



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCAT)
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MAYARA COSTA DE LIMA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE
EDIFÍCIO EDUCACIONAL CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE
ENVOLTÓRIA**

CATALÃO

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO

FACULDADE DE ENGENHARIA

Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, número 1120, - Bairro Setor Universitário, Catalão/GO, CEP 75704-020

Telefone: - - <https://www.ufcat.edu.br>

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA)

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DE TESES E DISSERTAÇÕES DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCAT)

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Catalão (UFCAT) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFCAT), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFCAT é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o(a) autor(a) e o(a) orientador(a) Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação ou Tese? **Dissertação**

2. Nome completo do autor: **Mayara Costa de Lima**

Nome completo do(a) orientador(a): **Ed Carlo Rosa Paiva**

3. Título do trabalho

Título: **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFÍCIO EDUCACIONAL CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE ENVOLTÓRIA**

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento: [**X**] SIM [] NÃO¹

[¹] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs.: Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor



Documento assinado eletronicamente por **mayara costa de lima, Usuário Externo**, em 22/10/2025, às 09:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ED CARLO ROSA PAIVA, Orientador(a)**, em 23/10/2025, às 09:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcat.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0254553** e o código CRC **E24576DD**.

MAYARA COSTA DE LIMA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE
EDIFÍCIO EDUCACIONAL CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE
ENVOLTÓRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia, da Universidade Federal de Catalão, como requisito para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil. Área de Concentração: Estruturas e Construção Civil. Linha de pesquisa: Gestão, Tecnologia e Sustentabilidade na Construção Civil.

Orientador: Professor Dr. Ed Carlo Rosa Paiva

CATALÃO
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFCAT.

Lima, Mayara Costa de

Avaliação do desempenho térmico e energético de edifício educacional considerando diferentes tipos de envoltória / Mayara Costa de Lima. - 2025.

125 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Ed Carlo Rosa Paiva.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Catalão, Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Catalão, 2025.

Bibliografia.

Inclui siglas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Conforto térmico. 2. Eficiência energética. 3. Simulação computacional. 4. Desempenho térmico. I. Paiva, Ed Carlo Rosa, orient. II. Título.

CDU 624

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata nº 4 de 2025 da sessão de Defesa de Dissertação de **Mayara Costa de Lima**, que confere o título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Estruturas e Construção Civil.

Ao vigésimo sexto dia do mês de setembro de dois mil e vinte e cinco a partir das 14 horas e 30 minutos, na sala virtual do *Google Meet*, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFÍCIO EDUCACIONAL CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE ENVOLTÓRIA”**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, **Professor Doutor Ed Carlo Rosa Paiva, (PPGEC/UFCAT)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: **Professor Doutor Heber Martins de Paula (PPGEC/UFCAT)**, membro titular interno; e do **Professor Doutor André Luís de Araújo (UFU)**, membro titular externo. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **APROVADA** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela **Professor Doutor Ed Carlo Rosa Paiva**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **ED CARLO ROSA PAIVA, Orientador(a)**, em 26/09/2025, às 16:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **HEBER MARTINS DE PAULA, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/09/2025, às 16:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **André Luís de Araújo, Usuário Externo**, em 26/09/2025, às 16:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcat.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0241773** e o código CRC **26E08DB3**.

A Deus, pela luz no caminho.
À minha família, pelo apoio constante.
A mim mesma, pela coragem e esforço de tornar este sonho realidade.
À comunidade acadêmica, com a esperança de que este trabalho inspire e contribua para a
Arquitetura e a Engenharia Civil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me permitido ingressar no mestrado, concedendo-me forças e oportunidades para concluir esta etapa tão importante da minha vida.

Agradeço a mim mesma, pela coragem e determinação em aceitar este desafio e levá-lo até o fim, conciliando trabalho, mestrado e, posteriormente, a vida docente.

Aos meus pais e à minha irmã, pelo apoio incondicional e contínuo, que foram fundamentais para que eu pudesse trilhar este caminho com confiança e perseverança.

