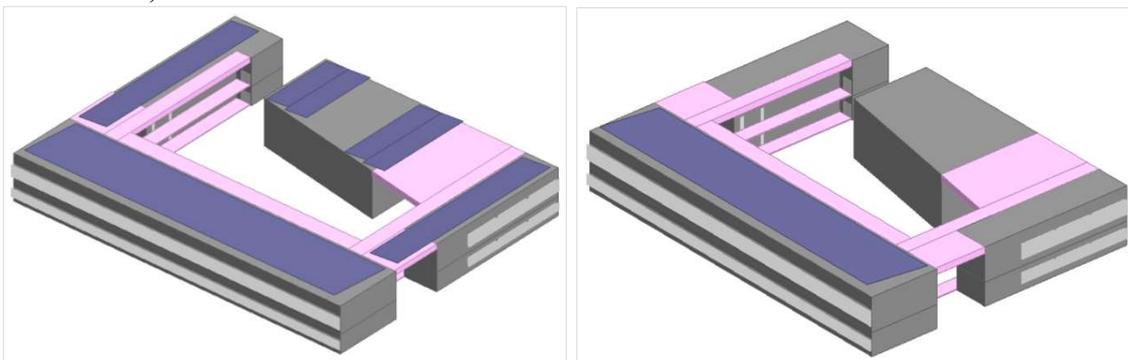
Figura 18 – Exemplo de como pode ser feita a instalação de módulos fotovoltaicos, em um bloco do *campus* Darcy Ribeiro, considerando a inclinação de telhas metálicas.



Fonte: Universidade de Brasília (2023).

Nessas condições, foi realizada uma simulação que, inicialmente, considerou toda a área disponível nas coberturas de todos os blocos, a fim de avaliar a capacidade máxima de geração de energia. Depois, foi realizada uma nova simulação que adotou, apenas, a cobertura do bloco de salas de aula, para levantar a geração disponibilizada (Figura 19).

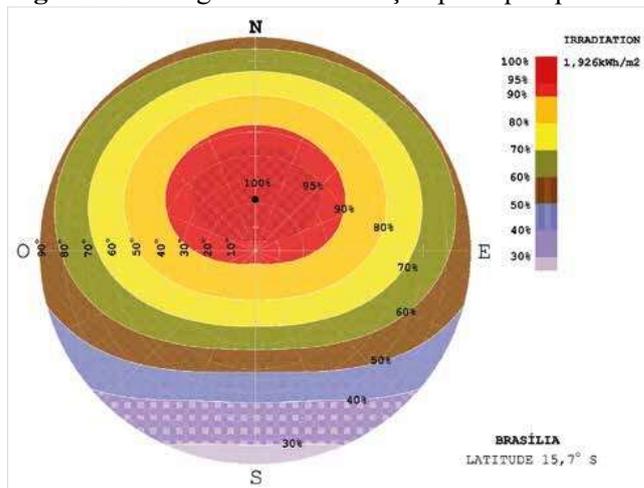
Figura 19 – Posicionamento dos módulos fotovoltaicos (cobertura total e cobertura do bloco de salas de aula)



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Embora exista uma recomendação para orientar todos os painéis para o norte e ajustar o ângulo de inclinação de acordo com a latitude do local (CORREIA, 2024; GUNERHAN; HEPBASLI, 2007), observa-se que a irradiação solar disponível para a cobertura é sempre superior a 89 %, em qualquer orientação, quando comparada a uma superfície com inclinação ótima, voltada para o Norte (CRONEMBERGER *et al.*, 2012). Por isso, justifica-se a locação de painéis em outras orientações e com inclinação diferente da latitude local (Figura 20).

Figura 20 - Diagrama de irradiação para qualquer orientação e inclinação na cidade de Brasília



Fonte: Cronemberger e Caamaño-Martín (2020).

Com o intuito de verificar a coerência dos resultados gerados pelo *Design Builder*, um pré-dimensionamento do sistema fotovoltaico foi realizado por meio de uma planilha de dimensionamento básico do Ministério de Minas e Energia (MME) (Tabela 9 e Apêndice F). Esta ferramenta faz parte do projeto RedEE para edifícios públicos, cujo objetivo é implementar ações de eficiência energética e integração de geração distribuída

(MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021). O preenchimento da planilha considerou um modelo existente no mercado¹⁴, cujo módulo possui dimensões de 2,23m por 1,13m, 555W de potência e uma eficiência de 20%. Já os dados de irradiação global horizontal (GHI) foram obtidos no site do Global Solar Atlas (THE WORLD BANK GROUP, 2024), conforme orientação do MME.

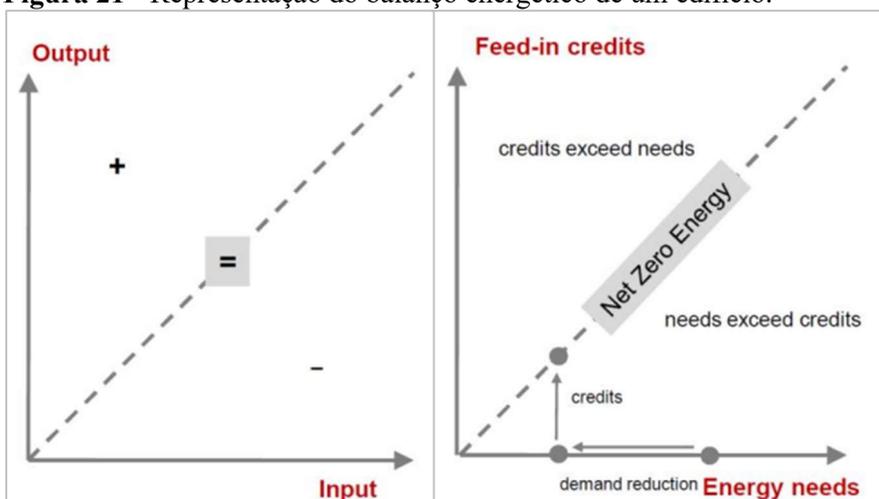
Tabela 9 – Dados de entrada da planilha de dimensionamento básico de sistemas fotovoltaicos

Irradiação global horizontal (GHI)	2002,3 kWh/m ²
Eficiência do módulo	20%
Área do módulo	2,6
Área disponível na cobertura (total)	1861m ²
Área disponível na cobertura (bloco de salas de aula)	975m ²

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O cálculo do EUI foi gerado a partir do cenário otimizado do BSAN, para a análise final do balanço energético. Foi feita uma comparação entre o consumo da edificação (cenário otimizado) e a quantidade de energia gerada pelo sistema fotovoltaico, de acordo com gráfico proposto pelo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015). Nesse gráfico, a linha tracejada representa o balanço energético nulo. Acima desses valores, o balanço é positivo e abaixo, é negativo (Figura 21).

Figura 21 - Representação do balanço energético de um edifício.



Fonte: International Energy Agency (2015), adaptado pela autora, 2024.

¹⁴ Catálogo disponível em: < https://www.dahsolarpv.com/dhm-72x10-540-555w_p179.html >. Acesso em 17.09.2024.

No âmbito do PROCEL, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) desenvolveu *benchmarks* de energia para 15 tipologias de edifícios, incluindo Instituições de Ensino Superior. Essas referências viabilizam a avaliação preliminar do desempenho de edifícios, em um cenário nacional, a fim de identificar o seu potencial de melhorias. Nesse contexto, foi realizada outra análise quanto à eficiência energética do BSAN, com base na Plataforma DEO do CBCS. Essa ferramenta possibilitou um diagnóstico simplificado do desempenho da edificação, a partir de informações como, por exemplo, características físicas, equipamentos e consumo real de energia (CBS, 2021).

3.4. Considerações finais do capítulo

Este capítulo teve por objetivo descrever o método adotado para que a presente pesquisa atinja seu objetivo de determinar o potencial ZEB do BSAN, por meio de uma análise multiobjetivo de soluções ótimas de conforto térmico e visual.

Para tanto, desenvolveu-se uma vasta consulta em artigos científicos, normas e relatórios técnicos, entre outros, dentro da temática desta dissertação. Posteriormente, foram apresentadas as características do clima de Brasília/DF e do BSAN. Os detalhes da modelagem, bem como os dados de entrada utilizados para as primeiras simulações computacionais, também foram apresentados neste capítulo.

Com base na literatura, foram descritas as variáveis adotadas para o processo de otimização multiobjetivo (parede externa, cobertura, sombreamento, PAF, tipo de vidro e orientação) e as configurações para a utilização de um algoritmo genético em suas simulações. Por fim, a etapa final do método demonstrou que a simulação computacional também pode ser utilizada para comparar o consumo da edificação com a quantidade de energia gerada pelo sistema fotovoltaico para, com isso, avaliar o balanço energético da edificação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da pesquisa. Uma parte deles é decorrente da revisão da literatura e a outra é resultante das simulações computacionais desenvolvidas, que serão detalhadas a seguir.

Inicialmente, com o intuito de estabelecer uma base teórica-conceitual da temática de pesquisa, desenvolveu-se o artigo “Do paradigma internacional aos desafios de implementação dos *zero energy buildings* no Brasil: uma revisão da literatura” (Apêndice A). Este artigo foi apresentado, em 2023, no XVII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC) e buscou explorar o panorama dos ZEBs, a partir de uma análise do contexto brasileiro e das jurisdições mais influentes nesse tipo de edificação. Além disso, os principais desafios para o desenvolvimento de projetos ZEB no Brasil também foram abordados nesse trabalho. Dentre eles, é possível destacar, como os mais relevantes, a falta de definição quanto ao conceito de ZEB, o papel dos usuários no desempenho energético da edificação, bem como os desafios tecnológicos e econômico-financeiros.

Adicionalmente, são apresentados os resultados decorrentes das simulações computacionais, que abarcam os estudos sobre o cenário base e otimizações, com suas respectivas análises de conforto e demanda energética. Por fim, é apresentada a geração de energia fotovoltaica e a análise do balanço energético.

4.1. Resultado do caso base

As primeiras simulações do BSAN possibilitaram traçar o perfil do cenário base e identificar o percentual de horas de conforto (POC) do bloco das salas de aula, no térreo e no primeiro pavimento (Figura 22), bem como de cada sala de aula (Figura 23 e Apêndice B).

O mês de fevereiro é o mais quente e apresenta, apenas, 15% de conforto no primeiro pavimento e 32% no térreo. Em contraste, o mês de junho apresentou o maior POC, com 80% de conforto no primeiro pavimento e 73% no térreo (Figura 22). Entretanto, esses valores ainda não atingem a recomendação da INI-C, que estabelece o mínimo de 90% das horas ocupadas em conforto, para edifícios ventilados naturalmente (INMETRO, 2021).

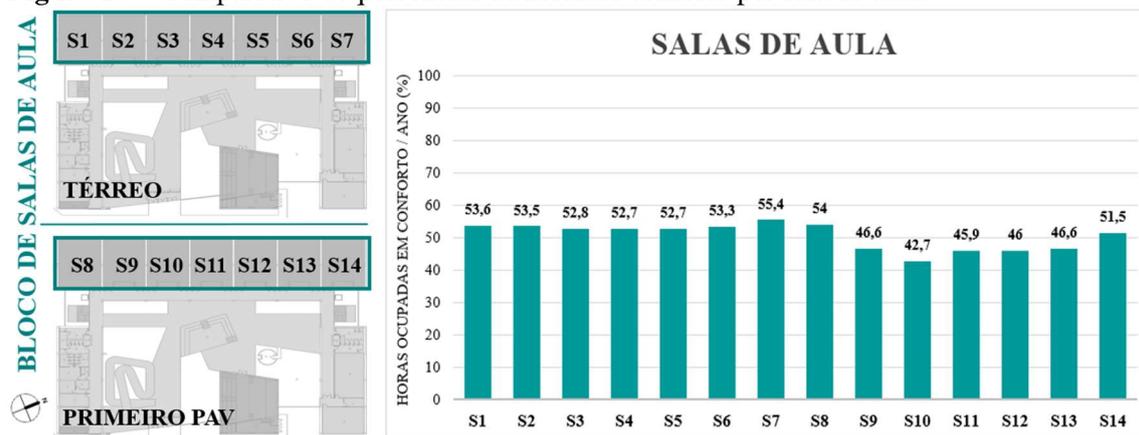
Figura 22 – Percentual de horas de conforto do bloco de salas de aula



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A Figura 23 apresenta um comparativo do percentual de horas de conforto anual, de todas as sala de aula (térreo e primeiro pavimento). A imagem mostra, na parte esquerda, a localização das salas de aula, aqui representadas pela letra S. Os resultados mostram que a sala 10 foi a que obteve o menor grau de conforto, com 42,7% de POC, enquanto a sala 7 apresentou o maior índice, com POC de 55,4%. A média dos valores entre todas as salas demonstra um número expressivo de horas em desconforto por calor, com POC médio de 53,5%, para o térreo e 47,6%, para o primeiro pavimento. Essa redução no conforto do primeiro pavimento, quando comparado ao térreo, pode ser justificada devido a presença de aberturas maiores no andar superior e, conseqüentemente, à maior incidência de irradiação solar.

Figura 23 – Comparativo do percentual de horas de conforto por sala de aula.



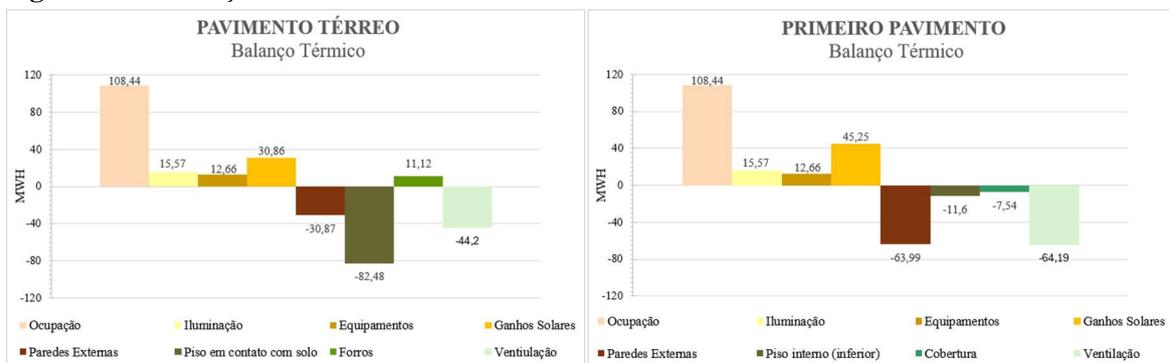
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Para aprofundar a compreensão do comportamento térmico do edifício, foi estimado o seu balanço térmico anual. Nesta análise verifica-se que as cargas térmicas internas são as principais responsáveis pelos ganhos de calor. A ocupação representa a

maior fonte térmica, seguida do ganho solar transmitido diretamente pelos vidro¹⁵, pela iluminação e pelos equipamentos. Adicionalmente, o pavimento térreo também recebe uma pequena parcela de calor proveniente do forro (Figura 24).

Em relação às perdas térmicas, o pavimento térreo apresenta uma perda significativa de calor para o solo, enquanto o primeiro pavimento demonstra uma pequena redução térmica por meio da cobertura. A perda de calor pelas paredes pode ser atribuída à presença de brises (Figura 9 e 11) ao longo de toda a fachada do bloco de salas de aula. A estratégia da ventilação natural¹⁶ também desempenha um papel relevante na dissipação de calor, particularmente no primeiro pavimento, que possui aberturas maiores (Figura 24).

Figura 24 – Balanço térmico do bloco de salas de aula.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

4.2. Resultados da otimização com o uso de algoritmo

Na literatura, é possível encontrar vários estudos de otimização por meio de algoritmo, relacionados ao conforto térmico (CHEN *et al.*, 2021; LOTFI; HASSAN, 2024; VUKADINOVIĆ *et al.*, 2021 e ZHAO; DU, 2020). Nesta pesquisa, esses resultados estão representados em um gráfico de Pareto. Esse diagrama permite tanto a identificação dos cenários ótimos quanto a avaliação da influência das variáveis propostas em relação aos objetivos da otimização. Dessa forma, o desempenho das variáveis é considerado representativo, apenas, para as condições estabelecidas nesta pesquisa.

Os resultados da otimização mostraram que as paredes e coberturas têm influência no conforto térmico (distribuição vertical dos cenários), enquanto os brises, o tipo de vidro

¹⁵ O *Design Builder* considera “o fluxo total de calor para a zona a partir do envidraçamento, da estrutura e da divisória do envidraçamento externo por meio da condução, excluindo a radiação solar de ondas curtas transmitida, que é contabilizada nos ganhos solares de janelas externas” (DESIGN BUILDER HELP, 2024).

¹⁶ O *Design Builder* usa o método *EnergyPlus Airflow Network* para calcular as taxas de fluxo de ar, com base nas aberturas das janelas e na diferença de pressão entre o exterior e o interior do ambiente (DESIGN BUILDER HELP, 2024).

e o PAF (distribuição horizontal dos cenários) estão relacionados com a redução do uso de luz elétrica (Apêndice C).

No que diz respeito ao conforto térmico, a parede de bloco de concreto, em conjunto com a cobertura fria, foram as maiores contribuições para a redução do calor. Em contraste, a parede dupla com isolamento e a telha sanduíche apresentaram os piores desempenhos.

Quanto aos tipos de vidro, a alteração da transmissão luminosa de fração visível (TVIS) demonstrou relevância na análise do conforto visual (Apêndice C). Os vidros com 85% e 69% de TVIS apresentaram os melhores resultados, seguidos pelos vidros com 58% e 39% de TVIS. O brise, cujo ângulo interno de sombreamento (α) é igual a 47° , foi o mais eficaz para o desempenho da luz natural, enquanto o brise com α igual a 75° , foi o menos favorável. Além disso, observou-se a predominância do PAF igual a 55% em grande parte das gerações, seguido pelas demais opções, de forma pouco expressiva.

Com relação à orientação das fachadas, os resultados foram heterogêneos e não foi possível determinar uma opção que melhor atendesse aos objetivos, embora a orientação Noroeste tenha demonstrado uma leve vantagem no fornecimento de luz natural (Apêndice C).

Considerando-se a combinação dessas estratégias, a análise dos resultados de otimização identificou treze cenários ótimos na fronteira de um gráfico de Pareto (Figura 25). Entre essas combinações, todas incluíram o uso de paredes de bloco de concreto e cobertura fria. Já as outras variáveis (sombreamento, PAF, tipo de vidro e orientação), se alternaram entre as demais combinações. Ademais, notou-se uma predominância de fachadas com percentuais de abertura iguais a 25% e a 45%, de vidros com fator solar igual 85% e TVIS igual 85%, bem como a orientação para o Sul (180°) e o brise com ângulo de 47° (Tabela 10 e Apêndice C).

Entre estas combinações, as cinco mais próximos do vértice (zero) do gráfico foram selecionados para a etapa seguinte, por representarem o melhor desempenho em relação aos objetivos de otimização (Figura 25). Na Tabela 10 é possível visualizar todos os cenários ótimos da frente de Pareto, entre os quais estão destacados, em verde, aqueles que seguirão para a próxima fase.

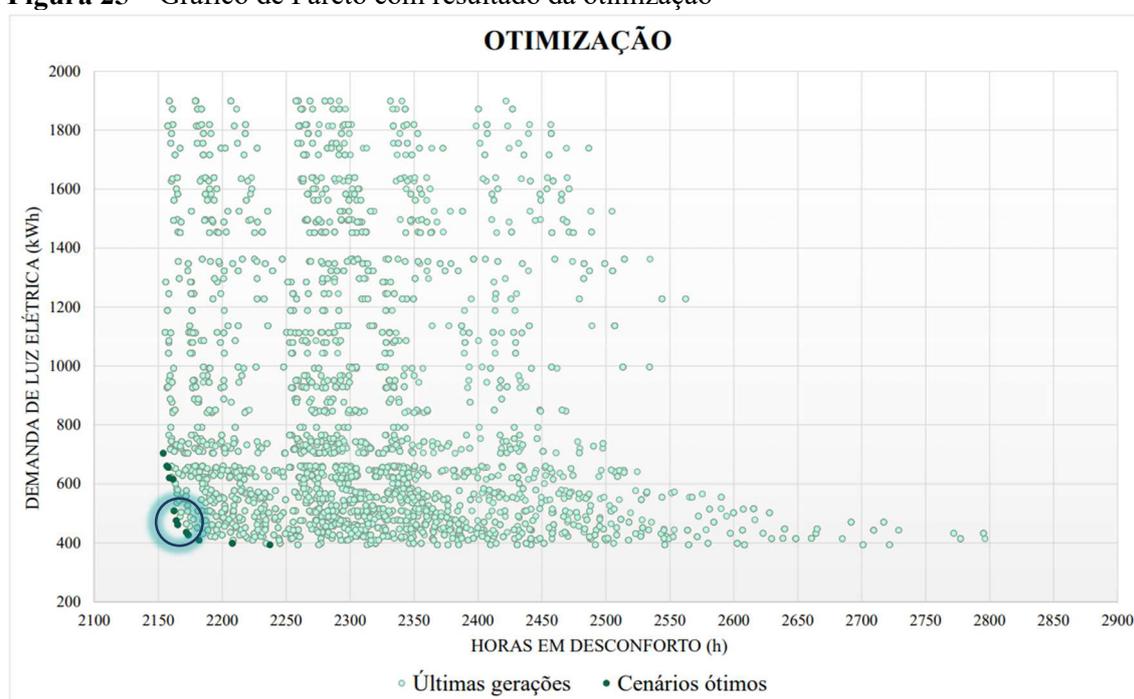
Tabela 10 - Cenários ótimos e suas variáveis

OBJETIVO		VARIÁVEIS					
Horas de desconforto (h)	Demanda de luz elétrica (kWh)	Cobertura	Parede externa	PAF	Tipo de vidro	Orientação	Brise
2153,83	704,19	Cobertura fria	Bloco concreto	35%	FS 35 / TVIS 39	180°	$\alpha: 47^\circ$
2156,67	660,61	Cobertura fria	Bloco concreto	45%	FS 35 / TVIS 39	315°	$\alpha: 65^\circ$

2157,83	655,70	Cobertura fria	Bloco concreto	25%	FS 35 / TVIS 39	225°	α : 47°
2158,67	620,10	Cobertura fria	Bloco concreto	45%	FS 35 / TVIS 39	315°	α : 55°
2161,5	615,77	Cobertura fria	Bloco concreto	25%	FS 85 / TVIS85	180°	α : 65°
2162,33	508,18	Cobertura fria	Bloco concreto	45%	FS 50 / TVIS 58	180°	α : 47°
2164,00	475,42	Cobertura fria	Bloco concreto	45%	FS 50 / TVIS 58	225°	α : 47°
2165,17	461,32	Cobertura fria	Bloco concreto	25%	FS 67 / TVIS 69	180°	α : 47°
2171,83	435,77	Cobertura fria	Bloco concreto	25%	FS 67 / TVIS 69	225°	α : 47°
2173,33	426,68	Cobertura fria	Bloco concreto	25%	FS 85 / TVIS 85	180°	α : 47°
2181,83	408,85	Cobertura fria	Bloco concreto	25%	FS 85 / TVIS 85	225°	α : 47°
2207,83	398,43	Cobertura fria	Bloco concreto	35%	FS 85 / TVIS 85	270°	α : 47°
2237,17	393,10	Cobertura fria	Bloco concreto	55%	FS 85 / TVIS 85	315°	α : 47°

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 25 – Gráfico de Pareto com resultado da otimização



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

4.3. Resultados da análise de desempenho das soluções ótimas

A primeira parte da análise de desempenho das soluções ótimas foi conduzida a partir dos cinco cenários ótimos, selecionados na etapa anterior. Nesses casos, as combinações ideais das estratégias bioclimáticas foram aplicadas ao bloco de salas de aula, com o objetivo de investigar as alterações no conforto térmico. Além disso, o uso de ar-condicionado foi inserido para compensar as horas em desconforto por calor. Todos os cenários foram comparados com o caso base (Tabela 11 e Apêndice D).

Tabela 11 - Cenários ótimos

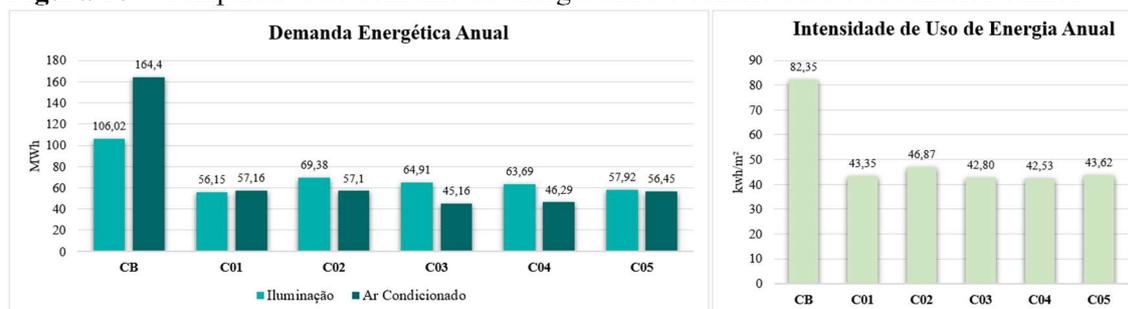
CENÁRIOS	VARIÁVEIS							
	Cobertura	Parede externa	PAF	Tipo de vidro	Orientação	Brise	Controle de iluminação	Ar-condicionado
CB	Telha metálica	Tijolo cerâmico	45%	FS85 TVIS85	254°	α : 47°	Não	Salas de aula COP: 3.78
C01	Cobertura fria	Bloco concreto	25%	FS67 TVIS69	225°	α : 47°	Salas de aula	Salas de aula COP: 5.5
C02	Cobertura fria	Bloco concreto	25%	FS67 TVIS69	180°	α : 47°	Salas de aula	Salas de aula COP: 5.5
C03	Cobertura fria	Bloco concreto	45%	FS50 TVIS58	180°	α : 47°	Salas de aula	Salas de aula COP: 5.5
C04	Cobertura fria	Bloco concreto	45%	FS50 TVIS58	225°	α : 47°	Salas de aula	Salas de aula COP: 5.5
C05	Cobertura fria	Bloco concreto	25%	FS85 TVIS85	180°	α : 47°	Salas de aula	Salas de aula COP: 5.5

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O consumo da edificação foi determinado por meio de simulação no *software Design Builder* e considerou a demanda energética de equipamentos, iluminação e ar-condicionado. Entre os cenários avaliados, o C01 registrou o menor consumo de energia relacionado à iluminação, o que acarretou uma economia de 52,67%. O C03, por sua vez, reduziu o uso de ar-condicionado em 27,5% (Figura 26). Em todos os casos avaliados, a demanda energética para equipamentos permaneceu constante, totalizando 61,36 MWh (Apêndice D).

Com relação ao desempenho do BSAN, a avaliação Intensidade de Uso de Energia indicou o C03 e o C04 como os mais eficientes. Ambos apresentaram resultados similares (Figura 26) e essa proximidade pode ser justificada pela aplicação das mesmas estratégias, exceto pela orientação do edifício, que foi de 180° no cenário C03 e de 225° no cenário C04. Os dois casos apresentaram a menor demanda de energia, com uma redução aproximada de 51%, em relação ao cenário base. Por outro lado, os resultados da simulação indicaram valores muito próximos de EUI para os cenários otimizados, o que demonstra que todos eles apresentaram um bom desempenho energético.

Figura 26 – Comparativo de consumo de energia entre o cenário base e os cenários ótimos.

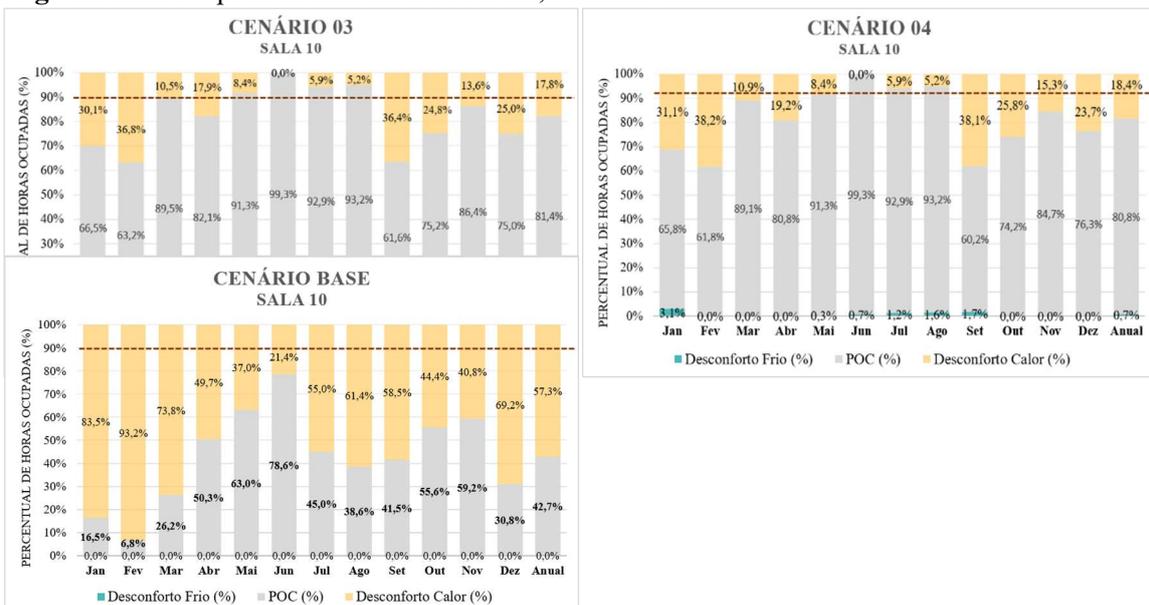


Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Em geral, todos os cenários ótimos apresentaram uma redução expressiva no consumo de energia, em torno de 58% para iluminação e 31% para o ar condicionado, reflexo das melhorias na envoltória e do aumento da eficiência das máquinas de ar condicionado. Contudo, optou-se por verificar o percentual de horas de conforto nos cenários que apresentaram o melhor desempenho energético, particularmente, o C03 e o C04. Além disso, essa análise foi centrada na Sala 10, que apresentou o pior POC, no cenário base.

Os cenários escolhidos demonstraram resultados bem semelhantes, já que a única diferença entre os dois é a orientação. Enquanto o C03 está orientado para o sul, o C04 está voltado para o sudoeste. Nesse contexto, ambos apresentaram uma melhoria de, aproximadamente, 50% no POC anual. Além disso, nos meses de maio a agosto, os cenários C03 e C04 atenderam à meta da INI-C, com POC acima de 90% (INMETRO, 2022). No mês de fevereiro, o POC dos cenários ótimos foi 10 vezes maior que o do cenário base. Já no mês de junho, os níveis de conforto atingiram quase 100% dos dias (Figura 27).

Figura 27 – Comparativo do POC entre C03, C04 e CB.

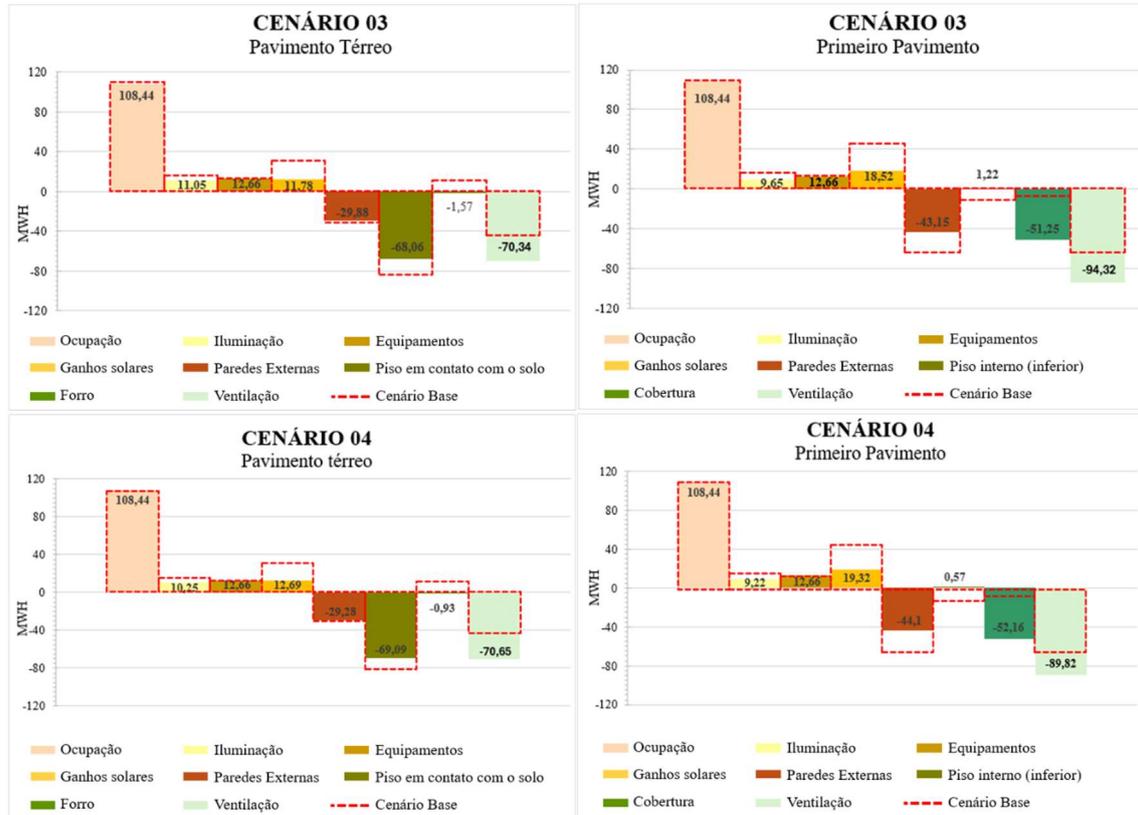


Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

No que diz respeito à análise do balanço de calor, observa-se uma redução dos ganhos térmicos de iluminação e de radiação absorvida pela janela. Isso se justifica pela adoção de um sistema automatizado de controle de iluminação e pela escolha de um vidro com fator solar maior, que impede a passagem de uma parte da radiação externa. Em todos os casos, a ventilação e a cobertura também contribuíram para minimizar os ganhos de calor. Por outro lado, as paredes externas e o pisos apresentaram redução das perdas. Além

disso, os ambientes do pavimento térreo também passaram a perder calor pelo forro (Figura 28).

Figura 28 - Balanços de calor dos cenários C03 e C04 com indicação comparativa ao cenário base.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

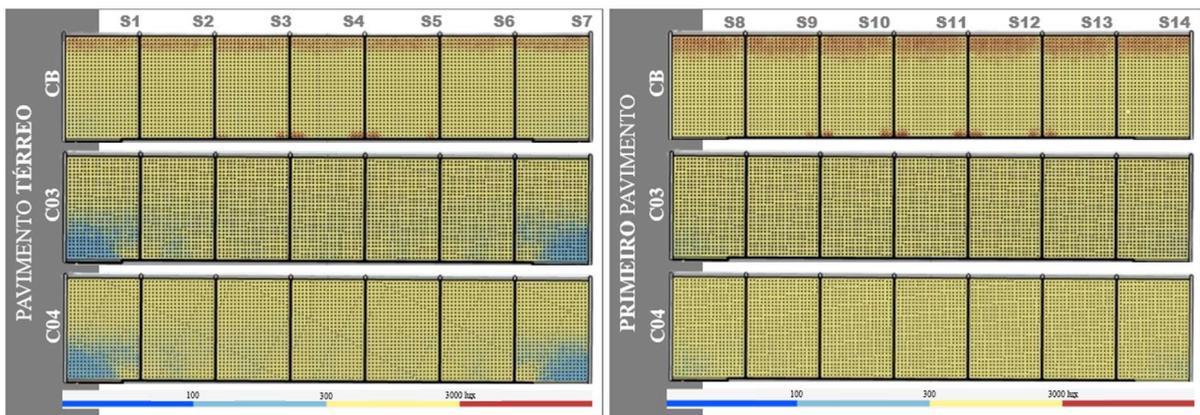
A segunda parte, da análise de desempenho das soluções ótimas, trata da avaliação do conforto visual do bloco de salas de aula. Nesse sentido, as condições lumínicas apresentadas no cenário base foram comparadas com os cenários 03 e 04, que apresentaram o melhor desempenho na etapa anterior (Apêndice E).

Com relação ao UDI, o CB se manteve dentro da faixa de conforto em mais de 80% do tempo. No entanto, verificou-se uma pequena área com valores acima de 3.000 lux, próxima à janela, que ocorre no período da tarde. Esta área é um pouco mais expressiva no primeiro pavimento, devido à presença de janelas maiores nestes ambientes.

Os cenários 03 e 04, em contraste, apresentaram áreas abaixo de 300 lux, nas salas das extremidades (S1, S7, S8 e S14). Essas áreas são maiores no pavimento térreo, que possui janelas menores e, portanto, menos entrada de luz. (Figura 29 e 30). Nesse contexto, quanto mais próxima da parede do fundo, menor a disponibilidade de luz ao longo do dia. As salas internas (de S2 a S6 e de S9 a S13) mostram esse *déficit* nas primeiras horas da

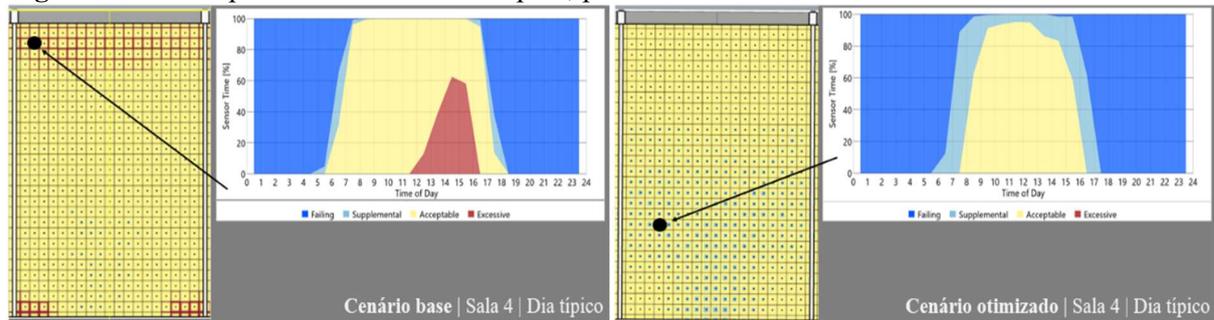
manhã, entre 6h e 7h30min, e no final da tarde, após às 16h 30min (Figura 30). Contudo, esses cenários se mantiveram dentro da faixa de conforto em mais de 65% do tempo, no pavimento térreo, e em mais de 75% do tempo no primeiro pavimento (Apêndice E). Esta porcentagem está alinhada com as diretrizes da NBR 15215-4 que estabelece que os valores entre 300 lux e 3.000 lux sejam mantidos em, pelo menos 50% do tempo, durante o horário de ocupação (ABNT, 2023).

Figura 29 - Comparação dos resultados de *Useful Daylight Illuminances*, no bloco de salas de aula, para CB, C03 e C04.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

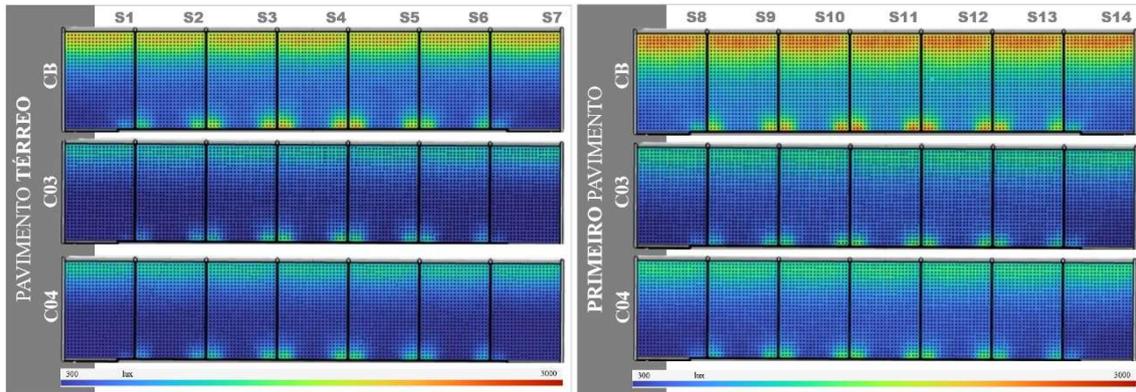
Figura 30 – Exemplo de UDI em um dia típico, para cenário base e cenários otimizados



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

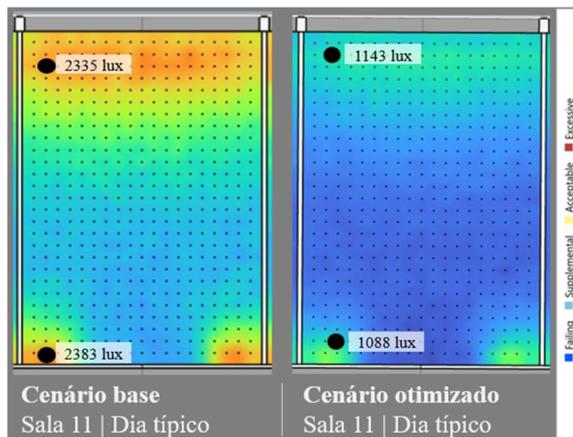
No mapa de iluminância, a simulação apresenta uma média de mais de 900lux para as salas de aula do CB. Já nos cenários otimizados, esse valor cai para 500 lux, aproximadamente. Em todos os casos a iluminância do pavimento térreo é um pouco mais expressiva, devido à presença de janelas maiores (Figura 31). No cenário base, observa-se valores de iluminância por volta de 2.000 lux nas áreas próximas às janelas e próximas à porta de entrada, que possui uma parte em vidro. Isso também ocorre nos cenários otimizados, porém, os valores ficam em torno dos 1.000 lux, no pavimento térreo, e 1.100 lux, no primeiro pavimento (Figura 32).

Figura 31 - Comparação dos mapas de iluminância, no bloco de salas de aula, para CB, C03 e C04.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 32 – Exemplo de iluminância em um dia típico, para cenário base e cenários otimizados.



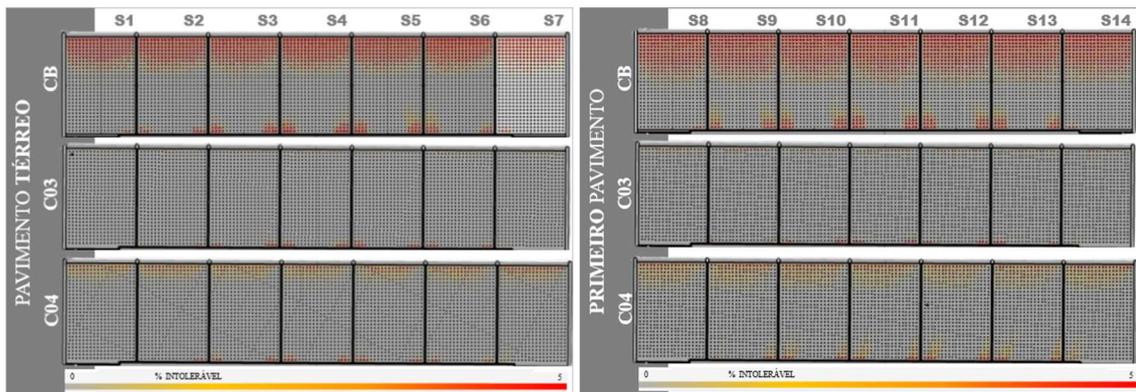
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

No que diz respeito ao ofuscamento, a simulação do *annual glare* para o CB mostra que 10,7% da área ocupada pelas salas de aula, no pavimento térreo, experimentam ofuscamento perturbador ou intolerável, durante mais de 5% das horas ocupadas. No primeiro pavimento, este número sobe para 13,7%, devido às suas grandes aberturas (Figura 33). Na Figura 34, observa-se o comportamento de um dia típico, para o CB, que demonstra uma área de ofuscamento próxima a janela, das 10h às 16h, aproximadamente.

Nos cenários otimizados, este percentual fica em torno de 1% no C04 e cai para menos de 0,5% no C03. Nesse último caso, o ofuscamento se concentra próximo à porta de entrada, no primeiro pavimento, e é praticamente inexistente nas proximidades das janelas (Figura 33). Isso demonstra a eficiência de um vidro com TVIS maior (janelas) quando comparado a um vidro simples (porta). Essa tendência é destacada na literatura (QAHTAN *et al.*, 2024; SAYED; FIKRY, 2019) que demonstra que vidros eficientes

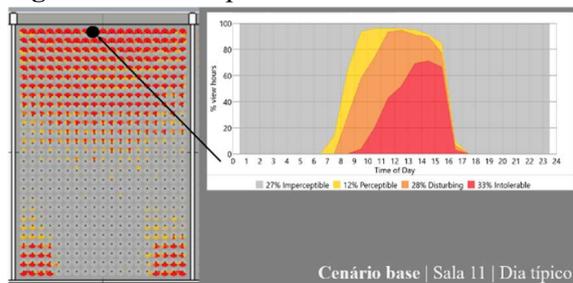
contribuem para o conforto visual. Além disso, C03 e C04 estão voltados para o Sul, o que também pode influenciar no controle do ofuscamento, uma vez que esta orientação recebe uma radiação solar menor, quando comparada ao CB. Wang e coautores (2024) concordam que a orientação das aberturas têm efeitos relevantes no desempenho da luz natural, particularmente quanto à redução do ofuscamento. Nesse contexto, os cenários otimizados se mostraram alinhados com a NBR 15215-3, que não permite ofuscamento intolerável em mais de 5% do tempo de ocupação dos ambientes (ABNT, 2024).