Ao meu orientador, Professor Dr. Ed Carlo Rosa Paiva, pela orientação dedicada, pelas contribuições valiosas e pela paciência ao longo desta jornada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Catalão, que tornou possível minha formação acadêmica em nível de mestrado. Graças a essa experiência, ingressei também na vida docente — uma conquista que levo com grande satisfação.

Agradeço à CAPES pela bolsa de mestrado concedida, que foi essencial para o desenvolvimento desta pesquisa.

Às minhas amigas Ester, que me acolheu em Catalão durante os períodos de aula, e Cíntia, Lorena e Leidiane, pelo suporte, amizade e palavras de incentivo que me acompanharam nos momentos desafiadores.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo registrada a minha mais sincera gratidão.

RESUMO

A busca por eficiência energética e conforto térmico em edificações educacionais torna-se cada vez mais relevante diante do aumento do consumo de energia e das exigências normativas de desempenho no Brasil. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho térmico de um edifício educacional de múltiplos pavimentos, localizado em clima quente e seco, por meio de simulações computacionais considerando diferentes alternativas de envoltória. Foram comparados quatro cenários: modelo base (sem intervenção), fachada vegetada, paredes externas em painéis de poliestireno expandido (EPS) e aplicação de segunda pele ventilada. A metodologia envolveu a modelagem geométrica no software SketchUp, com o plug-in Euclid, e a realização das simulações termoenergéticas no EnergyPlus, a partir de dados climáticos locais, parâmetros de ocupação, cargas internas e propriedades térmicas dos materiais, em conformidade com a ABNT NBR 15575-1:2024 e a INI-C (2022). Os resultados indicaram que tanto o EPS quanto a fachada vegetada não contribuíram para a melhoria do conforto térmico, apresentando, inclusive, aumento das temperaturas internas em comparação ao modelo base. Em contraste, a segunda pele ventilada proporcionou melhorias, reduzindo em até 1 °C a temperatura operativa e diminuindo o consumo energético do sistema HVAC em 2,84%. Adicionalmente, a integração de painéis fotovoltaicos à segunda pele estimou-se capaz de suprir aproximadamente 53% da demanda energética anual da edificação, configurando uma estratégia híbrida de elevada eficiência. Conclui-se que a adoção dessa solução representa uma alternativa viável e replicável para projetos e retrofit em edificações educacionais e institucionais localizadas em climas quentes e secos, unindo estratégias passivas e geração ativa de energia para promover maior eficiência térmica e energética.

Palavras-chave: conforto térmico; eficiência energética; simulação computacional; desempenho térmico.

ABSTRACT

The pursuit of energy efficiency and thermal comfort in educational buildings has become increasingly relevant given the rising energy consumption and performance requirements established by Brazilian standards. This study aimed to evaluate the thermal performance of a multi-story educational building located in a hot and dry climate through computational simulations considering different envelope alternatives. Four scenarios were compared: the base model (without intervention), a vegetated façade, external walls made of expanded polystyrene (EPS) panels, and the application of a ventilated double-skin façade. The methodology involved geometric modeling in SketchUp using the Euclid plug-in and thermoenergetic simulations performed in EnergyPlus, based on local climatic data, occupancy parameters, internal loads, and the thermal properties of materials, in accordance with ABNT NBR 15575-1:2024 and INI-C (2022). The results indicated that both the EPS and the vegetated façade did not contribute to improved thermal comfort, showing even higher indoor temperatures compared to the base model. In contrast, the ventilated double-skin façade provided better performance, reducing operative temperature by up to 1 °C and decreasing HVAC energy consumption by 2.84%. Additionally, the integration of photovoltaic panels into the ventilated façade was estimated to supply approximately 53% of the building's annual energy demand, configuring a highly efficient hybrid strategy. It is concluded that this solution represents a viable and replicable alternative for the design and retrofit of educational and institutional buildings located in hot and dry climates, combining passive strategies and active energy generation to enhance thermal and energy efficiency.