Figura 33 - Comparação dos resultados de *Annual Glare*, no bloco de salas de aula, para CB, C03 e C04.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Figura 34 – Exemplo de *Annual Glare* em um dia típico, para o cenário base.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

De uma forma geral, C03 e C04 apresentaram resultados semelhantes de UDI. Por outro lado, com relação ao ofuscamento pela luz natural, o C03 solucionou o problema em sua totalidade e, por este motivo, foi o cenário otimizado (COT) selecionado para a próxima fase.

O cenário ótimo (COT) possui suas aberturas voltadas para o Sul. Sua envoltória é composta por paredes de bloco de concreto, cobertura fria, brises com ângulo interno igual a 47° e vidro incolor com FS de 50% e TVIS de 58%. Além disso, também está

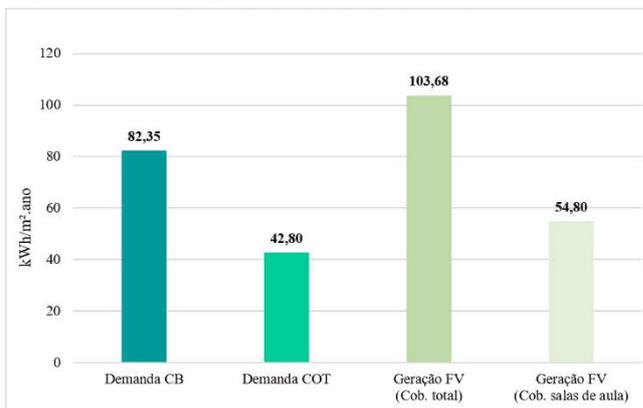
previsto controle de iluminação e ar condicionado com COP de 5,5, para as salas de aula (Apêndice D).

4.4. Resultados da geração de energia fotovoltaica e do balanço energético

Os sistemas fotovoltaicos podem ser impactados negativamente por altas temperaturas, como as que são recorrentes no clima brasileiro (CORREIA, 2024), ao passo em que elevam o calor sensível que é liberado para o ambiente. Por isso, aumentar o albedo das coberturas sobre as quais esses sistemas são instalados, contribui para a redução da temperatura ao redor dos módulos e para o aumento da radiação refletida, que é recebida por eles. Conseqüentemente, também ocorre o aumento do desempenho do sistema e da geração de energia (VASILAKOPOULOU *et al.*, 2023). Nesse contexto, a cobertura fria adotada pelo cenário otimizado se mostra mais vantajosa em relação à cobertura metálica do cenário base.

No que tange à geração de energia fotovoltaica, foram realizadas duas simulações: uma que considerou a locação dos módulos em toda a área de telhado disponível e outra que adotou, apenas, a cobertura do bloco de salas de aula para este fim. Enquanto no primeiro caso, a geração resultou em 103,68 kWh/m², no segundo caso, foi de 54,8 kWh/m² (Figura 36).

Figura 35 – Comparativo entre demanda energética e geração fotovoltaica.

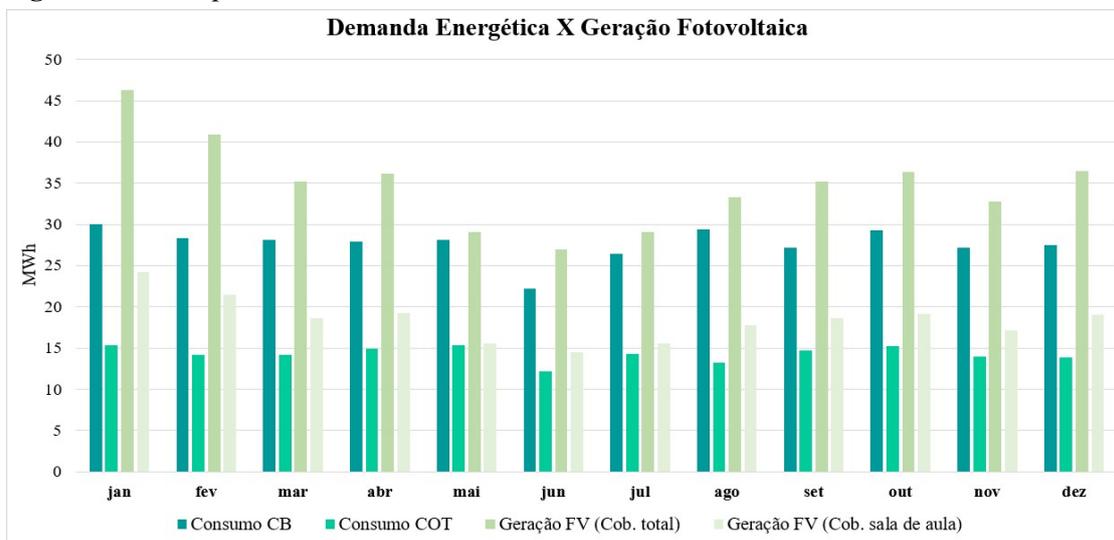


Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Além disso, observa-se que o uso total da cobertura para a locação dos módulos fornece energia suficiente tanto para a demanda do cenário base (CB), quanto do cenário otimizado (COT). Por outro lado, quando a geração de energia é limitada à área da

cobertura do bloco de salas de aula, observa-se que a apenas o COT tem sua demanda energética atendida (Figura 36 e 37).

Figura 36 – Comparativo mensal



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Como forma de validação dos resultados gerados pelo *Design Builder*, foi feito um pré-dimensionamento do sistema fotovoltaico com a planilha de dimensionamento básico do MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021) (Apêndice F). Uma vez preenchidos os dados de entrada, essa ferramenta disponibiliza as informações básicas do sistema. Assim, quando comparados aos valores fornecidos pelo *software*, observa-se uma proximidade aos valores fornecidos pela planilha (Tabela 12). Portanto, consideram-se aceitáveis os valores fornecidos pela simulação, para a análise de balanço energético.

Tabela 12 – Comparativo entre a geração de energia fotovoltaica fornecida pelo *Design Builder* e pela planilha de dimensionamentos básicos do MME

Área disponível	Geração FV <i>Design Builder</i>	Geração FV Planilha MME
Cobertura total	417,71 MWh	416,93MWh
Cobertura do bloco de salas de aula	220,79 MWh	218,85 MWh

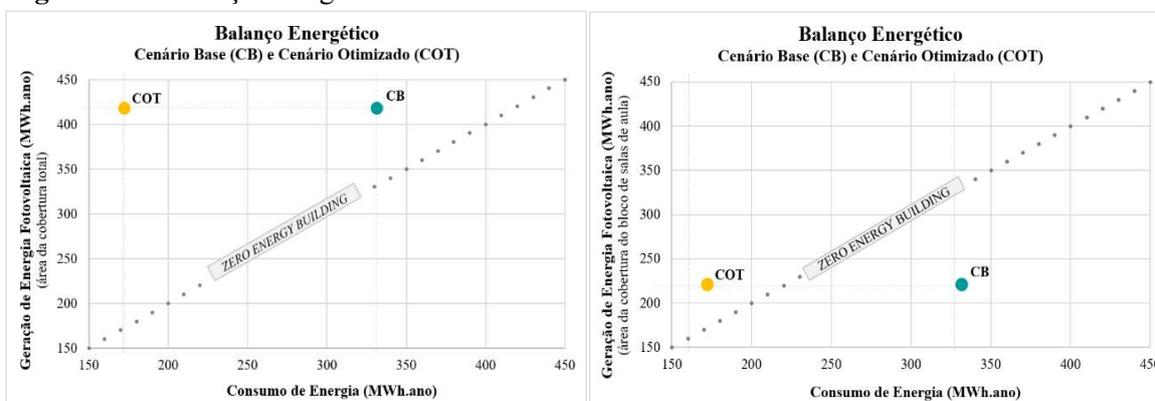
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Nesse contexto, os resultados da simulação mostram a existência de um balanço positivo tanto para CB quanto para o COT, quando o sistema fotovoltaico ocupa toda a área disponível no telhado do BSAN. Para esta pesquisa, esse balanço positivo representa uma contribuição para toda a Universidade, uma vez que pode fornecer a energia excedente para o *campus*. Porém, quando a área livre para a locação dos módulos é reduzida à

cobertura do bloco de salas de aula, observa-se que o CB não atinge o balanço energético nulo, enquanto o COT caracteriza um balanço positivo (Figura 38). Isso evidencia a importância das estratégias passivas e ativas para a redução do consumo de energia e demonstra que o conceito de ZEB pode ir além da escala dos edifícios.

Essas descobertas estão alinhadas com pesquisas anteriores (EMIL; DIAB, 2021; MATANA JÚNIOR; FRANDOLOSO; BRIÃO, 2023; MUNGUBA *et al.*, 2024), baseadas em simulação computacional, que sugerem o alcance de balanço energético nulo, ou quase nulo, em edifícios universitários a partir de melhorias na envoltória e da implementação de um sistema de geração fotovoltaica.

Figura 37 – Balanço Energético do cenário otimizado e do cenário base.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Uma outra forma de avaliar o desempenho de uma edificação pode ser desenvolvida pelo uso de *benchmarks* de energia (QUEVEDO; GERALDI; MELO, 2023). Sob essa ótica, a plataforma de cálculos DEO (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2021a), do CBCS, foi utilizada para diagnosticar o desempenho do BSAN (Apêndice G), tanto do CB quanto do COT, em relação ao *benchmark* nacional para IES (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2021b). Segundo essa ferramenta, ambos os casos apresentaram um desempenho considerado eficiente (Figura 39). Contudo, as simulações anteriores demonstraram índices elevados de desconforto por calor e de ofuscamento nas salas de aula do CB, o que demonstra que uma edificação eficiente energeticamente, não necessariamente atende às demandas de conforto do usuário. Além disso, quando comparado à EUI média nacional de 63,2 kWh/m²/ano (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2021b), observa-se que o CB está 21,5% acima dessa média, enquanto o COT está 36% abaixo.

Figura 38 – Intensidade do uso de energia, segundo a plataforma de cálculo do CBS



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Nesse cenário, Geraldi e Ghisi (2020) avaliaram o desempenho energético real dos edifícios escolares no Brasil e associaram a EUI com o nível de satisfação ambiental dos usuários. Assim, os maiores índices de satisfação com a temperatura do ambiente apresentaram EUI expressivamente maior, devido ao uso de sistemas de ar-condicionado. Para o estoque de prédios escolares analisado, o índice de “muito satisfeito” variou a EUI dentre 93,08 kWh/ano e 122,20 kWh/ano. Já o indicativo de “pouco satisfeito” variou entre 63,18 kWh/ano e 72,55 kWh/ano.

Com relação a IES, Quevedo, Geraldi e Melo (2023) argumentam sobre o desafio de estabelecer um referencial de consumo de energia para edifícios universitários, tendo em vista os diferentes tipos de espaço, atividades e padrões de ocupação que os *campi* podem ter. Essas lacunas também se enquadram nas limitações desta dissertação. A plataforma de cálculos do CBCS utilizada não diversifica as possibilidades de uso de uma IES e considera a mesma densidade de potência para todos os ambientes. Por isso, os autores sugerem que seja desenvolvido um modelo de *benchmark* para cada tipo de espaço, considerando múltiplos arquétipos para representar melhor a diversidade de um *campus* universitário.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O elevado consumo de energia dos *campi* universitários encontra nos ZEB, uma estratégia promissora capaz de proporcionar conforto aos usuários com baixa demanda energética. Para tanto, o projeto de um edifício eficiente quer a otimização de cenários diversos a fim de encontrar a solução ideal. Nesse contexto, os resultados desta pesquisa decorrem de simulações computacionais de otimização, cujo recorte é um bloco de salas de aula, edifício com potencial replicador em ambientes universitários.

Inicialmente, buscou-se traçar o perfil do cenário base, com relação ao conforto térmico. Identificou-se um valor excessivo de horas em desconforto por calor, cuja média anual foi de 53,5 %, para o POC do térreo, e de 47,6 % para o primeiro pavimento. Mesmo no mês de junho, que apresentou as melhores taxas de conforto térmico, não foi possível atingir os valores recomendados pela INI-C. Além disso, pela análise do balanço térmico, foi possível identificar que as cargas térmicas internas são as principais responsáveis pelos ganhos de calor.

Os resultados da otimização com o uso de algoritmos apontaram 13 cenários ótimos, entre os quais cinco foram selecionados (C01, C02, C03, C04 e C05) para dar continuidade à pesquisa. Complementarmente, o uso de ar-condicionado foi inserido para compensar as horas de desconforto por calor. Nesse contexto, todos os cenários ótimos apresentaram uma redução expressiva no consumo de energia, reflexo das melhorias na envoltória, da melhoria do COP das máquinas e do aumento do conforto dos ambientes. Enquanto o C01 apresentou o menor consumo de iluminação artificial, com redução de 52,67 %, o C03 reduziu o uso de ar-condicionado em 27,5 %. A demanda energética para equipamentos foi a mesma para todos os casos. Com relação ao desempenho energético, o C03 e o C04 apresentaram resultados similares, com uma redução aproximada de 51 %, em relação ao cenário base.

A Sala 10 foi escolhida para proceder à análise do conforto térmico nos cenários de melhor desempenho energético (C03 e C04). Ambos os casos demonstraram resultados bem semelhantes, uma vez que a única diferença entre os dois é a orientação. A implementação das estratégias bioclimáticas acarretou e uma melhoria de 50%, no POC anual. Nos meses de maio a agosto, esses cenários atenderam à meta da INI-C, com POC acima de 90% (INMETRO, 2022). Além disso, no mês de fevereiro, o POC dos cenários

ótimos foi 10 vezes maior que o do cenário base, e no mês de junho, os níveis de conforto atingiram quase 100% dos dias.

No que diz respeito ao conforto visual, o UDI do CB permaneceu dentro da faixa de conforto, em mais de 80% do tempo. Contudo, identificou-se uma área próxima à janela, com valores acima de 3.000 lux, no período da tarde. O C03 e o C04 apresentaram algumas áreas abaixo de 300 lux, nas salas das extremidades. No entanto, esses cenários atenderam às diretrizes da NBR 15215-4 e se mantiveram dentro da faixa de conforto em mais de 65% do tempo, no térreo, e em mais de 75%, no primeiro pavimento.

Já com relação ao *annual glare*, o CB indicou que 10,7% da área das salas de aula, no térreo, e 13,7% no primeiro pavimento, apresentam ofuscamento perturbador ou intolerável, durante mais de 5% do tempo de ocupação, particularmente, entre 10h e 16h. Nos cenários otimizados, este percentual foi reduzido consideravelmente e apresentou esse indicador em cerca de 1%, no C04, e menos de 0,5%, no C03. Ambos os cenários estão de acordo com a NBR 15215-3, que não permite ofuscamento intolerável em mais de 5% do tempo de ocupação dos ambientes.

Diante disso, o C03 foi o cenário otimizado considerado para a análise de balanço energético. Para esse caso, a combinação de estratégias inclui aberturas voltadas para o Sul, paredes de bloco de concreto, cobertura fria, brises com ângulo interno igual a 47° e vidro incolor com FS de 50% e TVIS de 58%, bem como controle de iluminação e ar-condicionado com COP de 5,5, para as salas de aula.

A simulação da geração de energia fotovoltaica considerou, inicialmente, a locação dos módulos em toda a área disponível de telhado e, depois, apenas na área da cobertura do bloco de salas de aula. Os resultados mostraram que a ocupação de toda a área disponível na cobertura do BSAN fornece energia suficiente tanto para a demanda do CB, quanto do COT. Nesse sentido, observa-se um balanço positivo para ambos. Todavia, quando a área livre para a locação dos módulos é reduzida à cobertura do bloco de salas de aula, apenas o COT apresenta um balanço positivo, uma vez que a geração de energia não foi suficiente para suprir o consumo do CB.

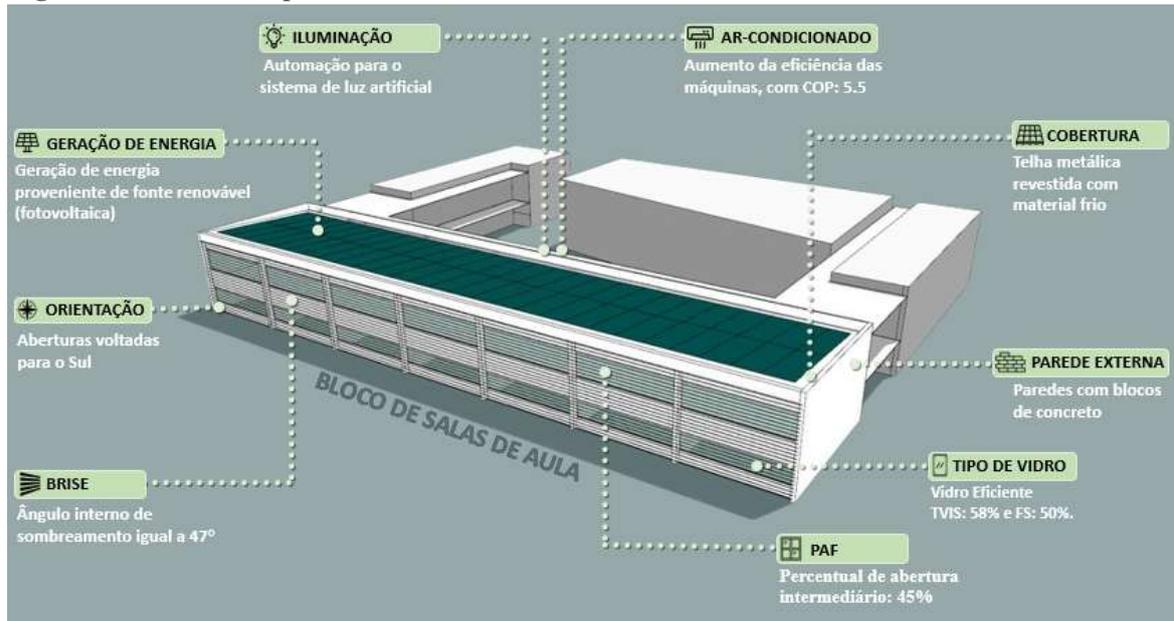
Como forma de validar os dados fornecidos pela simulação de energia, no *Design Builder*, adotou-se a planilha de dimensionamento básico do MME para realizar um pré-dimensionamento do sistema fotovoltaico. A comparação entre essas duas ferramentas mostrou uma proximidade significativa dos resultados. Por isso, considerou-se os valores fornecidos pela simulação aceitáveis, para a análise de balanço energético.

Outra forma de diagnosticar o desempenho do BSAN foi realizada por meio da plataforma de cálculos DEO, que comparou o EUI do CB e do COT com o *benchmark* de energia nacional, para IES. Segundo essa ferramenta, ambos os casos apresentaram um desempenho considerado eficiente. Porém, as simulações anteriores demonstraram índices elevados de desconforto por calor e de ofuscamento nas salas de aula do CB, enquanto o COT proporcionou conforto térmico e visual. Isso evidencia que, um edifício considerado eficiente não proporciona, necessariamente, as condições adequadas de conforto térmico e visual aos usuários.

Esta dissertação buscou investigar o impacto de diretrizes bioclimáticas para a obtenção de um ZEB, por meio de uma otimização multiobjetivo. Para tanto, o uso da simulação computacional permitiu uma ampla avaliação dos parâmetros de projeto. Com base nos resultados desta pesquisa, é possível destacar as principais características para uma sala de aula ZEB, em uma IES, na cidade de Brasília-DF, e salientar os diferentes parâmetros que arquitetos e projetistas podem considerar para o desenvolvimento de o projeto de um edifício educacional (Figura 40).

Com relação às estratégias passivas, o isolamento das paredes externas e cobertura mostrou-se eficiente para o aumento do conforto térmico em todos os cenários otimizados. O direcionamento das aberturas das salas de aula para o Sul contribuiu tanto para minimizar o calor absorvido pela envoltória, quanto para a redução do ofuscamento, uma vez que esta orientação recebe menos irradiação solar direta. Nesse sentido, a escolha do tipo de vidro também tem influência nesses dois fatores. Enquanto o uso de um fator solar mais alto contribuiu para o controle da temperatura, a transmissão luminosa de fração visível menor resultou em uma redução do ofuscamento nas salas de aula. Já no que tange às estratégias ativas, o uso de máquinas de condicionamento de ar eficientes e a integração de recursos de automação para os sistemas de iluminação, foram relevantes para melhoria do desempenho da edificação e para a redução do consumo de energia. Por fim, foi adotada a geração de energia limpa suprir a demanda energética da edificação.

Figura 39 – Diretrizes para sala de aula ZEB, em IES.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A combinação desses fatores conduziu o edifício em direção ao balanço energético nulo, com uma possível extrapolação dos resultados para o campus. Nesse cenário, destaca-se a importância de se reduzir o consumo da edificação, a fim de suprir a demanda por meio de geração própria de energia. Contudo, o alcance do balanço energético nulo deve estar alinhado ao bem-estar dos usuários e proporcionar níveis adequados de conforto térmico e visual. No que tange os *campi* universitários, além de contribuir para a eficiência energética, essa meta também proporciona condições favoráveis ao aprendizado dos alunos e ao trabalho de professores e funcionários.

5.1. Limitações de pesquisa e sugestões para estudos futuros

Com relação ao cenário em que a pesquisa foi desenvolvida, destacam-se algumas limitações. Inicialmente, o *Grasshopper* e os *plugins* do *Ladybug Tools* foram os *softwares* adotados para as simulações computacionais, o que resultou em muitos desafios. Entre eles, é possível destacar sua complexidade de operação e a necessidade de treinamentos adicionais para operação dessa ferramenta. Ademais, o tempo médio gasto com cada simulação de, aproximadamente 1 hora e 40 minutos, é algo que poderia inviabilizar o desenvolvimento da pesquisa, na etapa de otimização multiobjetivo. Sendo assim, optou-se por dar continuidade às simulações com o uso de outro software, o *Desing Builder*, cuja interface de operação é mais amigável e o tempo de simulação é menor.

Outra limitação diz respeito a dificuldade de levantar dados e informações de todos os equipamentos elétricos e lâmpadas existentes no BSAN. Além disso, a UNB não dispõe de conta de energia individualizada, por edifício. Por isso, os dados de consumo de energia foram levantados com base não simulações computacionais e não puderam ser validados *in loco*.

Além disso, propõe-se alguns aspectos que podem ser aprofundados em estudos futuros:

- Reproduzir essa análise em mais zonas bioclimáticas e, com isso, indicar estratégias a nível nacional;
- Introduzir dados de levantamento *in loco* para auxiliar na calibragem do modelo;
- Desenvolver uma análise estatística como forma de avaliar o impacto de cada parâmetro e determinar os mais relevantes;
- Realizar um estudo comparativo de otimização entre outros edifícios do *campus* da Universidade de Brasília;
- Levantar os benefícios econômicos, sociais e ambientais de um ZEB e analisar seu custo-benefício.
- Avaliar a viabilidade econômica da solução encontrada para diferentes contextos bioclimáticos.
- Observar o comportamento da solução encontrada em climas futuros, para diferentes zonas bioclimáticas e avaliar sua viabilidade econômica.
- Explorar outras fontes de energia renovável, além da fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

- ABDOU, N. *et al.* Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco. **Building and Environment**, v. 204, n. 108141, 2021.
- ABDUL-ZAHRA, Amar S.; AL JUBORI, Ayad M. Potential evaluation and analysis of near-to-net zero energy building in hot and dry climate. **Energy Conversion and Management**, v. 12, n. 100146, 2021.
- ABIDIN, Nur Izie Adiana *et al.* Energy efficiency initiatives in a campus building. **Chemical Engineering Transactions**, v. 56, p. 1–6, 2017.
- ABUGRAIN, Mohammad; ALIBABA, Halil Zafer. Optimizing Existing Multistory Building Designs towards Net-Zero Energy. **Sustainability**. v.9, n. 399, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa no 687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa no 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 02 de março de 2023.
- AGOSTINO, Delia D; PARKER, Danny. A framework for the cost-optimal design of nearly zero energy buildings (NZEBS) in representative climates across Europe. **Energy**, v. 149, n. 814, p. 814–829, 2020.
- AHMED, Asam *et al.* Assessment of the renewable energy generation towards net-zero energy buildings: A review. **Energy & Buildings**, v. 256, p. 111755, 2022.
- ALAZAZMEH, Ayman; ASIF, Muhammad. Commercial building retrofitting: Assessment of improvements in energy performance and indoor air quality. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 26, p. 100946, 2021.
- ALBATAYNEH, Aiman. Optimisation of building envelope parameters in a semi-arid and warm Mediterranean climate zone. **Energy Reports**, v. 7, p. 2081–2093, 2021.
- AL-MASRANI, Salwa M. *et al.* Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends. **Solar Energy**, v. 170, p. 849–872, 2018.
- AL-SAADY, Amani *et al.* Judicious design solutions for zero energy school buildings in hot climates. **Solar Energy**, v. 264, n. 112050, 2023.
- ALSHUWAIKHAT, Habib; ABUBAKAR, Ismaila. An integrated approach to achieving campus sustainability: assessment of the current campus environmental management practices. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 16, p. 1777–1785, 2008.
- ALYAMI, Saleh H. *et al.* Likelihood of Reaching Zero Energy Building Design in Hot Dry Climate: Saudi Arabia. **IEEE Access**, v. 9, p. 167054–167066, 2021.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Vision 2020: Producing Net Zero Energy Buildings**. 2008. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/233189786/20080226-ashraevision2020>>. Acesso em: 30 de setembro de 2024.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 90.1: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. 2021. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglefindmkaj/https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/90_1_2019_h_20201030.pdf>. Acesso em: 30 de setembro de 2024.

AMORIM, Cláudia Naves David. **Eficiência energética em edificações: ações e perspectivas para a Universidade de Brasília**. In: UNIVERSIDADE PARA O SÉCULO XXI: EDUCAÇÃO E GESTÃO AMBIENTAL NA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Brasília: Cidade Gráfica e Editora, 2011. p. 193–208.

ANDRI, Ivan; KOC, Muammer; AL-GHAMDI, Sami G. A review of climate change implications for built environment: Impacts, mitigation measures and associated challenges in developed and developing countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 83–102, 2019.

ANGUETH, Larissa *et al.* **Do Paradigma Internacional aos Desafios de Implementação dos Zero Energy Buildings no Brasil: Uma Revisão da Literatura**. In: XVII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2023, São Paulo, SP. Anais [...]. São Paulo, 2023. p. 1–10. Disponível em: <<https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/3751>>. Acesso em: 28 nov. 2023>. Acesso em: 30 de setembro de 2024.

ANNUNZIATA, Eleonora; FREY, Marco; RIZZI, Francesco. Towards nearly zero-energy buildings: The state-of-art of national regulations in Europe. **Energy**, v. 57, p. 125–133, 2013.

ARAM, Kimiya; TAHERKHANI, Roohollah; ŠIMELYTĖ, Agnė. Multistage Optimization toward a Nearly Net Zero Energy Building Due to Climate Change. **Energies**, v. 15, n. 3, 2022.

ARTMANN, N.; MANZ, H.; HEISELBERG, P. Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. **Applied Energy**, v. 84, n. 2, p. 187–201, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15215-3: Iluminação Natural - Parte 3: Procedimentos para avaliação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ATHIENITIS, Andreas; O'BRIEN, William. **Modeling, design, and optimization of net-zero energy buildings**. Berlin, Germany: Ernst & Sohn, 2015.

BAI, Jitao *et al.* A systematic design method for green buildings based on the combined system of flexible solar cells and reactors on buildings. **Building and Environment**, v. 209, p. 108657, 2022.

BAKMOHAMMADI, Parnian; NOORZAI, Esmatullah. Investigating the optimization potential of daylight, energy and occupant satisfaction performance in classrooms using innovative photovoltaic integrated light shelf systems. **Science and Technology for the Built Environment**, v. 28, n. 4, p. 467–482, 2022.

BARBHUIYA, Saadia; BARBHUIYA, Salim. Thermal comfort and energy consumption in a UK educational building. **Building and Environment**, v. 68, p. 1–11, 2013.

BATLLE, Eric Alberto Ocampo *et al.* A methodology to estimate baseline energy use and quantify savings in electrical energy consumption in higher education institution buildings: Case study, Federal University of Itajubá (UNIFEI). **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118551, 2020.

BEKELE, Michael Tesfaye; ATAKARA, Cemil. Residential Building Energy Conservation in Mediterranean Climate Zone by Integrating Passive Solar and Energy Efficiency Design Strategies. **Buildings**, v. 13, n. 1073, 2023.

BELUSSI, Lorenzo *et al.* A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. **Journal of Building Engineering**, v. 25, p. 100772, 2019.

BOGO, Amilcar *et al.* **Bioclimatologia Aplicada ao Projeto de Edificações Visando o Conforto térmico**. Núcleo de Pesquisa em Construção Departamento de Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Catarina, 1994 (Relatório de pesquisa – RP 02-1994).

BUTERA, Federico M. Zero-energy buildings: the challenges. **Advances in Building Energy Research**, v.7, p. 51- 65, 2013.

CABEZA, Luisa F.; CHÀFER, Marta. Technological options and strategies towards zero energy buildings contributing to climate change mitigation: A systematic review. **Energy and Buildings**, v. 219, 2020.

CABEZA, Luisa F.; DE GRACIA, Alvaro; PISELLO, Anna Laura. Integration of renewable technologies in historical and heritage buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 177, p. 96-111, 2018.

CAO, Xiaodong; DAI, Xilei; LIU, Junjie. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 198–213, 2016.

CARDOSO, Rafael Balbino. **Etiquetagem e eficiência energética**. 1. ed. Curitiba: Appris,

2015.

CAROLINE, Ana *et al.* Inserção de Simulação Computacional de Desempenho Ambiental de Edifícios no Processo de Projeto de Arquitetura. **Caderno PAIC**. v. 23, n. 1, p. 507–530, 2021.

CHARRON, Rémi. A Review of Low and Net-Zero Energy Solar Home Initiatives **Energy and Buildings**. v. 158, p. 616-628, 2016. 2005.

CHEN, Bin *et al.* Multiobjective optimization of building energy consumption based on BIM-DB and LSSVM-NSGA-II. **Journal of Cleaner Production**, v. 294, p. 126153, 2021.

CIELO, Daryl; SUBIANTORO, Alison. Net zero energy buildings in New Zealand: Challenges and potentials reviewed against legislative, climatic, technological, and economic factors. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 102970, 2021.

CILLARI, Giacomo; FANTOZZI, Fabio; FRANCO, Alessandro. Passive solar systems for buildings: Performance indicators analysis and guidelines for the design. **E3S Web of Conferences**, v.197, n. 02008, 2020.

CLARKE, J A; HENSEN, J L M. Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements. **Building and Environment**, p. 1–13, 2015.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. Benchmarking de Consumo de Energia: Plataforma de cálculos. 2021. Disponível em: <<https://plataformadeo.cbcs.org.br/>>. Acesso em: 30 de setembro de 2024.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Relatório de Auditorias Energéticas - Tipologia de Universidade e Instituição de Ensino Técnico**. 2021. (Projeto: ECV - PRFP 003B/2020). Disponível em: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/ee/publicacoes-e-estudos/RT2A.12_210713_final3.pdf>. Acesso em: 30 de setembro de 2024

CONTI, Paolo; SCHITO, Eva; TESTI, Daniele. Cost-Benefit Analysis of Hybrid Photovoltaic/Thermal Collectors in a Nearly Zero-Energy Building. **Energies**, v. 12, p. 1582, 2019.

COPIELLO, Sergio. Economic viability of building energy efficiency measures: a review on the discount rate. **AIMS Energy**, v. 9, n.2, p. 257–285, 2021.

CORREIA, Camila Machado de Azevedo. **Positive Energy Schools with Cool Materials and Passive Strategies: Scenarios and Perspectives for the Brazilian Context**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, 298 p. 2024.

CORREIA, Camila Machado de Azevedo; AMORIM, Cláudia Naves David; SANTAMOURIS, Mattheos. Use of passive cooling techniques and super cool materials to minimize cooling energy and improve thermal comfort in Brazilian schools. **Energy and Buildings**, v. 312, p. 114125, 2024.

COSTA, Joao Francisco Walter; AMORIM, Claudia Naves David; SILVA, Joara Cronemberger Ribeiro. Retrofit guidelines towards the achievement of net zero energy buildings for office buildings in Brasilia. *Journal of Building Engineering*, v. 32, n. 101680, 2020.

COSTA, Joao Francisco Walter; AMORIM, Claudia Naves David; SILVA, Joara Cronemberger Ribeiro. Retrofit guidelines towards the achievement of net zero energy buildings for office buildings in Brasilia. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101680, 2020.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. **Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx)**. [S. l.], 2022. Disponível em: <<http://climate.onebuilding.org>>. Acesso em: 21 out. 2021.

CRISTINO, T M et al. A comprehensive review of obstacles and drivers to building energy-saving technologies and their association with research themes, types of buildings, and geographic regions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110191, 2021.

CRONEMBERGER, Joára; CAAMAÑO-MARTÍN, Estefanía. **Irradiação solar: ferramenta de análise para o uso de energia solar fotovoltaica em edifícios no Brasil**. In: SIMULAÇÃO, AMBIENTE E ENERGIA NO ESPAÇO CONSTRUÍDO. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2020. p. 173 – 213.

CRONEMBERGER, Joara; CAAMAÑO-MARTÍN, Estefanía; SÁNCHEZ, Sergio Vega. Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes - Making the case for Brazil. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 264–272, 2012.

D'AGOSTINO, Delia; MAZZARELLA, Livio. What is a nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 200–212, 2019.

D'AMANZO, MICAELA; MERCADO, MARÍA VICTORIA; KARLEN, CAROLINA GANEM. 10 preguntas de los edificios energía cero: revisión del estado del arte. **Revista Hábitat Sustentable**, v. 10, n. 2, p. 24–41, 2020.

DEB, Kalyanmoy et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.

DESIGN BUILDER HELP. Help V7.3. [S. l.], 2024. Disponível em: <<https://designbuilder.co.uk/helpv7.3/>>. Acesso em 01 de outubro de 2024.

DÍAZ-LÓPEZ, Carmen et al. Passive action strategies in schools: A scientific mapping towards eco-efficiency in educational buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 45, n. 103598, 2022.

DÍAZ-LÓPEZ, Carmen et al. Passive cooling strategies to optimise sustainability and environmental ergonomics in Mediterranean schools based on a critical review. **Building and Environment**, v. 221, n. 109297, 2022.

DOMINGOS, Renata Mansuelo Alves. **Análise comparativa do custo-benefício de medidas de eficiência energética e geração fotovoltaica em habitações de interesse**

social. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 89p. 2020.

DOMINGOS, Renata Mansuelo Alves; GABRIEL, Elaise. Proposta de modelo Casa de Energia Zero (CEZ) de baixo padrão para Zona Bioclimática 07 com avaliação da viabilidade econômica. **E&S Engineering and Science**, v. 2, n. 9, p. 14–26, 2020.

DORNELLES, K. A. **Absortancia solar de superficies opacas: Métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e pva.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 160 p. 2008.

DORNELLES, K. A. **Biblioteca de absortância de telhas: base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios.** 2021.

EDWARDS, L; TORCELLINI, P. **A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants Contract.** National Renewable Energy Laboratory, 2002 (NREL/TP-550-30769).

ELETOBRAS. Edital de Chamada Pública - 01/2018 - NZEB Brasil - Procel Edifica. Rio de Janeiro: 2019. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjcgclclefindmkaj/https://cnm.org.br/cms/images/stories/communicacao_novo/links/13012020_Edital_Chamada_Publica_Procel_Edifica_-_NZEB_Brasil.pdf>. Acesso em: 01 de outubro de 2024.

EMIL, Fady; DIAB, Aya. Energy rationalization for an educational building in Egypt: Towards a zero energy building. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103247, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Ações para promoção da eficiência energética nas edificações brasileiras : no caminho da transição.** 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/NT%20DEA-SEE-007-2020.pdf>. Acesso em: 18 jan 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Atlas da eficiência energética no Brasil 2020: Relatório de Indicadores.** 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-556/Atlas consolidado_08_03_2021.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA. **Balanco Energético Nacional -Relatório Síntese 2022: Ano base 2021.** 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 7 jul. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética.** 2018. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT 030_2018_18Dez2018.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2021.

ENERGY STAR. **About ENERGY STAR.** Disponível em: <https://www.energystar.gov/about?s=footer>. Acesso em: 7 jul. 2021.

ESBENSEN, Torben V.; KORSGAARD, Vagn. Dimensioning of the solar heating system in the zero energy house in denmark. **Solar Energy**, v. 19, p. 195–199, 1977.

EUROPEAN COMMISSION. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council, of 19 May 2010, on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union. 2010. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0031>>. Acesso em: 25 set. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. Directive 2018/844/EU of the European Parliament and of the Council, of 30 May 2018, on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union, 2018. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2018.156.01.0075.01.ENG>. Acesso em: 25 set. 2022.

FARIA, R. C. A. *et al.* O processo de projeto de edifício de balanço energético nulo (ZEB) numa perspectiva termodinâmica. In: ARQUITETURA E URBANISMO: COMPETÊNCIA E SINTONIA COM OS NOVOS PARADIGMAS DO MERCADO. Ponta Grossa: Atena Editora, 2020. p. 101–120.

FENG, Wei *et al.* 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, p. 109303, 2019.

FERNANDEZ-ANTOLIN, Maria Mar *et al.* Passive design strategies for residential buildings in different Spanish climate zones. **Sustainability** v. 11, n. 4816, 2019.

FERREIRA, Lindomayara França; SANTANA, José Ricardo de; RAPINI, Márcia Siqueira. O setor energético no Brasil: um debate sobre a potencialidade das fontes renováveis no contexto ambiental e tecnológico. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 2, n. 49, p. 226–255, 2021.

FONSECA, Ligiana Pricila Guimarães *et al.* Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 267–288, 2017.

GARCIA, Marina da Silva *et al.* Eficiência energética e conforto térmico em edifícios universitários: a importância de uma perspectiva integrada para a adaptação aos novos tempos. **Revista da UFMG**, v. 28, n. 1, p. 148–179, 2021.

GARCIA, Marina da Silva Garcia; SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves de; REIS, Ilka Afonso. **Consumo de energia elétrica de campi universitários com edifícios de diferentes usos**. In: XVII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2023, São Paulo, SP. Anais [...]. São Paulo, 2023. p. 1–10. Disponível em: <<https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/3874/3751>>. Acesso em: 30 de setembro de 2024.

GERALDI, Matheus S.; BAVARESCO, Mateus V.; GHISI, Enedir. **Entendendo o desempenho energético de escolas por meio da análise das faturas de energia: Estudo de caso em edificações da região da grande Florianópolis**. In: XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2020. Porto Alegre, RS. Anais [...]. Porto Alegre, 2020. p. 1–8. Disponível em: <<https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/835>>. Acesso em: 30 de

setembro de 024.

GERALDI, Matheus Soares; GHISI, Enedir. Mapping the energy usage in Brazilian public schools. **Energy and Buildings**, v. 224, p. 110209, 2020.

GIARETTA, R. **Avaliação do Custo-Benefício de Medidas de Eficiência Energética em Edificações de Segurança Pública em Santa Catarina Visando Retrofit para NZEB**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 149, 2022.

GINDI, Salwa El. Investigation of the Performance of Zero Energy Homes in Hot Climates. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. v. 1283, n. 012012, 2024.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. **Empreendimentos GBC Zero Energy**. 2023a. Disponível em: <<https://www.gbcbrasil.org.br/certificacao/zero-energy/empreendimentos/>>. Acesso em: 18 jan. 2024.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. **GBC Brasil Zero Energy: Prédios Autossuficientes em Energia**. 2023b. Disponível em: <<https://www.gbcbrasil.org.br/certificacao/zero-energy/>>. Acesso em: 18 jan 2024.

GROULX, Mark *et al.* Community needs and interests in university–community partnerships for sustainable development. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 22, n. 1, p. 274–290, 2021.

GUPTA, Parmarth; ANAND, Sanjeev; GUPTA, Himanshu. Developing a roadmap to overcome barriers to energy efficiency in buildings using best worst method. **Sustainable Cities and Society**, v. 31, p. 244–259, 2017.

HÄCKEL, B.; PFOSSER, S.; TRÄNKLER, T. Explaining the energy efficiency gap - Expected utility theory versus cumulative prospect theory. **Energy Policy**, v. 111, p. 414–426, 2017.

HARKOUSS, Fatima; FARDOUN, Farouk; BIWOLE, Pascal Henry. Optimization approaches and climates investigations in NZEB - A review. **Building Simulation**, v. 11, p. 923–952, 2018.

HERNANDEZ, Patxi; KENNY, Paul. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings. **Energy & Buildings**, v. 42, n. 6, p. 815–821, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Condicionadores de ar – novos índices**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/condicionadores-de-ar>>. Acesso em: 18 jan 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Portaria nº 309, de 6 de setembro de 2022**. Aprova as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais - Consolidado. 2022. Disponível em: <<http://sistema-sil.Inmetro.gov.br/rtac/RTAC002989.pdf>>. Acesso em: 18 jan 2024.

INTERNATIONAL CODE COUNCIL. **2021 International Energy Conservation Code (IECC)**. 2022. Disponível em: <<https://codes.iccsafe.org/content/IECC2021P1/preface>>. Acesso em: 18 jan 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy efficiency requirements in building codes: Policies for new buildings**. 2008 (IEA Information Paper). Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-requirements-in-building-codes-policies-for-new-buildings>> Acesso em: 01 de outubro de 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Net Zero Energy Solar Buildings: SHC Position Paper**. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2015. (Task 40 - EBC Annex 52). Disponível em: <<https://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/IEA-SHC-NZEB-Position-Paper.pdf>>. Acesso em: 1 ago. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2021**. Paris, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>>. Acesso em: 18 jan 2024.

IQBAL, M. A feasibility study of a zero energy home in Newfoundland. **Renewable Energy**, v. 29, p. 277–289, 2004.

JAYSAWAL, Rajan Kumar et al. Concept of net zero energy buildings (NZEB) - A literature review. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 11, p. 100582, 2022.

Jl, Yingbo *et al.* Improving the performance of prefabricated houses through multi-objective optimization design. **Journal of Building Engineering**, v. 84, n. 108579, 2024.

JIA, Xueying *et al.* 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.

KALANGOS, Constantine. Barriers and policy drivers to energy efficiency in energy intensive turkish industrial sectors. **International Journal of Energy Economics and Policy** v. 7, n. 3, p. 110–120, 2017.

KAPSALAKI, M.; LEAL, V.; SANTAMOURIS, M. A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 765–778, 2012.

KAUARK, F. da S.; MEDEIROS, F. C.; CARLOS HENRIQUE, M. **Metodologia da pesquisa: um guia prático**. Itabuna: Via Litterarum, 2010.

KEELER, M.; VAIDYA, P. **Fundamentos de projetos de edificações sustentáveis**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

KOCK, Renata Vieira; THEISS, Viviane; FILHO, Sergio Parizotto. Análise econômica financeira do emprego de cobertura vegetada em edifícios públicos. *Navus: Revista de Gestão e Tecnologia*, Florianópolis, v. 11, p. 01–17, 2020.

KRÜGER, Eduardo Leite; MORI, Fabiano. Análise da eficiência energética da envoltória de um projeto padrão de uma agência bancária em diferentes zonas bioclimáticas

brasileiras. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 89–106, 2012.

KWOK, Alison G.; GRONDZIK, Walter. **The green studio handbook: environmental strategies for schematic design**. 3. ed., 2018.

LABORATÓRIO DE CONTROLE AMBIENTAL. Zero Energy Brasília: Plano estratégico de eficiência energética para parque construído de balanço energético nulo. Brasília: 2023.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **NBR 15575-2021 - Desempenho térmico**. 2022. Disponível em: <<https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020>>. Acesso em: 18 jan 2024.

LAKHDARI, K.; SRITI, L.; PAINTER, B. Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions. *Building and Environment*, v. 204, p. 108173, 2021.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª edição. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2014.

LANGE SALVIA, Amanda. *et al.* Energy sustainability in teaching and outreach initiatives and the contribution to the 2030 Agenda. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, v. 21, n. 7, p. 1607–1624, 2020.

LEAL FILHO, Walter. *et al.* A comparative study of approaches towards energy efficiency and renewable energy use at higher education institutions. *Journal of Cleaner Production*, v. 237, p. 117728, 2019.

LI, Danny H W; YANG, Liu; LAM, Joseph C. Zero energy buildings and sustainable development implications - A review. *Energy*, v. 54, p. 1–10, 2013.

LINCZUK, Vinícius Cesar Cadena; BASTOS, Leopoldo Eurico Gonçalves. Otimização multiobjetivo orientada ao desempenho térmico para o projeto de edificações de baixo consumo de energia na Região Sul do Brasil. *Ambiente Construído*, v. 20, n. 4, p. 509–529, 2020.

LITARDO, Jaqueline *et al.* Energy saving strategies and on-site power generation in a university building from a tropical climate. *Applied Sciences*, v. 11, n. 2, p. 1–21, 2021.