Keywords: thermal comfort; energy efficiency; building simulation; thermal performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escola primária de Gando, 2001.....	41
Figura 2 - (A) Escola Secundária de Lycee Schorge, 2016. (B) Diagrama de resfriamento evaporativo.	41
Figura 3 - Diagrama de ventilação.	42
Figura 4 - Hospital da Restauração, 1951, Recife.	43
Figura 5 - Edifício Copan, 1966, São Paulo.	43
Figura 6 - Edifício Santo Antônio, 1963, Recife.	44
Figura 7 - Edifício Renata Sampaio Ferreira, 1950, São Paulo.....	46
Figura 8 - Esquema do processo metodológico da pesquisa.	69
Figura 9 - Planta baixa Pavimento Térreo.	70
Figura 10 - Planta baixa Primeiro Pavimento.....	70
Figura 11 - Planta baixa Segundo Pavimento.....	71
Figura 12 - Fachada Sudoeste.....	71
Figura 13 - Fachada Nordeste.....	72
Figura 14 - Carta bioclimática apresentando as normais climatológicas da cidade de Catalão, GO.	75
Figura 15 - Gráfico de temperaturas da cidade de Catalão- GO, ano de 2016.....	77
Figura 16 - O gráfico de umidade relativa da cidade de Catalão- GO, ano de 2016.....	77
Figura 17 - O gráfico de temperatura e zona de conforto da cidade de Catalão- GO, ano de 2016.	78
Figura 18 - O gráfico da rosa dos ventos da cidade de Catalão-GO.	79
Figura 19 - Modelagem da edificação no Revit.	81
Figura 20 - Modelagem da edificação no Revit.	81
Figura 21 - Modelo exportado do Revit para o OpenStudio.	82
Figura 22 - (a) Fachada Sudoeste; (b) Fachada Noroeste.....	83
Figura 23 - Fachada Nordeste.....	83
Figura 24 - (a) planta baixa do pavimento térreo; (b) planta baixa do primeiro pavimento. ...	84
Figura 25 - Planta baixa do segundo pavimento.....	84
Figura 26 - (a) fachada nordeste, sala 108; (b) fachada sudoeste, sala 205 e 301.....	84
Figura 27 - Fachada Noroeste; (b) Fachada Sudoeste.	86
Figura 28 - Proposta do modelo Fachada Vegetada.	87

Figura 29 - Proposta do modelo Fachada Vegetada.	87
Figura 30 - (a) fachada noroeste; (b) fachada sudoeste.	88
Figura 31 - Esquema da camada de vegetação.	88
Figura 32 - Gráfico das Temperaturas operativas da Sala 108, no dia mais quente do ano simulado (29/10).	93
Figura 33 - Gráfico das Temperaturas operativas da Sala 205, no dia mais quente do ano simulado (29/10).	94
Figura 34 - Gráfico das Temperaturas operativas da Sala 301, no dia mais quente do ano simulado (29/10).	95
Figura 35 - Gráfico das Temperaturas operativas da Sala 108, no dia típico de inverno (10/06).	97
Figura 36 - Gráfico das Temperaturas operativas da Sala 205, no dia típico de inverno (10/06).	97
Figura 37 - Gráfico das Temperaturas operativas da Sala 301, no típico de inverno (29/10). ..	98
Figura 38 - Gráfico do consumo mensal do sistema HVAC de cada cenário simulado.	102
Figura 39 - EPS causa sobreaquecimento em edifícios	105
Figura 40 - A vegetação aplicada diretamente não melhora o desempenho térmico.	106
Figura 41 - A segunda pele ventilada melhora o desempenho do edifício.	107
Figura 42 - Compreendendo as mudanças de temperatura interna ao longo do dia.	108
Figura 43 - Influência da altura e da exposição solar na temperatura interna.	109
Figura 44 - Comportamento térmico das salas baseado na exposição solar e localização.	110
Figura 45 - Eficácia e aplicabilidade das estratégias passivas simuladas.	111