LIU, Q.; REN, J. Research on technology clusters and the energy efficiency of energy-saving retrofits of existing office buildings in different climatic regions. *Energy, Sustainability and Society*, v. 8, n. 24, p. 1–11, 2018.

LÖHNERT, Günter; DALKOWSKI, Andreas; SUTTER, Werner. **Integrated Design Process: A guideline for sustainable and solar-optimised building design** *International*. International Energy Agency, 2003 (Task 23). Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://task23.iea-shc.org/data/sites/1/publications/IDPGuide_internal.pdf>. Acesso em: 01 de outubro de 2024.

LOHWANITCHAI, Kittisak; JAREEMIT, Daranee. 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. 9, 2021.

LOPES, A. F. O. **Da Simulação ao Projeto: avaliação de conforto térmico em ambiente escolar padronizado**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília. Brasília, 130p. 2020.

LOTFI, Yomna; HASSAN, Mennat Allah. Optimizing energy efficiency and thermal comfort of green envelope applications in hot arid climate. **Discover Applied Sciences**, v. 6, n. 2, p. 17–19, 2024.

LUO, Yongqiang et al. Towards net zero energy building: The application potential and adaptability of photovoltaic-thermoelectric-battery wall system. **Applied Energy**, v. 258, n. 114066, 2020.

MANSUELO, R. *et al.* Comparative cost-benefit analysis of the energy efficiency measures and photovoltaic generation in houses of social interest in Brazil. **Energy & Buildings**, v. 243, p. 111013, 2021.

MARSZAL, A. J. *et al.* Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 971–979, 2011.

MARSZAL, Anna Joanna, HEISELBERG, Per. Zero Energy Building—A review of definitions and calculation methodologies. **Energy and buildings**, v. 43, n. 4, p. 971-979, 2011.

MARTÍNEZ, G; PACHECO, R; ORDÓ, J. Energy efficient design of building: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 3559–3573, 2012.

MASTRAPOSTOLI, Elena et al. On the cooling potential of cool roofs in cold climates: Use of cool fluorocarbon coatings to enhance the optical properties and the energy performance of industrial buildings. **Energy and Buildings**, v. 69, p. 417–425, 2014.

MATA, É et al. A map of roadmaps for zero and low energy and carbon buildings worldwide. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 11, 2020.

MATANA JÚNIOR, Sidnei; FRANDOLOSO, Marcos Antonio Leite; BRIÃO, Vandrê Barbosa. A review of Netzero energy buildings in Brazil. **Available at SSRN 4435692**, 2023.

MATANA JÚNIOR, Sidnei; FRANDOLOSO, Marcos Antonio Leite; BRIÃO, Vandrê Barbosa. Technical and economic feasibility study for a university zero energy building in Southern Brazil. **Energy and Buildings**, v. 281, n. 112748, 2023.

MCNABB, Nancy. **Strategies to Achieve Net-Zero Energy Homes: A Framework for Future Guidelines**. National Institute of Standards and Technology, 2013 (NIST Special Publication 1140).

MERTZ, George A; RAFFIO, Gregory S. Cost Optimization of Net-Zero Energy House. **Energy Sustainability**, p. 477-487, 2007.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES; SECRETARIA DE POLÍTICAS E PROGRAMAS DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO. **Acordo de Paris**. 2008. Disponível em: <file:///D:/Download/acordo_paris.pdf>. Acesso em: 19 jan 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **O projeto-piloto**, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/sef/o-projeto-piloto-diagnosticos-e-acoes-de-eficiencia-energetica>>. Acesso em: 01 de outubro de 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Eficiência Energética. Premissas e Diretrizes Básicas**. 2011. Disponível em: < chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-eficiencia-energetica/documentos/plano-nacional-eficiencia-energetica-pdf.pdf>>. Acesso em: 19 jan 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **2031: Plano decenal de expansão de energia**. 2022. Disponível em; < chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf>. Acesso em 19 jan 2024.

MITSIDI PROJETOS. **Edifícios de Baixo Carbono no Brasil: Aspectos e Subsídios para Programas Nacionais**. São Paulo: 2017.

MOURA, Manoela Maria Caron.; FRANKENBERGER, Fernanda; TORTATO, Ubiratã. Sustainability in Brazilian HEI: practices overview. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 20, n. 5, p. 832–841, 2019.

MUNGUBA, C. F.L. et al. Enhancing cost-efficiency in achieving near-zero energy performance through integrated photovoltaic retrofit solutions. **Applied Energy**, v. 367, n. 123307, 2024.

NDUKA, D. O. et al. Awareness, benefits and drawbacks of net zero energy building practices: construction industry professional’s perceptions. **Anais...** 1st International Conference on Sustainable Infrastructural Development, dezembro de 2019. Evento virtual. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/640/1/012026/meta>>. Acesso em: 18 de janeiro de 2024.

OCHOA, Carlos E. *et al.* Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. **Applied Energy**, v. 95, p. 238–245, 2012.

OHENE, Eric *et al.* Optimal design guidelines for net zero energy residential buildings in cooling-dominated climates: Case study of Ghana. **Building and Environment**, v. 260, n. 111685, 2024.

OHENE, Eric; CHAN, Albert P.C.; DARKO, Amos. Review of global research advances towards net-zero emissions buildings. **Energy and Buildings**, v. 266, p. 112142, 2022.

OLIVEIRA, Claudia Terezinha *et al.* GHG reduction and energy efficiency analyses in a zero-energy solar house archetype. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 12, p. 225–232, 2017.

OLIVEIRA, Gabriel Lourena Néia; SILVA, Victória Ribeiro da; ALTOÉ, Leandra. **Estrutura metodológica para avaliação ambiental do Projeto Arquitetônico**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2021. *E-book*. Disponível em: <<https://livros.UnB.br/index.php/portal/catalog/book/52>>. Acesso em: 24 ago. 2021.

ØSTERGÅRD, Torben; JENSEN, Rasmus L; MAAGAARD, Steffen E. Building simulations supporting decision making in early design – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 187–201, 2016.

PACHECO, Fernando; FOSSATI, Michele. Avaliação de edifícios de energia zero pela nova proposta de etiquetagem residencial. **Anais...** Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, novembro de 2020. Porto Alegre. Disponível em: <<https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/778>>. Acesso em: 18 de janeiro de 2024.

PACHECO, Miguel; LAMBERTS, Roberto. Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single family residential buildings into zero energy buildings in brazil: Climatic and cultural considerations. **Energy Policy**, v. 63, n. 2013, p. 716–725, 2013.

PANAGIOTIDOU, Maria; FULLER, Robert J. Progress in ZEBs-A review of definitions, policies and construction activity. **Energy Policy**, v. 62, p. 196–206, 2013.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014. *E-book*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/265851263_Manual_de_Engenharia_para_Sistemas_Fotovoltaicos>. Acesso em: 05 dez 2023.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **No Plataforma Agenda 2030: Acelerando as transformações para a Agenda 2030 no Brasil**. Disponível em: <<http://www.agenda2030.com.br/>>. Acesso em: 7 jul. 2021.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – PROCEL. **Etiquetagem nas edificações residenciais**. 2020. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/>>. Acesso em 01 de outubro de 2024.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – PROCEL. **PROCELINFO**. 2006. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp>>. Acesso em: 7 maio 2021.

PROJETEEE. **Estratégias Bioclimáticas**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/projeteee/componentes-constructivos/>>. Acesso em: 7 maio 2021.

QAHTAN, Abdultawab M. et al. Smart Glazing Systems vs Conventional Glazing: A Comprehensive Study on Temperature Control, Daylighting, and Sustainability. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 19, n. 3, p. 939–947, 2024.

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, p. 105468, 2023.

QUEVEDO, Tiago. **Desenvolvimento de benchmark de edificações de ensino superior**. Dissertação (Engenharia Civil) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 98p. 2021.

RABANI, Mehrdad; MADESSA, Habtamu Bayera; NORD, Natasa. Achieving zero-energy building performance with thermal and visual comfort enhancement through optimization of fenestration, envelope, shading device, and energy supply system. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 44, n. 101020, 2021.

REBELATTO, Bianca Gasparetto *et al.* Energy efficiency actions at a Brazilian university and their contribution to sustainable development Goal 7. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 20, n. 5, p. 842–855, 2019.

RODRIGUEZ-UBINAS, Edwin *et al.* Passive design strategies and performance of Net Energy Plus Houses. **Energy and Buildings**, v. 83, p. 10–22, 2014.

ROHDIN, Patrik; THOLLANDER, Patrik; SOLDING, Petter. Barriers to and drivers for energy efficiency in the Swedish foundry industry. v. 35, p. 672–677, 2007.

ROSTA, S. *et al.* Performance of a Zero-Energy. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 130, 2008, p. 1–4, 2016.

RUIZ, Santiago Osorio; JIMENEZ, Juan David Marín; CARVAJAL, Sandra Ximena. Zero Energy Balance Buildings: Definitions, Current Challenges and Future Opportunities. **IEEE Latin America Transactions**, v. 20, n. 3, p. 417–429, 2022.

SALOM, Jaume *et al.* Understanding net zero energy buildings: Evaluation of load matching and grid interaction indicators. **Proceedings of Building Simulation 2011**, v. 6, p. 14–16, 2011.

SAREMI, S.; MIRJALILI, S.; LEWIS, A. Grasshopper optimisation algorithm: theory and application. **Advances in engineering software**, v. 105, p. 30-47, 2017.

SARIR, Payam; SHARIFZADEH, Mahdi. Application of passive and active scenarios to a residential building in a dry and hot climate to achieve a positive energy building (PEB). **Heliyon**, v. 10, n. 10, 2024.

SARTORI, Igor; NAPOLITANO, Assunta; VOSS, Karsten. Net zero energy buildings: A consistent definition framework. **Energy and Buildings**, v. 48, p. 220–232, 2012.

SAYED, Mohamed Ahmed Alaa El Din Ahmed; FIKRY, Mohamed Anwar. Impact of glass facades on internal environment of buildings in hot arid zone. *Alexandria Engineering Journal*, v. 58, n. 3, p. 1063–1075, 2019.

SCHINAZI, Alexandre *et al.* **Guia interativo de eficiência energética em edificações**. São Paulo: 2018. Disponível em: <<http://dev.rckt.com.br/sinduscon/wp-content/themes/sinduscon/pdfs/guia-de-eficiencia-energetica.pdf>>. Acesso: 15 jan 2023.

SENEL, A. A Critical Review on Building Performance Simulation Tools. **Alam Cipta**, v. 12, n. 2, p. 7–21, 2019.

SHRESTHA, Mishan; RIJAL, Hom Bahadur. Investigation on Summer Thermal Comfort and Passive Thermal Improvements in Naturally Ventilated Nepalese School Buildings. **Energies**, v. 16, n. 3, 2023.

SILVA, Elton Jorge da *et al.* O uso de energia elétrica nas universidades federais brasileiras, sob o enfoque do Plano de Gestão de Logística Sustentável. **Ciência e Natura**, v. 41, n. 8, p. 01-17, 2019a.

SILVA, Joára Cronemberger Ribeiro. **Integración de sistemas fotovoltaicos en edificios de oficinas en bajas latitudes: estudio del balance energético aplicado a Brasil**. Tese (Arquitetura) - Escuela Técnica Superior de Arquitectura Integración, Universidad Politécnica de Madrid. 313 p. 2015.

SILVA, Mario Alves; CARLO, Joyce; BOSCO, Luciana. Modelagem paramétrica e desempenho da edificação: Otimização baseada em simulação luminosa e energética através de algoritmos genéticos. **Cadernos do Proarq**, v. 30, p. 150–176, 2018.

SILVA, Sergio Barbosa *et al.* Diagrama de Pareto: verificação da ferramenta de qualidade por patentes. **Anais... XI Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe**, novembro de 2019. Sergipe. Disponível em: <<https://ri.ufs.br/handle/riufs/12564>>. Acesso em: 18 jan. 2024b.

SOARES, M. T. B.; AMORIM, C. N. D. Estudo de potencial de estratégias passivas para eficiência energética em campus universitário. **Anais... XVII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, 30 e 31 de outubro a 1 de novembro de 2023. São Paulo. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/375950340_Estudo_de_potencial_de_estrategias_passivas_para_eficiencia_energetica_em_campus_universitario>. Acesso em: 18 jan. 2024.

SOLEMMA LLC. **ClimateStudio. Versão V1.9**. Disponível em: <<https://www.solemma.com/cs-installers>>. Acesso em: 01 de outubro de 2024.

SOULEY AGBODJAN, Y. *et al.* Bibliometric analysis of zero energy building research, challenges and solutions. **Solar Energy**, v. 244, p. 414–433, 2022.

SPANODIMITRIOU, Yorgos *et al.* Passive strategies for building retrofitting: Performances analysis and incentive policies for the iranian scenario. **Energies**, v. 15, n. 5, 2022.

SUDBRACK, Larissa Olivier. **Casa zero: Diretrizes de projeto para casas pré-fabricadas de balanço energético nulo em Brasília**. Dissertação (Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, 240 p. 2017.

SUN, Xiaonuan; GOU, Zhonghua; LAU, Stephen Siu Yu. Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retrofits in tropical climate: Case study of a zero energy building. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 35–45, 2018.

THE WORLD BANK GROUP. **Global solar atlas**. 2024. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map>>. Acesso em: 01 de outubro de 2024.

TORCELLINI, Paul et al. **Zero energy buildings: A critical look at the definition**. **Anais...** 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Junho de 2006. California. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2021

TORCELLINI, Paul; PLESS, Shanti; LEACH, Matt. A pathway for net-zero energy buildings: Creating a case for zero cost increase. **Building Research and Information**, v. 43, n. 1, p. 25–33, 2015.

TORRES, Thaíse. **UnB é contemplada com recursos para construção de edifício de alta eficiência**. 2020. Disponível em: <<https://noticias.UnB.br/117-pesquisa/4200-UnB-e-contemplada-com-recursos-para-construcao-de-edificio-de-alta-eficiencia>>. Acesso em: 6 out. 2021.

TSANTILI, Angeliki; KORONAKI, Irene; POLYDOROS, Vasilis. Maximizing Energy Performance of University Campus Buildings through BIM Software and Multicriteria Optimization Methods. **Energies**, v. 16, n. 5, 2023.

TUHUS-DUBROW, Daniel; KRARTI, Moncef. Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. **Building and Environment**, v. 45, n. 7, p. 1574–1581, 2010.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **A Common Definition for Zero Energy Buildings**, 2015. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/common-definition-zero-energy-buildings>>. Acesso em: 18 jan. 2024.

U.S. ENERGY DEPARTMENT OFFICE. **Office of Energy Efficiency & Renewable Energy**. Washington, 2022. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>>. Acesso em: 18 jan. 2024.

UNITED ENVIRONMENT PROGRAMME. **2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector** **Global Status Report**. Nairobi: 2020. Disponível em: <https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020_Buildings_GSR_FULL_REPORT.pdf>. Acesso em: 26 dez 2023.

UNITED STATES OF AMERICA. **Executive Order 13693 of March 19, 2015 Planning: Planning for Federal Sustainability in the Next Decade**. Presidential Documents. Washington, 2015. Disponível em: <<https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2015-03-25/pdf/2015-07016.pdf>>. Acesso em: 27 set. 2022.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. **Usina de energia solar é inaugurada no Bloco de Salas de Aula Sul, campus Darcy Ribeiro**, 2023. Disponível em: <<https://noticias.unb.br/institucional/6806-usina-de-energia-solar-e-inaugurada-no-bloco-de-salas-de-aula-sul-campus-darcy-ribeiro>>. Acesso em: 27 set. 2022.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. **ZEB - Zero Energy Brasília: Plano estratégico de eficiência energética para parque construído de balanço energético nulo**. Projeto de pesquisa científica e tecnológica. Brasília: 2020.

URGE-VORSATZ, Diana *et al.* Advances toward a net-zero global building sector. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 45, p. 227–269, 2020.

VALAVANIDIS, A. The COP26 UN Conference Promoted Climate to the Top of the Global Agenda Opportunity for pivotal changes in global climate policy to protect the long-term survival of humanity. **Scientific Reviews**, v.1 p. 1-37, 2021.

VASILAKOPOULOU, K. *et al.* Cool roofs boost the energy production of photovoltaics: Investigating the impact of roof albedo on the energy performance of monofacial and bifacial photovoltaic modules. **Solar Energy**, v. 265, n. 111948, 2023.

VINÍCIUS, Mateus *et al.* Technological innovations to assess and include the human dimension in the building-performance loop: A review. **Energy & Buildings**, v. 202, n. 109365, 2019.

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

WANG, Chuan'an; POURAMINI, Somayeh. Multi-objective modified satin Bowerbird optimization algorithm used for simulation-based energy consumption optimization of yearly energy demand of lighting and cooling in a test case room. **Energy**, v. 292, n. 130508, 2024.

WANG, Ran *et al.* A comprehensive evaluation of zero energy buildings in cold regions: Actual performance and key technologies of cases from China, the US, and the European Union. **Energy**, v. 215, p. 118992, 2021.

WANG, Yicheng *et al.* An integrated climate-based daylight performance evaluation framework for indoor arenas' roof system. **Journal of Building Engineering**, v. 90, n.109164, 2024.

WEBER, F. da S. *et al.* **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlusJour**. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

WEERASURIYA, A U *et al.* A holistic framework to utilize natural ventilation to optimize energy performance of residential high-rise buildings. **Building and Environment**, v. 153, p. 218–232, 2019.

WEI, Jia *et al.* Hot Topics and Trends in Zero-Energy Building Research - A Bibliometrical Analysis Based on CiteSpace. **Buildings Article**, v. 13, p. 479, 2023.

WILLIAMS, Joseph *et al.* Less is more: A review of low energy standards and the urgent need for an international universal zero energy standard. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 65–74, 2016.

WILSON, Gregory M. et al. The 2020 photovoltaic technologies roadmap. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 53, n. 493001, 2020.

WU, Wei; SKYE, Harrison M. Residential net-zero energy buildings: Review and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 142, n. 110859, 2021.

WU, Xianguo *et al.* Intelligent optimization framework of near zero energy consumption building performance based on a hybrid machine learning algorithm. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, n. 112703, 2022.

YASUOKA, Jorge *et al.* IoT solution for energy management and efficiency on a Brazilian university campus – a case study. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 24, n. 2, p. 426-448, 2023.

YEGANEH, Armin *et al.* Feasibility of zero-energy affordable housing. **Energy & Buildings**, v. 241, n. 110919, 2021.

ZAHIRI, Sahar; ALTAN, Hasim The effect of passive design strategies on thermal performance of female secondary school buildings during warm season in a hot and dry climate. **Frontiers in Built Environment**, v. 2, p. 1–15, 2016.

ZEILER, Wim; BOXEM, Gert. Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter. **Building and Environment**, v. 44, n. 11, p. 2308–2317, 2009.

ZHANG, Anxiao. *et al.* Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 371–384, 2017.

ZHANG, Shicong *et al.* Policy recommendations for the zero energy building promotion towards carbon neutral in Asia-Pacific Region. **Energy Policy**, v. 159, p. 112661, 2021.

ZHAO, Jing; DU, Yahui. Multi-objective optimization design for windows and shading configuration considering energy consumption and thermal comfort: A case study for office building in different climatic regions of China. **Solar Energy**, v. 206, p. 997–1017, 2020.

ZHOU, Chaobin *et al.* Design optimization and field demonstration of natural ventilation for high-rise residential buildings. **Energy & Buildings**, v. 82, p. 457–465, 2014.

ZIEBELL, C. S.; LUIS, J.; AYMONE, F. Desempenho térmico de uma residência com diferentes configurações de paredes trombe: Estudo para Curitiba - PR. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 15, n. 2, p. 217-232, 2019.

ZINZI, Michele et al. On the built-environment quality in nearly zero-energy renovated schools: Assessment and impact of passive strategies. **Energies**, v. 14, n. 10, 2021.

APÊNDICE A

Artigo publicado.

Com o intuito de estabelecer uma base teórica-conceitual da temática de pesquisa, foi desenvolvido o artigo “Do paradigma internacional aos desafios de implementação dos *zero energy buildings* no Brasil: uma revisão da literatura”. Este artigo foi apresentado, em 2023, no XVII Encontro nacional de conforto no ambiente construído (ENCAC) e buscou explorar o panorama dos ZEBs, a partir de uma análise do contexto brasileiro e das jurisdições mais influentes nesse tipo de edificação. Além disso, os principais desafios para o desenvolvimento de projetos ZEB no Brasil também foram abordados nesse trabalho.



XVII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
SÃO PAULO - SP

**DO PARADIGMA INTERNACIONAL AOS DESAFIOS DE
IMPLEMENTAÇÃO DOS *ZERO ENERGY BUILDINGS* NO BRASIL: UMA
REVISÃO DA LITERATURA**

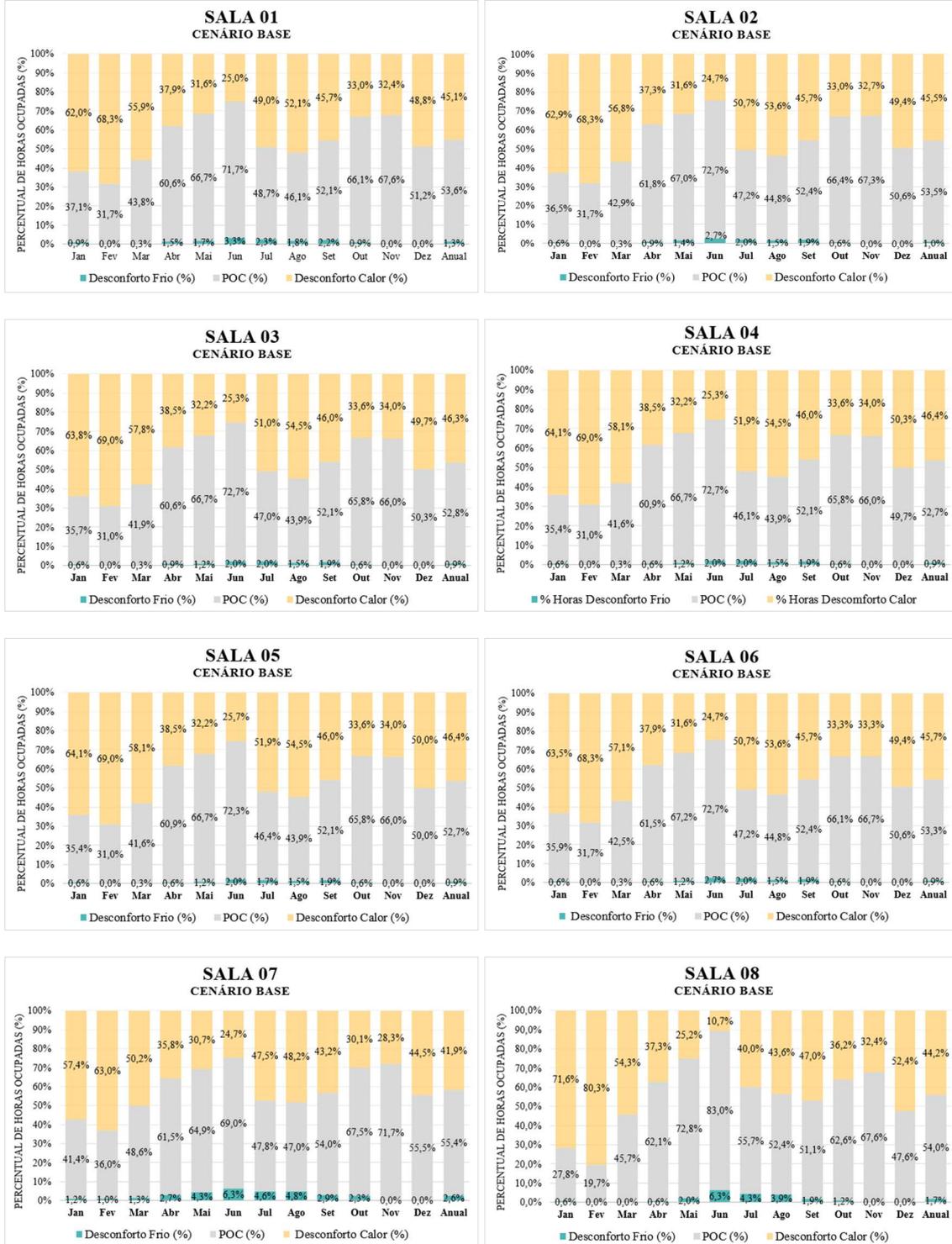
Larissa Angueth (1) Caio Frederico e Silva (2) Joára Cronemberger (3) Cláudia Amorim (4)

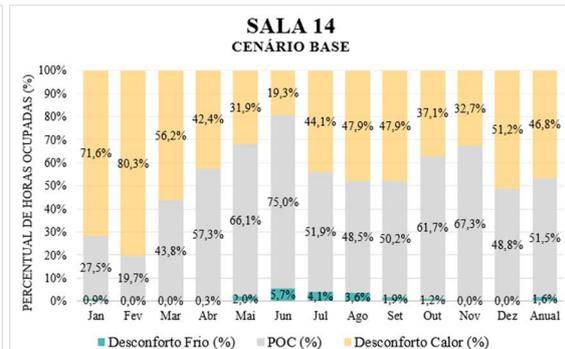
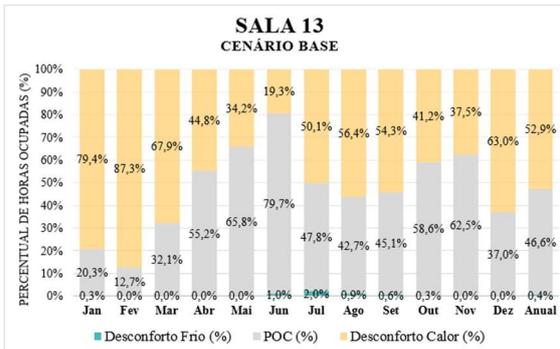
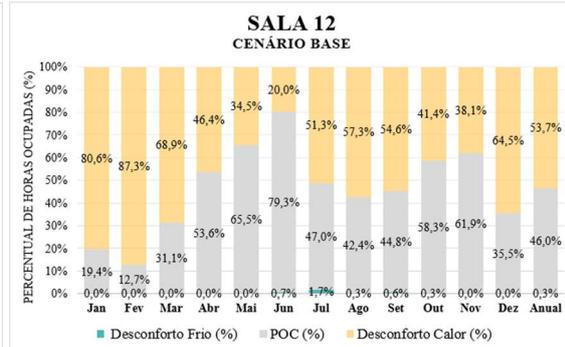
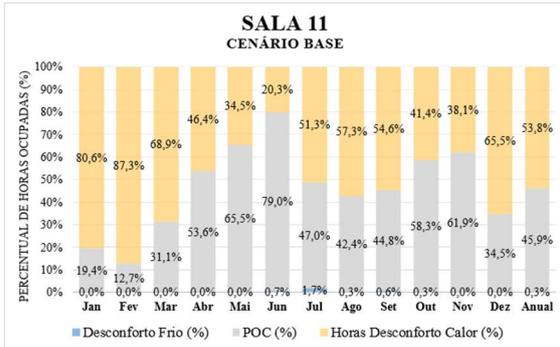
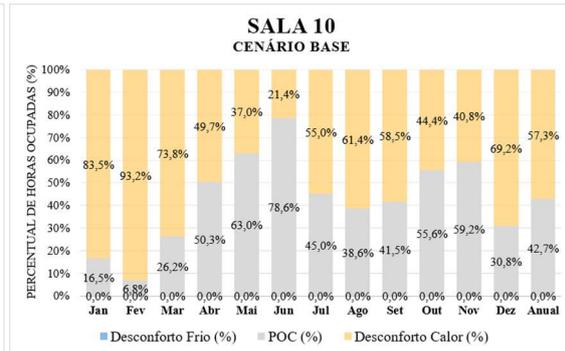
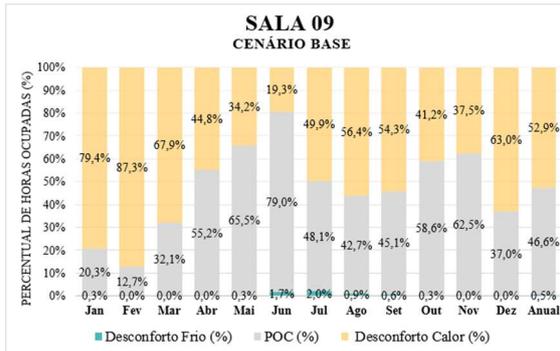
(1) Arquiteta e Urbanista, Especialista em Reabilitação Ambiental, larissa.angueth@gmail.com, UnB.
(2) Doutor em Arquitetura e Urbanismo, Professor do PPG FAU UnB, caiosilva@unb.br, UnB.
(3) Doutora em Arquitetura e Urbanismo, Professora do PPG FAU UnB, joaracronemberger@unb.br, UnB.
(4) Doutora em Arquitetura e Urbanismo, Professora do PPG FAU UnB, clamorim@unb.br, UnB.

RESUMO
O desenvolvimento das cidades, associado ao crescimento econômico e social, atua como agente propulsor da demanda energética em diversas escalas. Portanto, o investimento em tecnologias sustentáveis, fontes alternativas de energia limpa e a aplicação de técnicas da arquitetura bioclimática tornam-se fundamentais para que ocorram avanços no sistema energético. Nesse cenário, os *Zero Energy Buildings* (ZEBs) mostram-se alinhados com as metas de redução dos impactos ambientais negativos, uma vez que adotam soluções passivas e ativas de eficiência energética, bem como a geração própria de energia limpa. Assim, o objetivo desse artigo consiste em explorar os desafios para a implementação de ZEBs, a partir de uma análise do contexto brasileiro e das regiões cujas contribuições são mais significativas para a pesquisa desse tema. Para tanto, a revisão de literatura considerou subtemas que traduzem o panorama dos ZEBs no Brasil e em alguns dos territórios de influência. A pesquisa direta da literatura foi realizada com o uso de palavras-chave e adotou o Scopus (Elsevier) como sua principal base de dados. Além disso, também foram elencados outros trabalhos por meio da pesquisa indireta de artigos correferenciados. Os resultados obtidos abordam um breve panorama sobre políticas públicas e regulamentações de incentivo à eficiência energética, bem como alguns dos desafios encontrados para a implementação dos ZEBs, em especial, no Brasil, Estados Unidos, União Europeia e China. Enquanto o Brasil apresenta resultados pouco expressivos com relação aos ZEBs, as demais regiões possuem metas ambiciosas para a redução do consumo de combustíveis fósseis. Em todos os casos, a evidência leva a concluir que os ZEBs tem uma função crucial para a proteção ao meio ambiente e como agente mitigatório das mudanças climáticas.
Palavras-chave: balanço energético nulo, viabilidade econômica, desafios.

APÊNDICE B

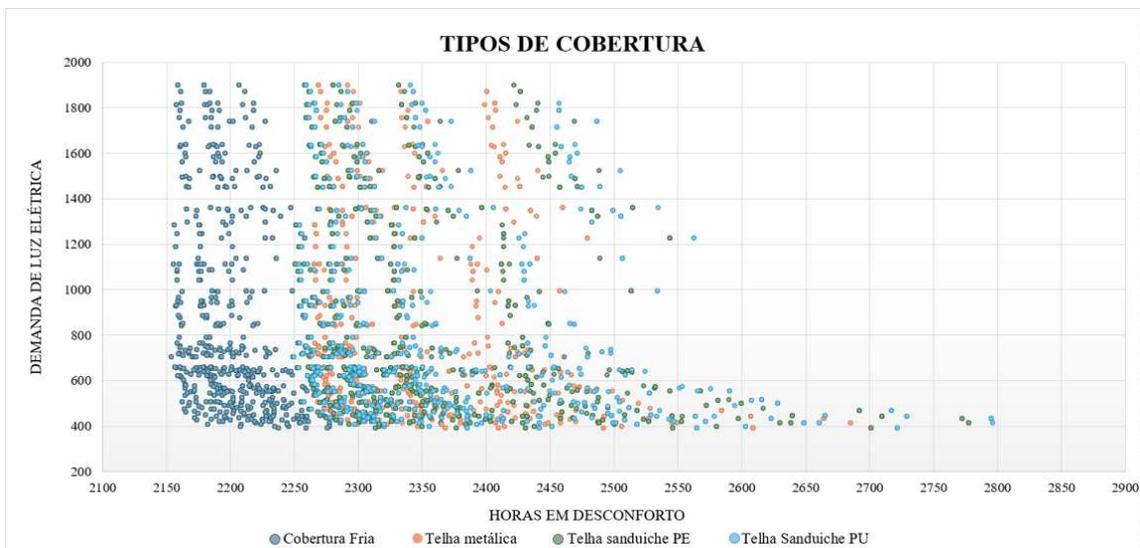
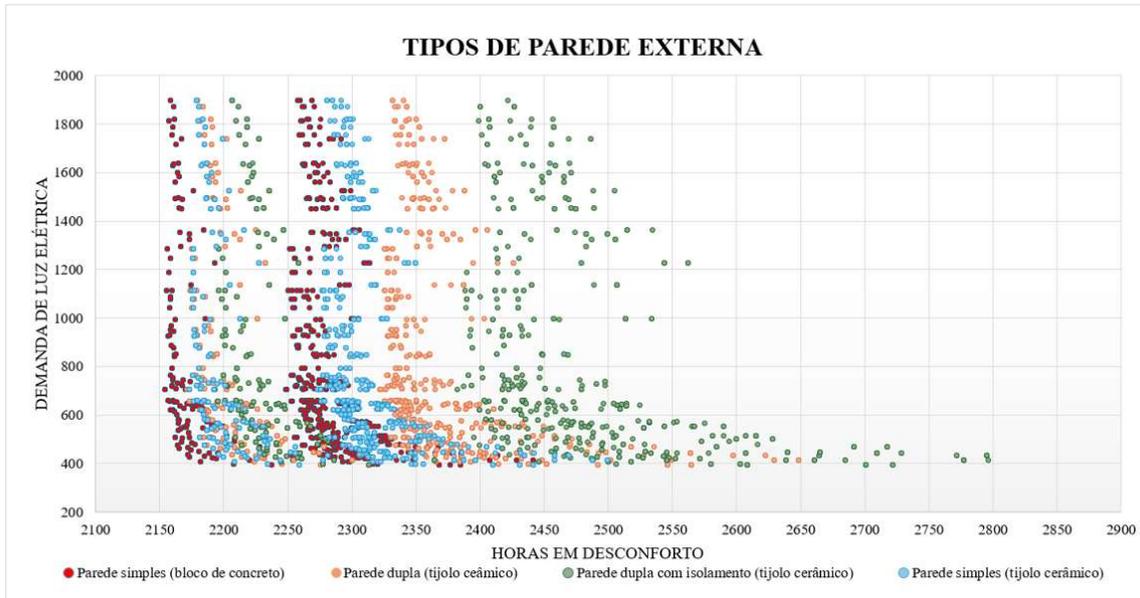
Percentual de horas de conforto (POC) do bloco das salas de aula, no cenário base.

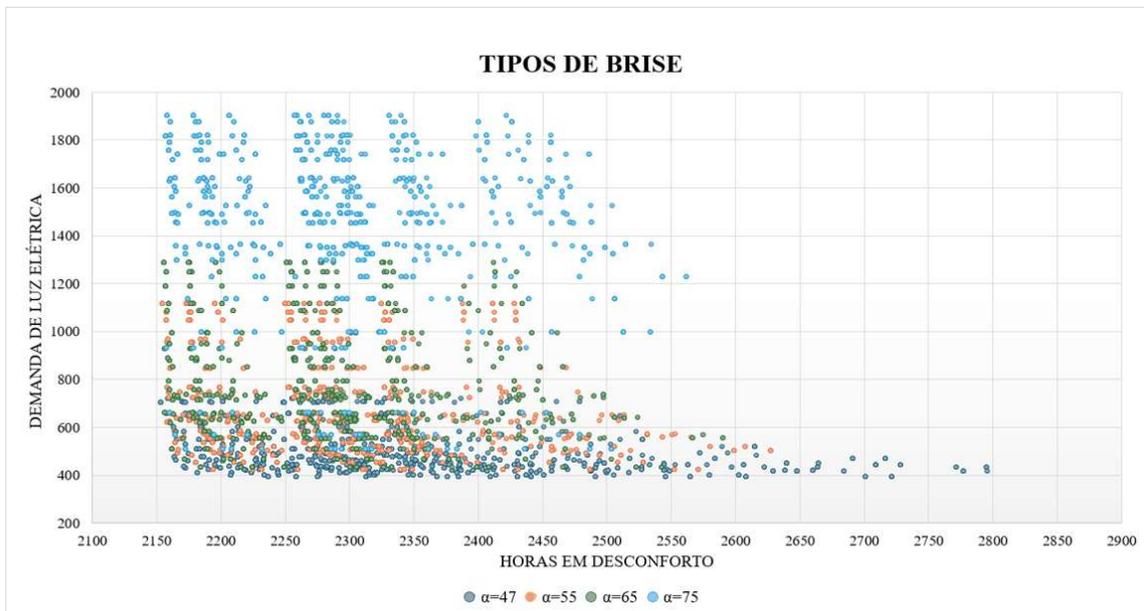
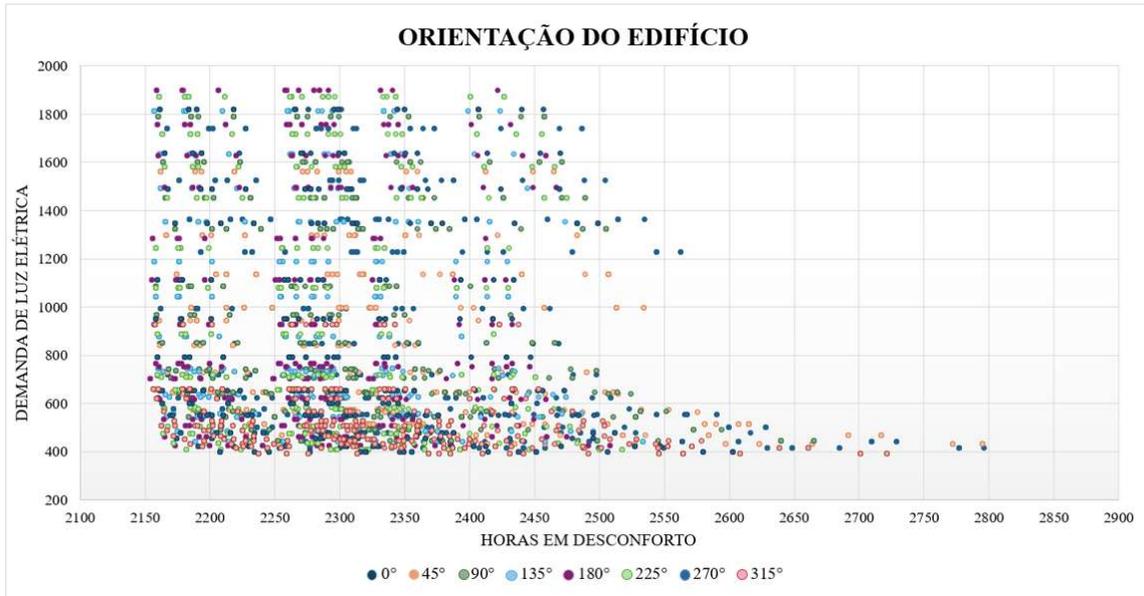


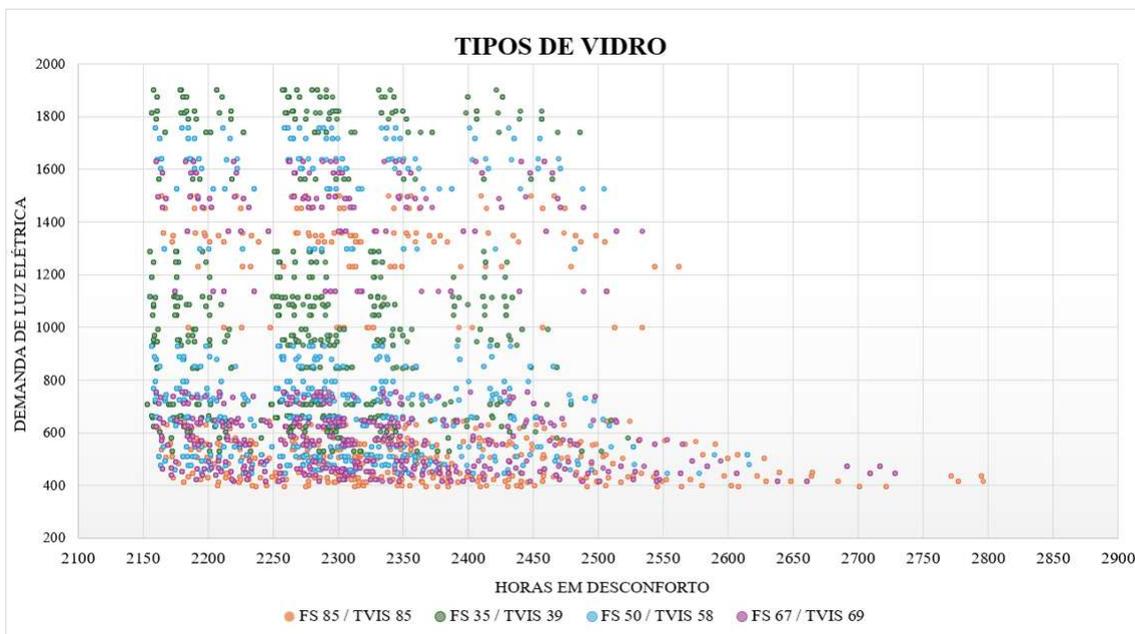
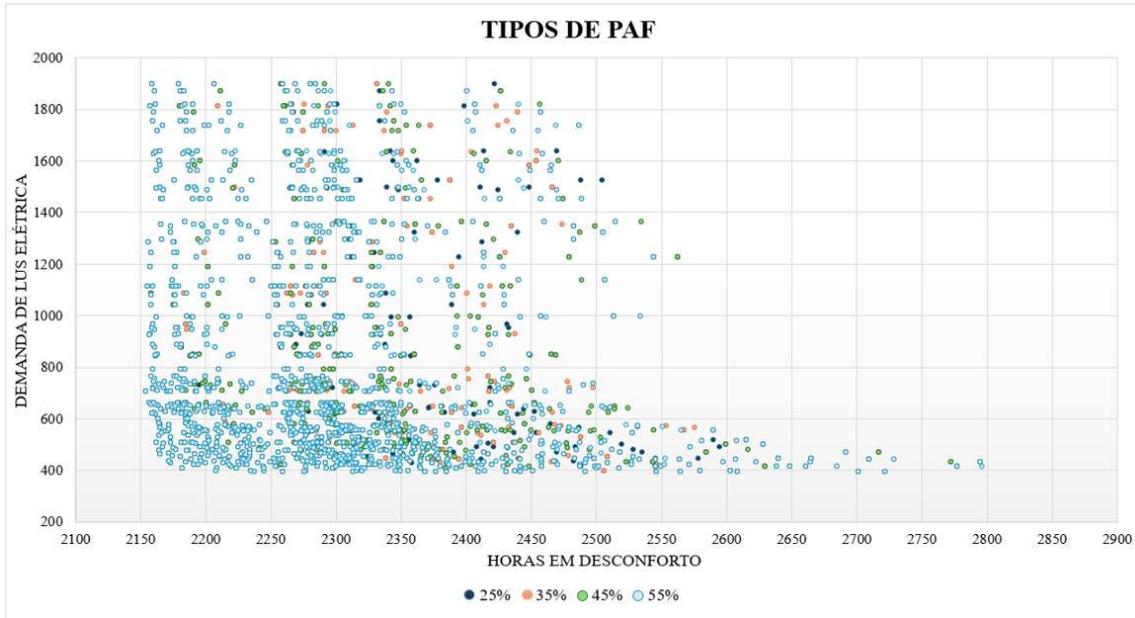


APÊNDICE C

Análise das variáveis do processo de otimização.



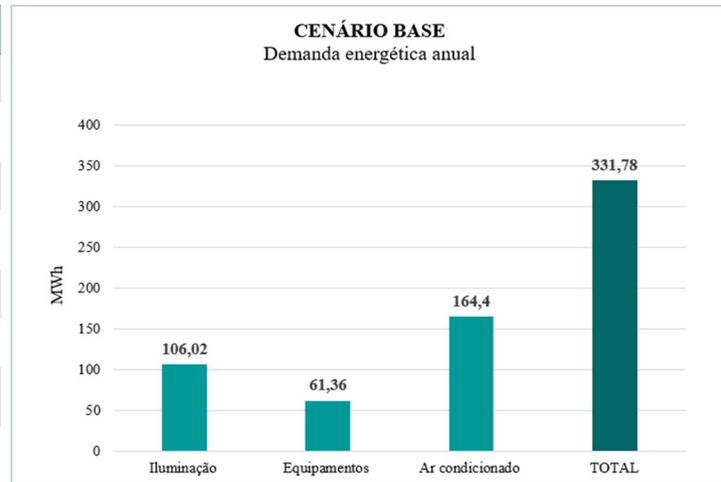




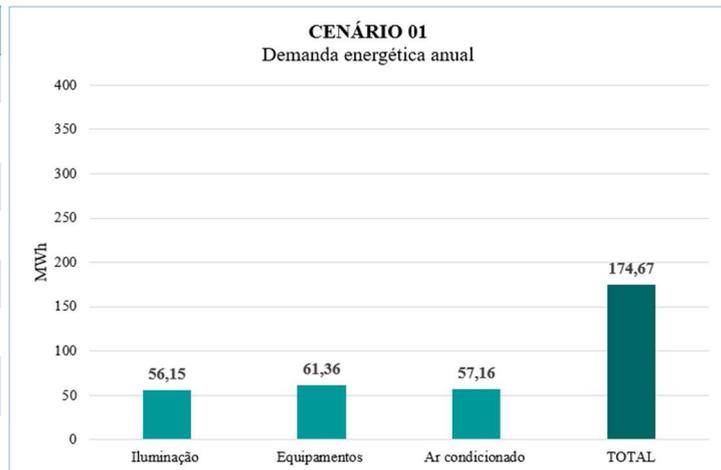
APÊNDICE D

Análise dos cenários ótimos, com inclusão do ar-condicionado.