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estratégias bioclimáticas para conforto térmico de edificações em Catalão.	79
Quadro 2 - Síntese dos modelos simulados.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de taxas metabólicas de algumas atividades.	28
Tabela 2 - Distribuição do sistema de iluminação.....	73
Tabela 3 - Levantamento da quantidade de equipamentos de climatização.....	74
Tabela 4 - Temperaturas mínimas e máximas de conforto térmico para a cidade de Catalão.	78
Tabela 5 - Média das temperaturas medidas in loco e simuladas.....	85
Tabela 6 - Propriedade térmica dos materiais.	89
Tabela 7 - Temperatura do solo.....	90
Tabela 8 - Configuração do arquivo de simulação.	90
Tabela 9 - Resumo de comparação das médias de temperaturas das estratégias simuladas, em 29/10, dia típico mais quente.....	96
Tabela 10 - Resumo de comparação das médias de temperaturas das estratégias simuladas, em 10/06, dia típico de inverno.	98
Tabela 11 - Resumo do consumo mensal do sistema HVAC de cada cenário simulado.	103
Tabela 12 - Estimativa da geração de energia em kWh, para 30 dias.	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMA	Amplitude Média Anual
APP	Ambiente Principal de Permanência
APT	Ambiente Principal de Trabalho
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BEM	Building Energy Model
BIM	Building Information Modeling
CgTAAPP	Carga Térmica de Aquecimento Anual do APP
CgTRAPP	Carga Térmica de Resfriamento Anual do APP
CgTTAPP	Carga Térmica Total do APP
CT	Capacidade Térmica
DCE	Diretório Central dos Estudantes
DOE	Department of Energy
dpA	Desvio Padrão da Amplitude
dpT	Desvio Padrão da Temperatura
EN	European Committee for Standardization
EPS	Poliestireno Expandido
ETI	Índice de Temperatura Efetiva
gbXML	Green Building XML
GBS	Green Building Studio
HVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
IES	Integrated Environmental Solutions
IFC	Industry Foundation Classes
IDF	Input Data File
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISO	International Organization for Standardization
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MET	Equivalentes Metabólicos de Tarefa

NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
NIBS	National Institute of Building Sciences
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PHFTAPP	Percentual de Horas de Ocupação do APP dentro da Faixa de Temperatura Operativa
PMV	Voto Médio Previsto
PPD	Percentual Previsto de Insatisfeitos
Procel edifica	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
Projeteee	Projetando Edificações Energeticamente Eficientes
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais
TBS	Temperaturas de Bulbo Seco
TBU	Bulbo Úmido
TMA	Temperatura Média Anual
TRM	Temperatura Radiante Média
UFCAT	Universidade Federal de Catalão
UR	Umidade Relativa do Ar
U	Transmitância Térmica
WC PNE	Banheiro para Portadores de Necessidades Especiais

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
1.1 Justificativa.....	20
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivos Específicos:	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Conforto térmico	23
2.1.1 Variáveis do conforto térmico	25
2.1.1.1 Temperatura radiante média (TRM)	25
2.1.1.2 Temperatura do ar	26
2.1.1.3 Velocidade do ar	26
2.1.1.4 Umidade do ar.....	27
2.1.1.5 Metabolismo	28
2.1.1.6 Vestimenta	29
2.2 Conforto térmico em ambientes educacionais	29
2.2.1 Variação de faixa de conforto térmico no ambiente escolar.....	33
2.3 Desempenho térmico em edificações.....	35
2.3.1 Simulações de desempenho térmico em edificações	36
2.4 Arquitetura bioclimática	39
2.5 Normas internacionais	46
2.6 Softwares de simulação térmica e energética.....	48
2.7 Metodologia BIM.....	52
2.8 A utilização do REVIT para simulações térmicas e energéticas.....	55
2.8.1 Precisão das simulações	56
2.8.2 Limitações em normas locais	59
2.8.3 Facilidade de uso e interface.....	60
2.8.4 Limitações de edição e personalização.....	61
2.9 Interoperabilidade entre o BIM e BEM para simulações energéticas.....	62
3 METODOLOGIA.....	68
3.1 Natureza da Pesquisa e Objeto de Estudo.....	68
3.2 Caracterização do Edifício	69
3.2.1 Sistema de Iluminação	72
3.2.2 Sistema de condicionamento de ar	73
3.3 Caracterização do clima de Catalão – zona bioclimática 4B.....	74
3.3.1 Clima de Catalão segundo a NBR 15220-3:2024	74
3.3.2 Estratégias Projetuais para a Zona Bioclimática 4B.....	75
3.3.3 Dados climáticos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a cidade de Catalão.....	76
3.4 Modelagem Digital	80