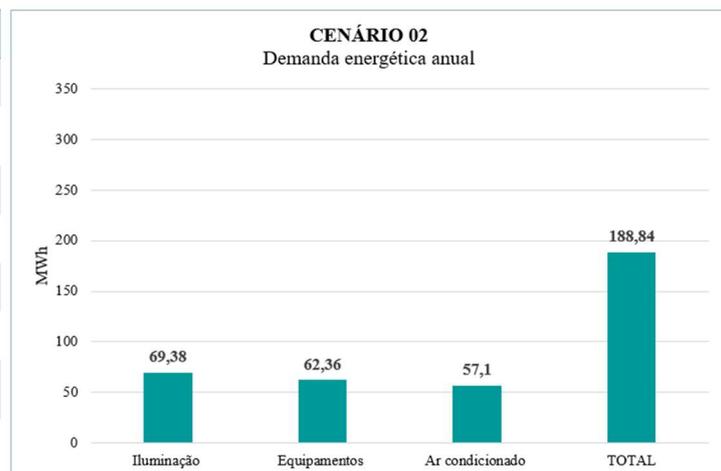
CENÁRIO	CB
PAF	45%
Vidro	Incolor FS 85% e TVIS 85%
Cobertura	Telha metálica
Parede externa	Bloco de tijolo cerâmico
Orientação	254°
Brise	$\alpha = 47^\circ$
Controle de Iluminação	Não
Ar condicionado	Salas de aula COP 3,78



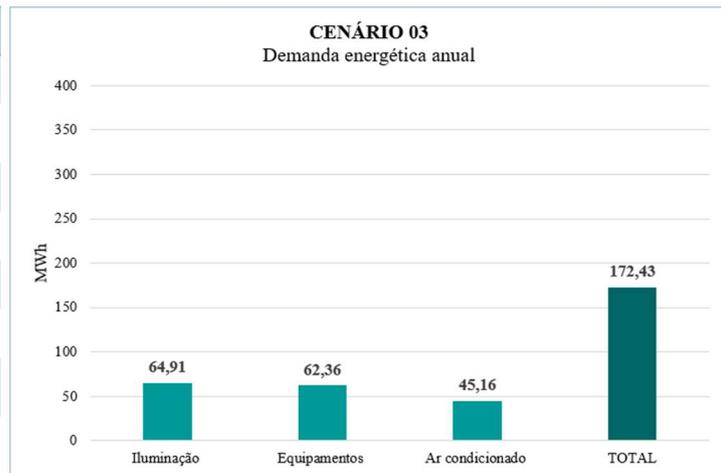
CENÁRIO	C 01
PAF	25%
Vidro	Incolor FS 67% e TVIS 69%
Cobertura	Cobertura fria
Parede externa	Bloco de concreto
Orientação	225°
Brise	$\alpha = 47^\circ$
Controle de Iluminação	Salas de Aula
Ar Condicionado	Salas de Aula COP 5,5



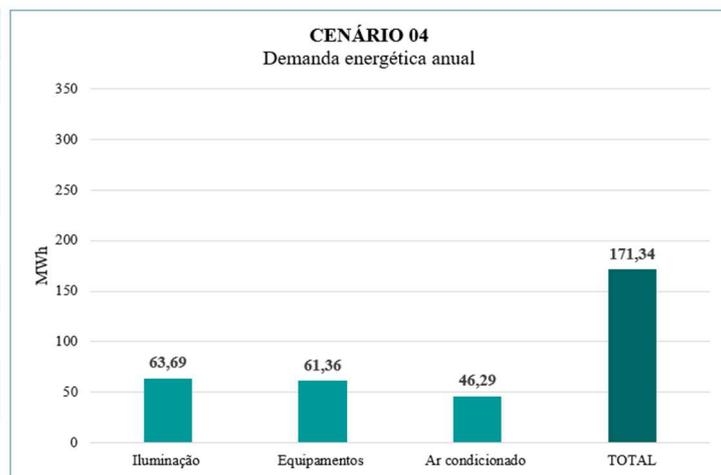
CENÁRIO	C 02
PAF	25%
Vidro	Incolor FS67% e TVIS 69%
Cobertura	Cobertura fria
Parede externa	Bloco de concreto
Orientação	180°
Brise	$\alpha = 47$
Controle de Iluminação	Salas de Aula
Ar Condicionado	Salas de Aula COP 5,5



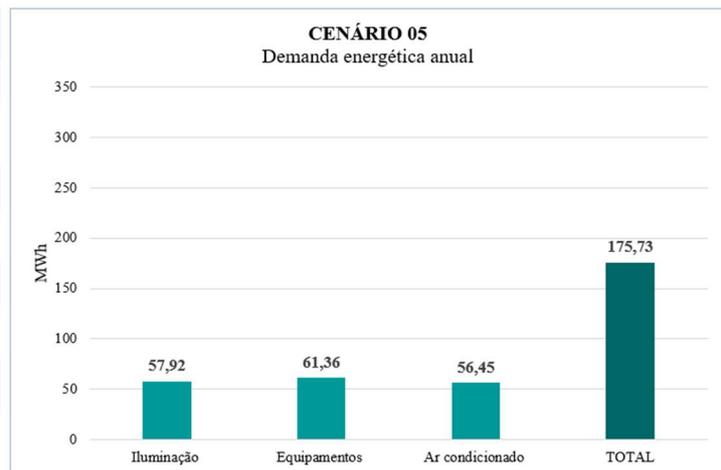
CENÁRIO	C 03
PAF	45%
Vidro	Incolor FS 50% e TVIS 58%
Cobertura	Cobertura fria
Parede externa	Bloco de concreto
Orientação	180°
Brise	$\alpha = 47^\circ$
Controle de Iluminação	Salas de Aula
Ar Condicionado	Salas de Aula COP 5,5



CENÁRIO	C 04
PAF	45%
Vidro	Incolor FS 50% e TVIS 58%
Cobertura	Cobertura fria
Parede externa	Bloco de concreto
Orientação	225°
Brise	$\alpha = 47^\circ$
Controle de Iluminação	Salas de Aula
Ar Condicionado	Salas de Aula COP 5,5

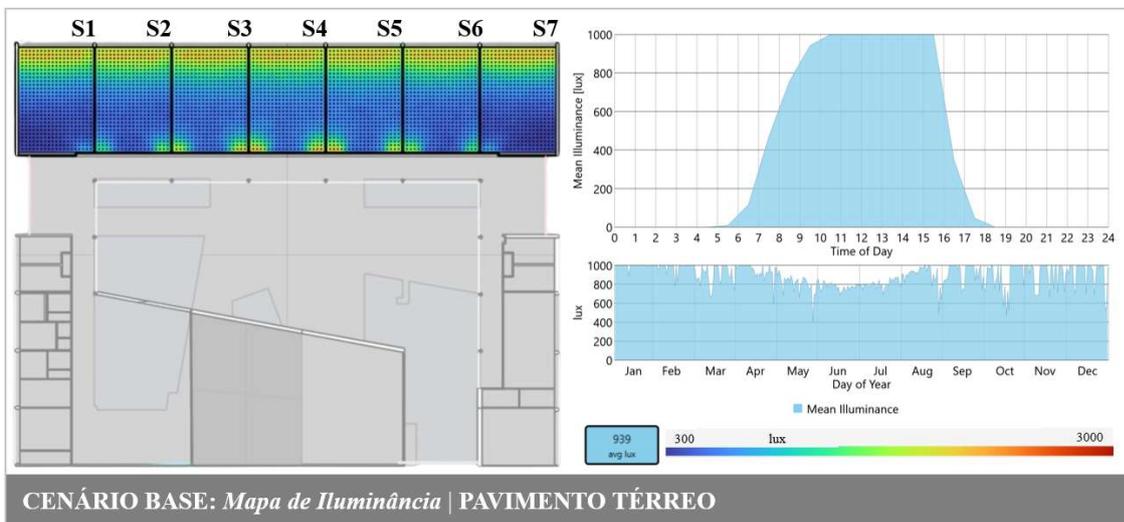
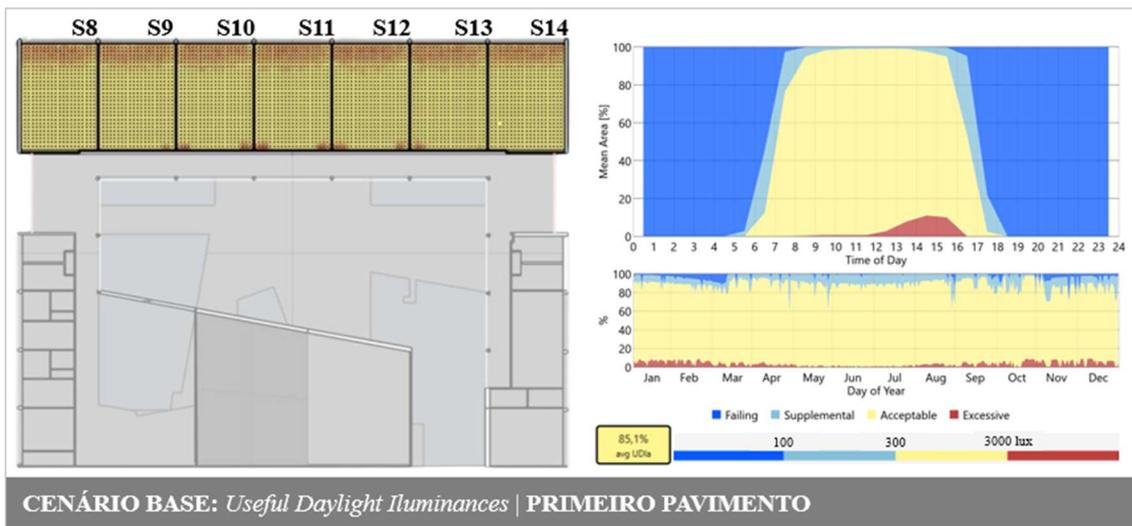
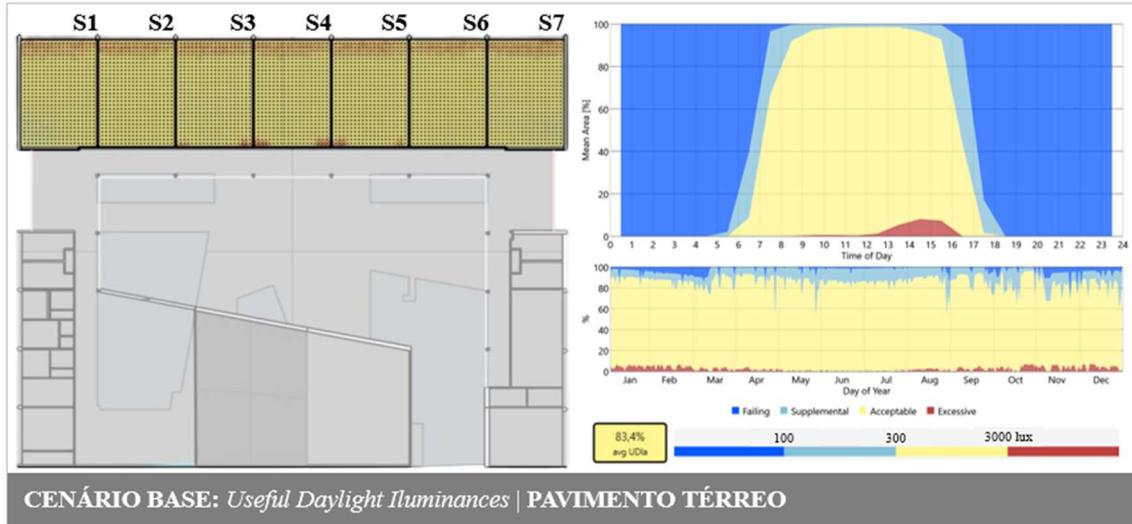


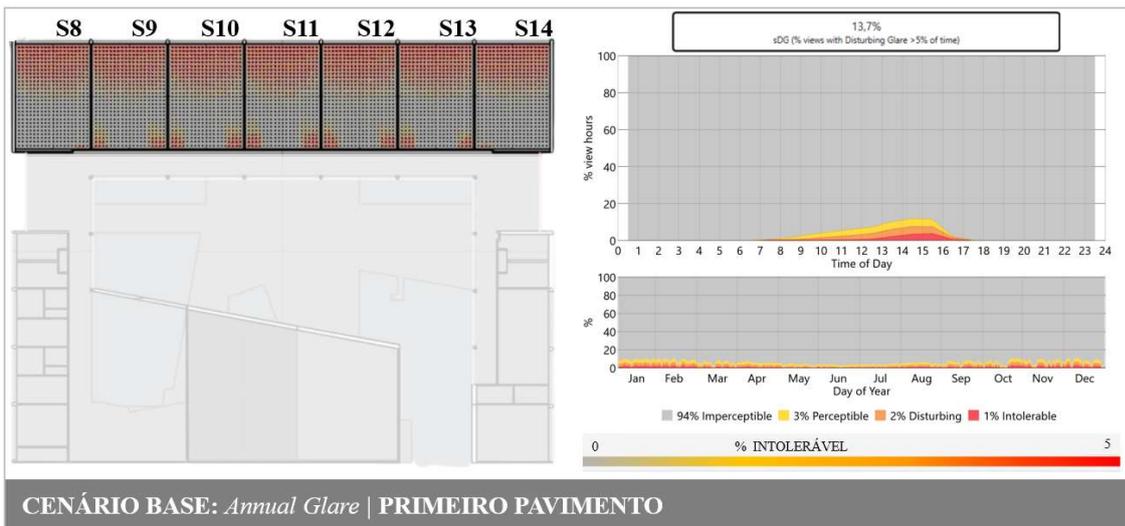
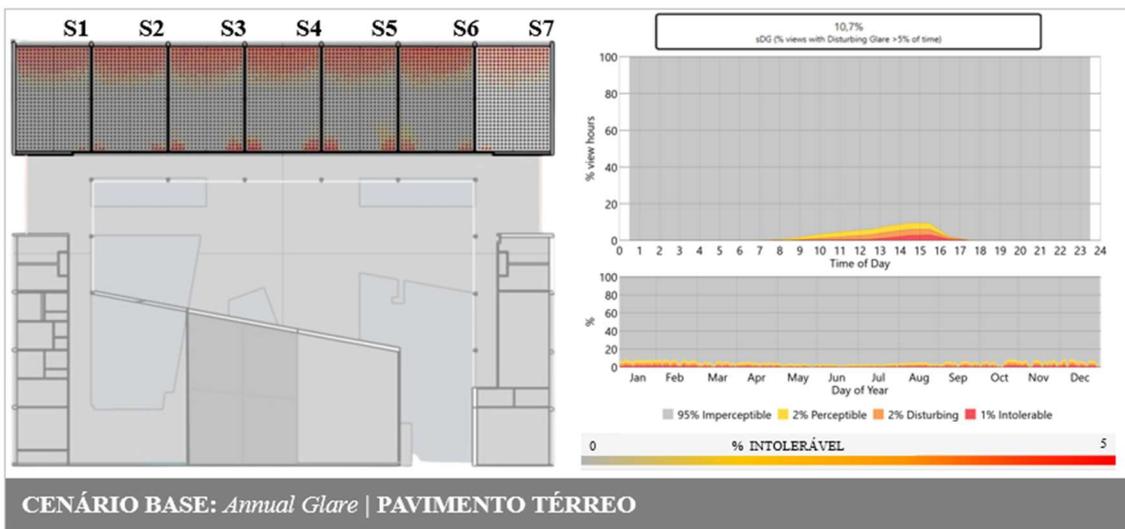
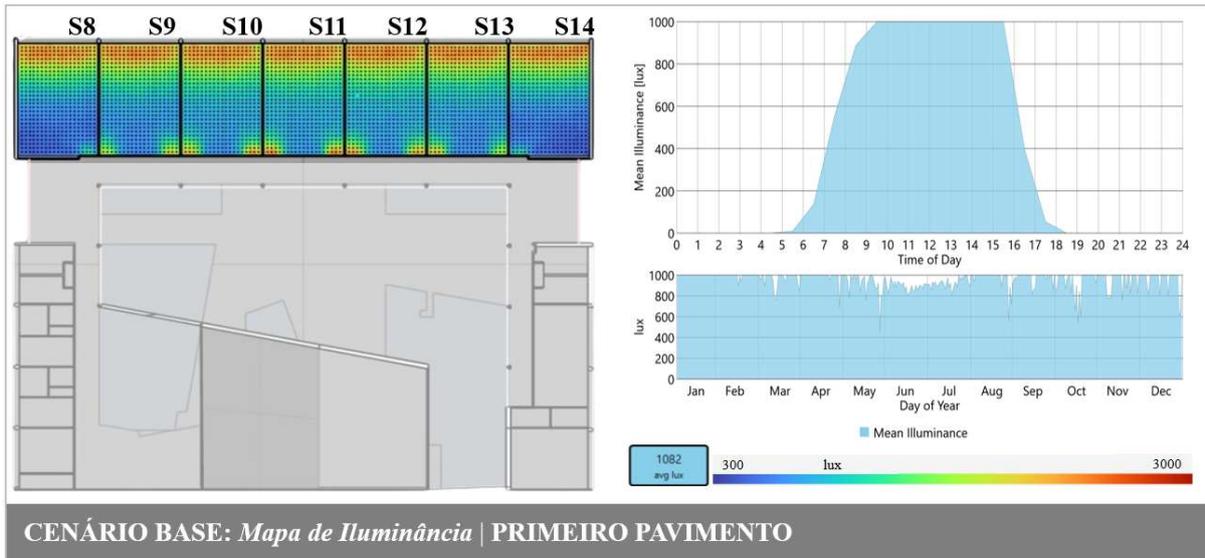
CENÁRIO	C 05
PAF	25%
Vidro	Incolor FS 85% e TVIS 85%
Cobertura	Cobertura fria
Parede externa	Bloco de concreto
Orientação	180°
Brise	$\alpha = 47^\circ$
Controle de Iluminação	Salas de Aula
Ar Condicionado	Salas de Aula COP 5,5

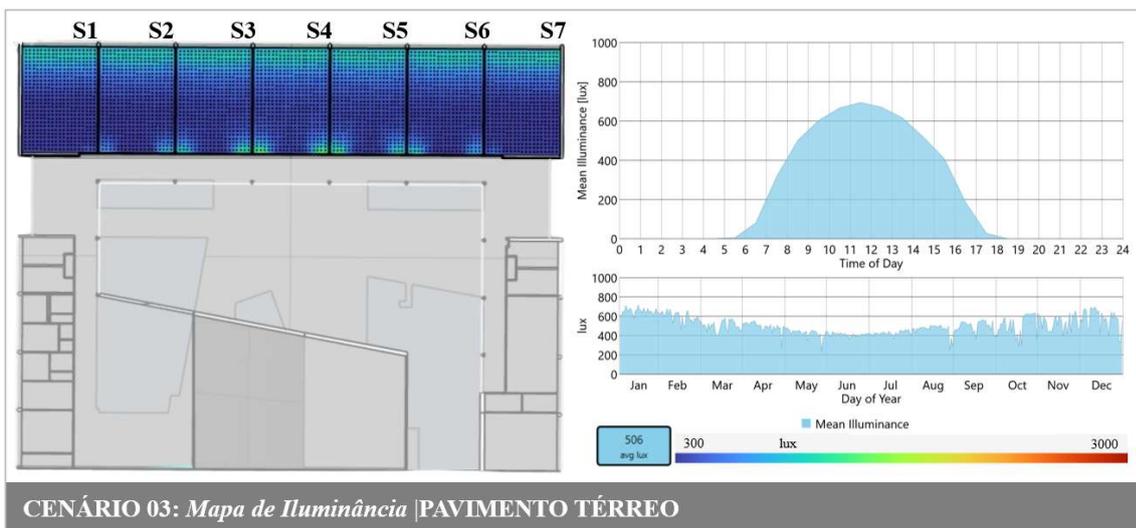
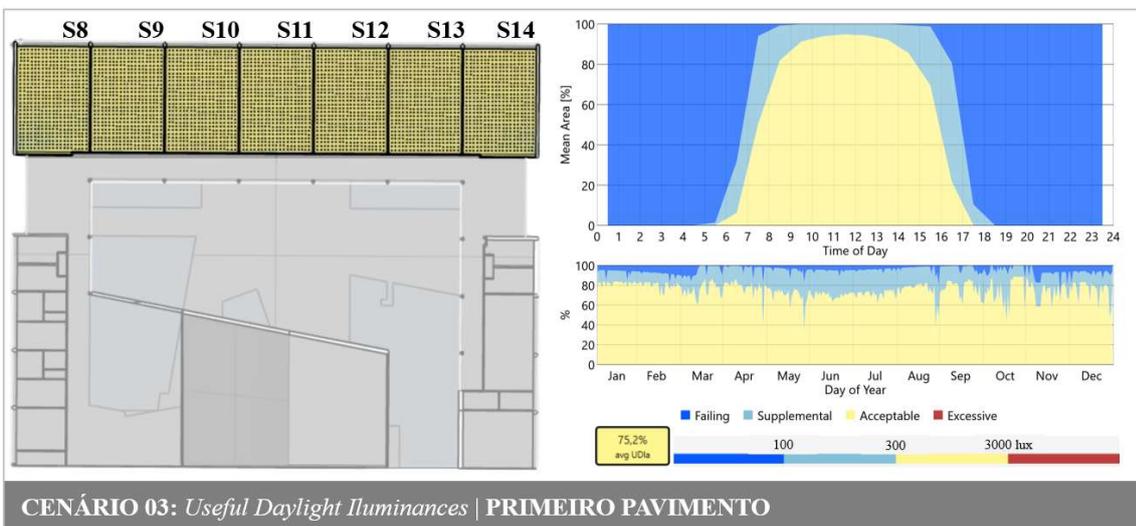
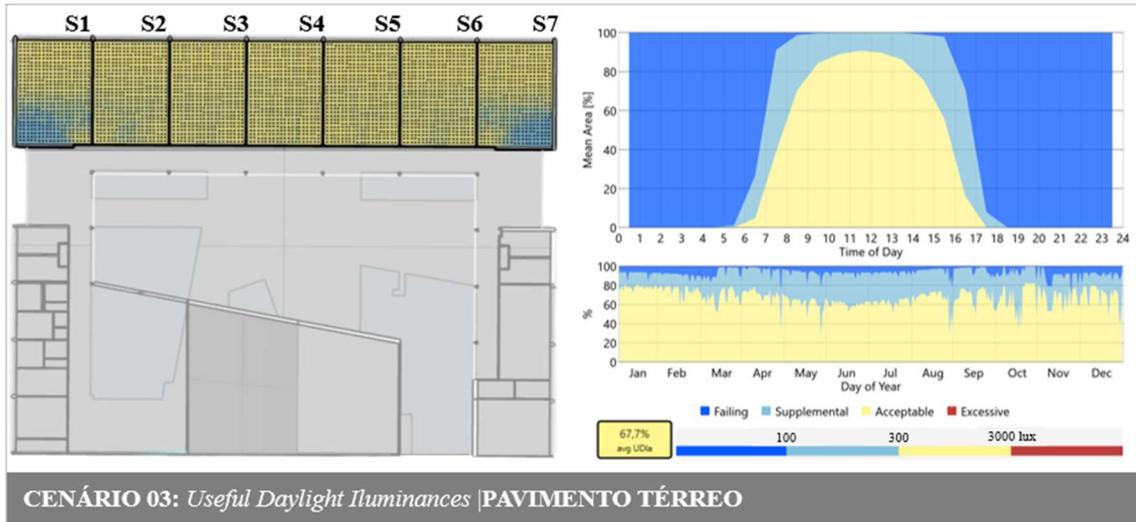