3.4.1	Criação do modelo tridimensional do edifício	82
3.4.2	Validação do modelo	84
3.4.3	Cenários de simulação	85
3.4.4	Propriedade Térmica dos materiais.....	88
3.4.5	Configuração das simulações.....	89
3.5	Limitações encontradas e transição metodológica	90
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	92
4.1	Dia típico mais quente do ano	92
4.2	Dia típico de inverno	96
4.3	Comparação entre o desempenho térmico do Modelo Base e Modelo EPS	99
4.4	Comparação entre o desempenho térmico do Modelo Base e Modelo Parede Vegetada	100
4.5	Consumo de energia elétrica	102
4.6	Estimativa de Geração de Energia dos Painéis Fotovoltaicos	103
4.7	Discussão dos resultados.....	105
4.7.1	Desempenho comparativo das estratégias passivas.....	105
4.7.2	Tendências térmicas observadas nas salas simuladas.....	108
4.7.3	Recomendações de aplicação	110
	CONCLUSÃO	112
	REFERÊNCIAS	115

INTRODUÇÃO

Ambientes de uso público e comercial, como edifícios educacionais, apresentam elevada geração interna de calor devido à alta densidade de ocupação, uso intensivo de equipamentos eletrônicos e iluminação artificial. Essa combinação acarreta um aumento da temperatura interna, tornando essencial o uso de sistemas de climatização artificial para garantir o conforto térmico dos usuários (COSTA et al., 2013). No entanto, diante do impacto energético e ambiental associado ao uso contínuo de ar-condicionado, torna-se indispensável que o projetista busque soluções que combinem estratégias passivas e artificiais, promovendo eficiência energética sem comprometer o conforto. Nesse sentido, a integração de sistemas de climatização com soluções arquitetônicas bioclimáticas tem se mostrado promissora (KOLOKOTSA et al., 2009).

Dentre os elementos arquitetônicos que mais influenciam o desempenho térmico, destacam-se os sistemas de aberturas, os materiais da envoltória e os dispositivos de sombreamento. A correta localização e dimensionamento das aberturas pode favorecer a ventilação e a iluminação naturais, enquanto o uso adequado de esquadrias, vidros e elementos de proteção solar contribui para a redução do ganho térmico, evitando o efeito de “edifício-estufa” (GIVONI, 1998; OLGYAY, 1963). Além disso, o tipo de revestimento das fachadas deve ser compatível com o clima local, preferencialmente com baixa transmitância térmica, a fim de minimizar a transferência de calor para o interior do edifício.

Nesse contexto, a inércia térmica e o atraso térmico constituem propriedades fundamentais para a avaliação do comportamento térmico das edificações. Segundo Rivero (1986), a inércia térmica refere-se à capacidade dos materiais de armazenar calor e liberá-lo gradualmente, atuando como um moderador natural das variações de temperatura interna. Já o atraso térmico corresponde ao intervalo de tempo entre o pico de temperatura no exterior e o pico no interior da edificação, refletindo a defasagem com que o calor é transmitido através da envoltória. Assim, materiais de elevada massa térmica, como alvenaria maciça, concreto e adobe, proporcionam maior estabilidade térmica e contribuem para o conforto ambiental, especialmente em climas com grande amplitude térmica diária (RIVERO, 1986).

Soluções como o uso de vidros de controle solar, materiais externos de alta refletância e ventilação cruzada são amplamente documentadas na literatura como eficazes para promover conforto térmico e reduzir a demanda por resfriamento artificial (LEE et al., 2002; LEVINSON et al., 2005).

No contexto brasileiro, a importância do desempenho térmico em edificações vem sendo reconhecida por meio de normativas específicas. A ABNT NBR 15575-1:2024, voltada para o setor habitacional, estabelece faixas de temperatura operativa aceitáveis para diferentes zonas bioclimáticas do país, bem como critérios de isolamento e ventilação natural. Já a Instrução Normativa Inmetro Para A Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) (INMETRO, 2022), aplicada a edificações comerciais, de serviços e públicas, estabelece critérios de eficiência energética baseados na envoltória, nos sistemas de iluminação e de climatização. Embora nenhuma dessas normas seja específica para escolas, ambas fornecem parâmetros técnicos robustos que podem ser utilizados como referência para análise do desempenho térmico em ambientes educacionais.

As simulações computacionais surgem como ferramenta fundamental nesse processo. As normativas citadas recomendam o uso dessas simulações para prever o comportamento térmico de edificações ao longo do ano, considerando diferentes condições climáticas. Elas permitem antecipar pontos críticos de desconforto, avaliar o impacto de estratégias projetuais e orientar a tomada de decisões com base em dados quantificáveis (JI et al., 2022). Dentre os principais benefícios destacam-se: a previsão do consumo energético; a otimização do desempenho térmico; a redução de custos operacionais ao longo da vida útil da edificação; e a verificação da conformidade com normas e regulamentos técnicos.

A crescente quantidade de estudos focados em edifícios escolares reflete a busca por soluções que promovam a sustentabilidade para as atuais e futuras gerações, minimizando os impactos ambientais e melhorando o conforto térmico desses ambientes. O bom rendimento das atividades humanas está diretamente relacionado às condições internas das edificações (THEODOSIOU e ORDOUMPOZOANIS, 2008).

1.1 Justificativa

A crescente demanda por edificações mais eficientes do ponto de vista energético e adaptadas ao clima local tem impulsionado estudos sobre o desempenho térmico de ambientes construídos. No entanto, apesar da relevância do tema, ainda há uma escassez de normas específicas voltadas para o contexto educacional brasileiro.

Nesse cenário, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de avaliar, por meio de simulações computacionais, a efetividade de estratégias bioclimáticas já consolidadas na literatura quando aplicadas a uma edificação educacional real: neste caso, o Bloco Didático 1

da Universidade Federal de Catalão (UFCAT). Estudos anteriores (ADIANE BORGES et al., 2016) já indicaram elevados níveis de desconforto térmico nesse edifício, especialmente na sala 301, voltada para a fachada com maior incidência solar. Tais desconfortos são atribuídos à configuração arquitetônica, orientação solar e materiais construtivos utilizados.

As simulações computacionais serão realizadas no software EnergyPlus. A avaliação será conduzida com foco em estratégias bioclimáticas, como sombreamento por segunda pele, uso de vegetação na fachada e aplicação de materiais isolantes. Essas estratégias serão aplicadas individualmente ao modelo da edificação para analisar seu impacto no conforto térmico interno.

A eficácia de cada estratégia será medida por meio do parâmetro de temperatura operativa, considerado mais representativo da sensação térmica percebida pelos usuários por incorporar os efeitos da temperatura do ar e da radiação térmica média (ABNT, 2024; INMETRO, 2022). Com isso, buscar-se-á compreender como cada solução se comporta no contexto específico da edificação estudada, levando em conta sua geometria, orientação, taxa de ocupação, sistema construtivo e sua localização (Zona Bioclimática 4B). Assim, espera-se identificar qual intervenção apresenta melhor resposta térmica para a realidade estudada.