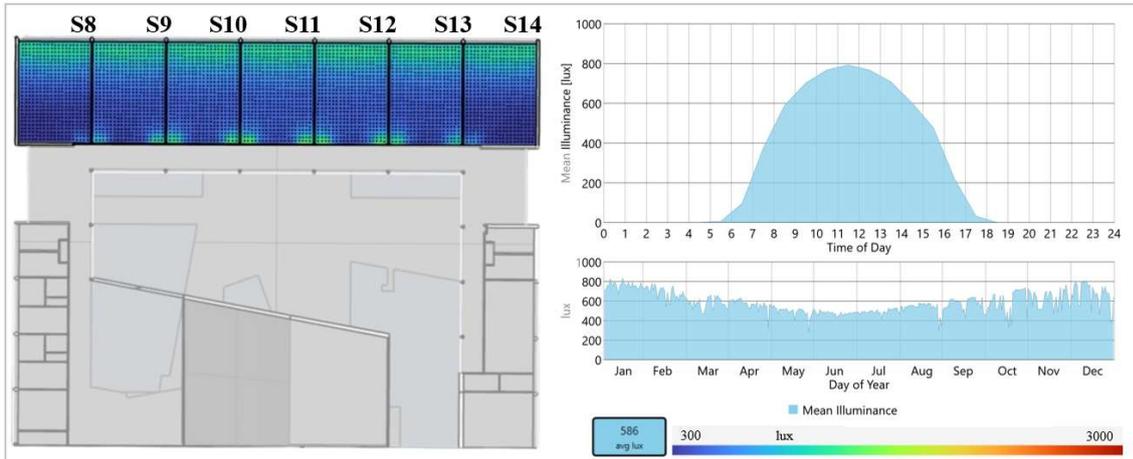
APÊNDICE E

Análise do conforto visual para o CB, o C03 e o C04.

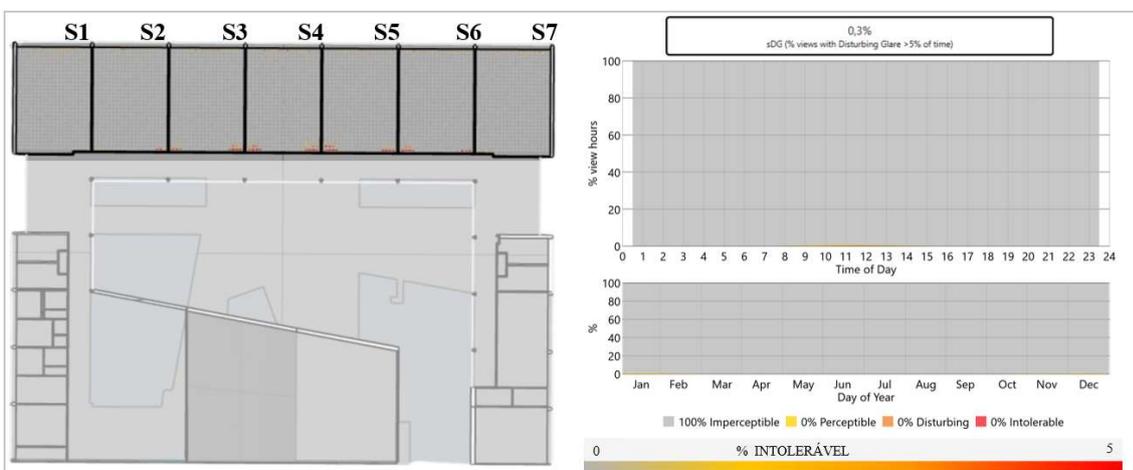




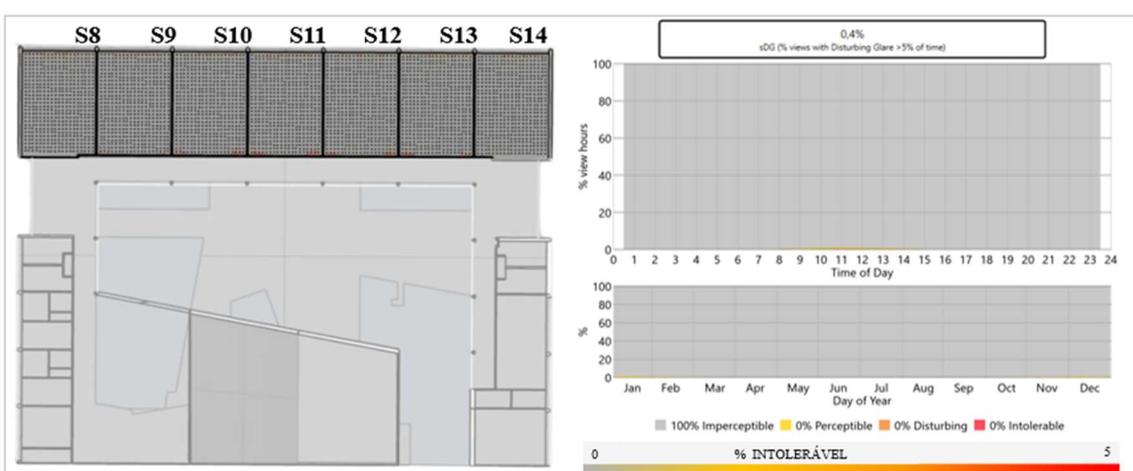




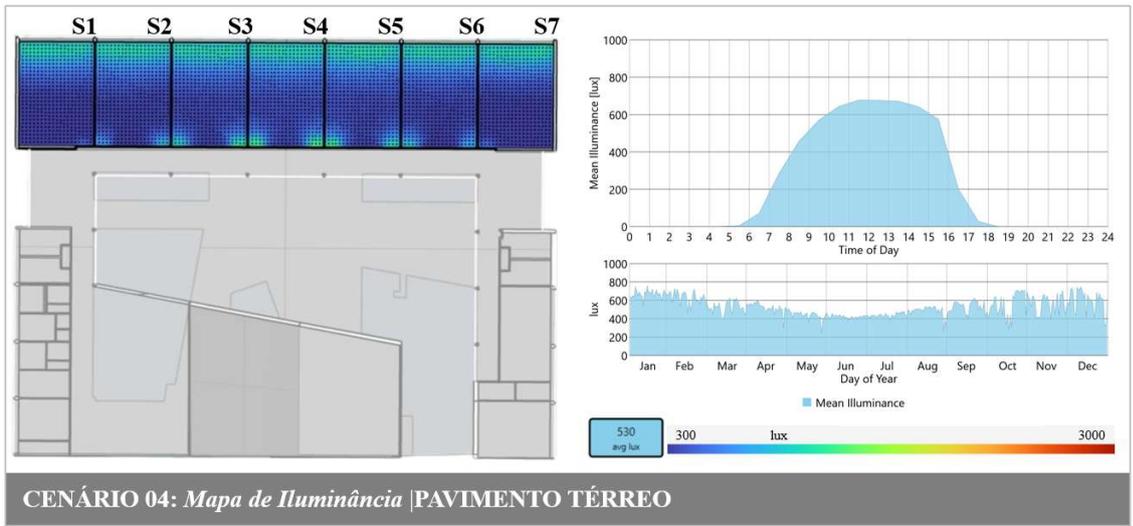
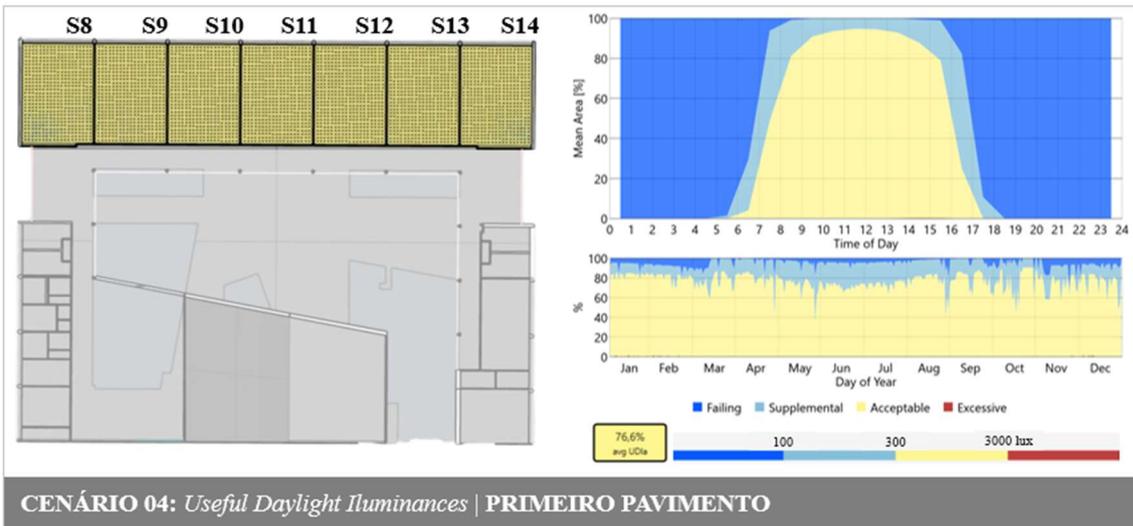
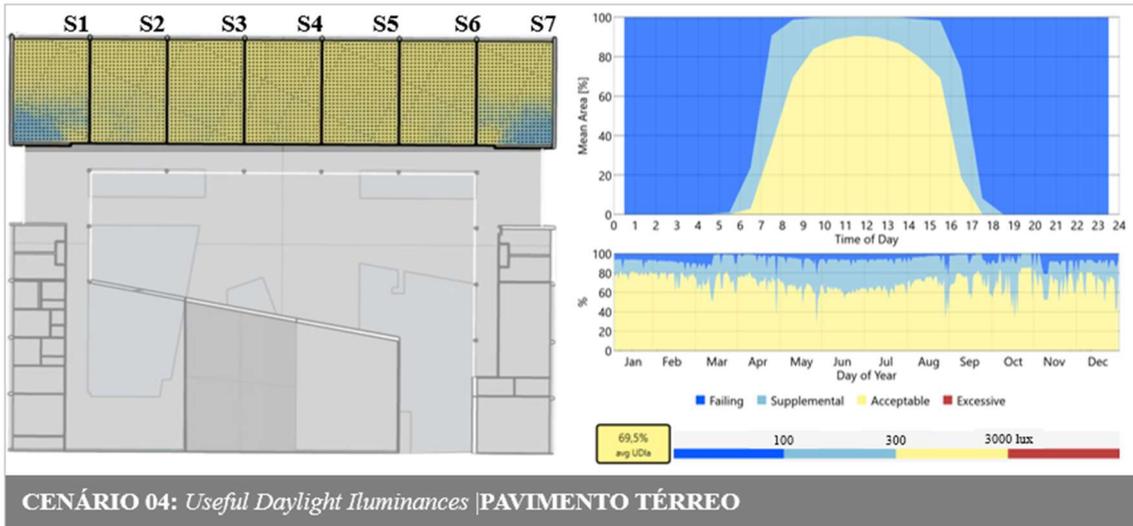
CENÁRIO 03: Mapa de Iluminância | PRIMEIRO PAVIMENTO

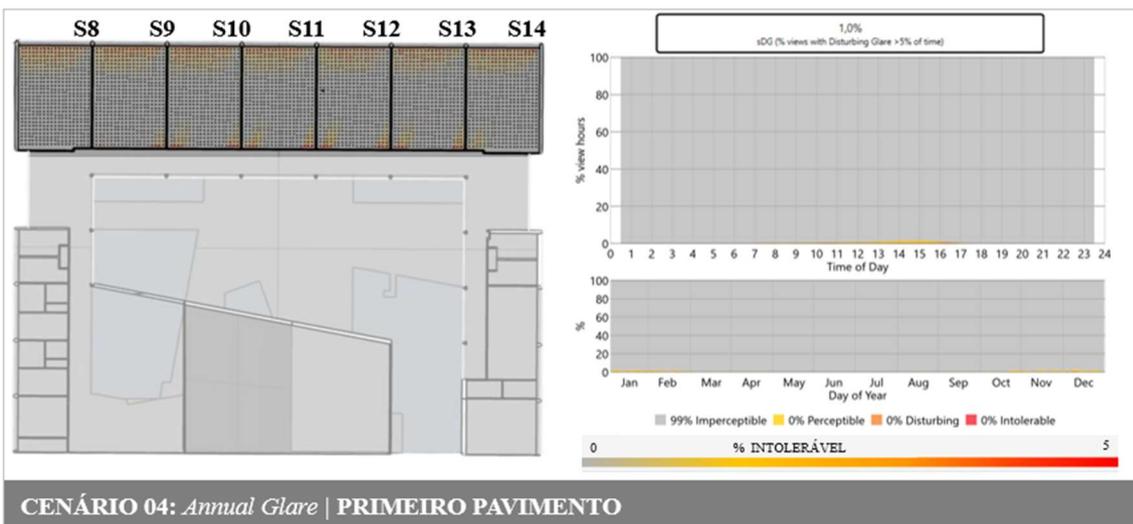
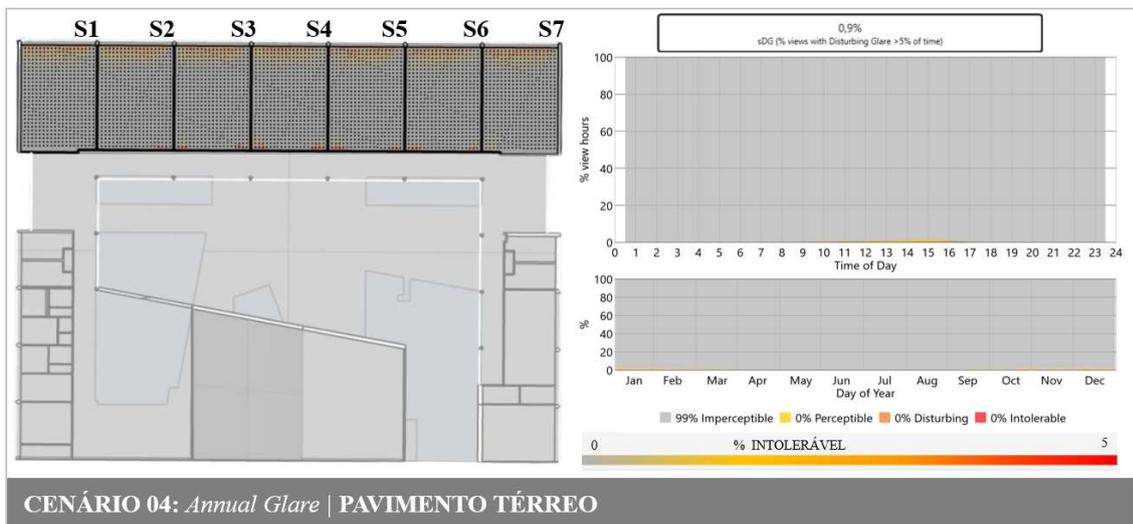
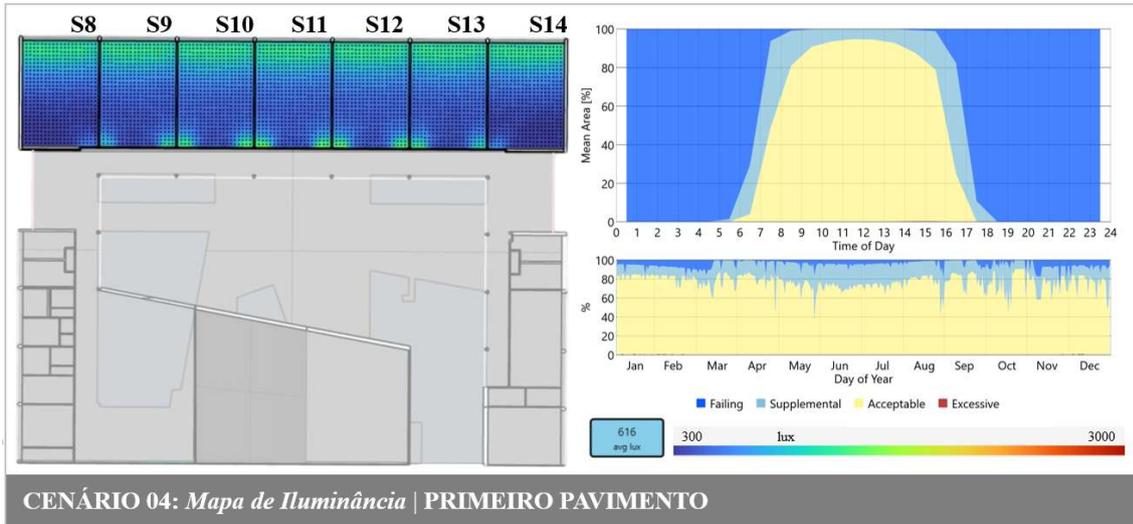


CENÁRIO 03: Annual Glare | PAVIMENTO TÉRREO



CENÁRIO 03: Annual Glare | PRIMEIRO PAVIMENTO





APÊNDICE F

Pré-dimensionamento do sistema fotovoltaico com a planilha de dimensionamento básico do Ministério de Minas e Energia

Dados: COBERTURA TOTAL			Dados: COBERTURA BLOCO DE SALAS DE AULA		
Item	Valor	Unidade	Item	Valor	Unidade
Irradiação anual (GHI)	2002,3	kWh/m ²	Irradiação anual (GHI)	2002,3	kWh/m ²
Eficiência do módulo fotovoltaico	20,0%		Eficiência do módulo fotovoltaico	20,0%	
Área do módulo fotovoltaico	2,7	m ²	Área do módulo fotovoltaico	2,7	m ²
Perdas estimadas	20%		Perdas estimadas	20%	
Geração anual por módulo	864,99	kWh	Geração anual por módulo	864,99	kWh
Este é um módulo de aproxim.	540	Wp	Este é um módulo de aproxim.	540	Wp

Limitação: Área disponível			Limitação: Área disponível		
Área total disponível	1861	m ²	Área total disponível	975	m ²
Fator de utilização da área	70%		Fator de utilização da área	70%	
Área possível a ser coberta por módulos	1302,7	m ²	Área possível a ser coberta por módulos	682,5	m ²
Número de módulos	482	unidades	Número de módulos	253	unidades
Potência nominal instalada	260,28	kWp	Potência nominal instalada	136,62	kWp
Geração anual calculada	416926,92	kWh/ano	Geração anual calculada	218843,38	kWh/ano

APÊNDICE G

Intensidade do uso de energia, segundo a plataforma de cálculo do CBS

Download da Ficha Técnica

Universidade e Instituição de Ensino Técnico - Universidade Geral

Universidade e Instituição de ensino técnico em edifício independente com múltiplos andares, cuja função principal é de ensino superior, incluindo faculdades e universidades públicas e privadas. A área bruta da edificação deve incluir todo o espaço dentro do edifício, compreendendo salas de aula, laboratórios de informática, escritórios, cantina, instalações de manutenção, depósitos, banheiros, poços de elevadores e escadas.

Passo 1 - Características do edifício / Modo de uso e operação

Estado	Cidade		
DF	Brasília		
Cidade mais próxima cadastrada no banco de dados			
Área de sala de aula(m ²)	Área de salas com computadores(m ²)	Demais áreas da universidade(m ²)	
1.820,00	360,00	2.137,00	
Área total dos ambientes de sala de aula	Área total das salas de ensino e pesquisa com computadores	Exceto as áreas de gabinetes de professores	
Tipo de sistema de condicionamento de ar		Renovação de ar	
Ventilador		não tem	
Iluminação (W/m ²)	Turno	Densidade de alunos em sala de aula	
6,15	manhã/tarde/noite	1,30	
Densidade de potência de iluminação instalada (W/m ²)		valor de área em m2 por aluno	

Cenário Base

Passo 2 - Dados de Consumo
Passo 3: Benchmarking

Período para lançamento Ano <input type="text"/>	<div style="background-color: #4CAF50; color: white; padding: 10px; border-radius: 10px; width: 80px; margin: 0 auto;"> ✓ Eficiente <h2 style="margin: 0;">76,85</h2> kWh m² ano </div>	<div style="text-align: center;"> <p style="font-size: x-small;">Benchmarks</p> <p style="font-size: x-small;">Ineficiente</p> <p style="font-size: x-small;">Típico 130,06</p> <p style="font-size: x-small;">Eficiente 117,26</p> <p style="font-size: x-small;">0</p> <p style="font-size: x-small; transform: rotate(-90deg);">kWh m² ano</p> </div>
Anual 331.780,00		

Cenário Otimizado

Passo 2 - Dados de Consumo
Passo 3: Benchmarking

Período para lançamento Ano <input type="text"/>	<div style="background-color: #4CAF50; color: white; padding: 10px; border-radius: 10px; width: 80px; margin: 0 auto;"> ✓ Eficiente <h2 style="margin: 0;">39,94</h2> kWh m² ano </div>	<div style="text-align: center;"> <p style="font-size: x-small;">Benchmarks</p> <p style="font-size: x-small;">Ineficiente</p> <p style="font-size: x-small;">Típico 130,06</p> <p style="font-size: x-small;">Eficiente 117,26</p> <p style="font-size: x-small;">0</p> <p style="font-size: x-small; transform: rotate(-90deg);">kWh m² ano</p> </div>
Anual 172.430,00		