Trata-se de um estudo de caso com abordagem prática e aplicada, que busca gerar dados concretos sobre o comportamento térmico de uma edificação educacional existente. Os resultados obtidos visam subsidiar decisões técnicas para intervenções pontuais que aprimorem o conforto térmico e a eficiência do edifício analisado, com base em critérios normativos consolidados. Espera-se, também, que as evidências encontradas possam orientar futuras estratégias de adequação em outras edificações da universidade. Além disso, os resultados obtidos podem contribuir com o arcabouço do conhecimento sobre o tema, podendo servir de referência para a concepção de novas construções, ou mesmo em intervenções de retrofite, em contextos similares.

1.2 Objetivos

Avaliar o desempenho térmico de um edifício educacional de múltiplos pavimentos localizado em clima quente e seco, considerando diferentes configurações de envoltória e estratégias bioclimáticas.

1.2.1 Objetivos Específicos:

1. Modelar o edifício objeto de estudo de forma termicamente representativa, considerando sua geometria, materiais construtivos, taxas de ocupação e condições climáticas da Zona Bioclimática 4B;
2. Simular o desempenho térmico do edifício-base sem intervenções, utilizando os parâmetros normativos das normas ABNT NBR 15575-1:2024 e INMETRO (2022);
3. Criar cenários diferentes para simulação (modelo fachada vegetada, modelo de EPS núcleo da parede externa, modelo segunda pele ventilada);
4. Avaliar e comparar o desempenho térmico dos diferentes cenários simulados, com base no parâmetro de temperatura operativa, identificando a estratégia que apresenta os melhores resultados considerando as condições específicas do edifício estudado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conforto térmico

O conforto térmico refere-se à sensação de bem-estar térmico dos ocupantes de um edifício, sendo influenciado por fatores ambientais e humanos. Entre as variáveis ambientais mais importantes estão a temperatura do ar, umidade relativa, temperatura radiante, ventilação e radiação térmica (LAMBERTS *et al.*, 2014). Já as variáveis humanas incluem a resistência térmica das roupas e a taxa metabólica associada à atividade física. Segundo Lamberts *et al.* (2011) o conceito de conforto térmico se refere ao estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda, existindo muitas variações físicas, psicológicas e fisiológicas entre as pessoas, o que dificulta agradar a todos por igual. Os fatores físicos representam as trocas de calor entre o corpo e o ambiente. Os fatores fisiológicos estão relacionados às reações de resposta que o corpo humano apresenta mediante a interação com o meio (como por exemplo, transpiração por causa do calor) e, por fim, fatores psicológicos que estão ligados às diferentes reações de cada indivíduo quando expostos aos estímulos sensoriais.

Por outro lado, a ASHRAE 55 (2017) define conforto térmico de forma mais subjetiva, como "o estado de espírito do usuário que expressa satisfação com o ambiente térmico em que está inserido". Essa definição não especifica o que seria "estado de espírito" ou "satisfação", mas indica que o conforto é um processo cognitivo que envolve tanto fatores fisiológicos quanto psicológicos.

O ser humano é homeotérmico, mantendo sua temperatura interna em torno de 37 °C, com pequenas variações (FROTA e SCHIFFER, 2001). Para permanecer nessa faixa de temperatura em diferentes ambientes, o corpo utiliza seu sistema termorregulador, que permite reduzir os ganhos ou aumentar as perdas de calor por meio de mecanismos específicos. Esse processo de termorregulação exige um esforço adicional do corpo humano, diminuindo sua eficiência. A sensação de conforto térmico ocorre quando o organismo consegue dissipar para o ambiente o calor gerado pelo metabolismo da atividade realizada, sem precisar ativar mecanismos de termorregulação (ALVIM, 2015).

As roupas atuam como isolantes térmicos, quanto maior a resistência térmica, menores serão as trocas de calor realizadas pela pele por meio de convecção e radiação. Em climas secos, vestimentas adequadas podem reter a umidade gerada pela evaporação do suor, criando um microclima mais confortável e evitando a perda excessiva de líquidos corporais por evaporação

(LAMBERTS *et al.*, 2011). Além disso, as roupas diminuem o ganho de calor proveniente da radiação solar direta e ajudam a manter o efeito refrigerador do suor (FROTA e SCHIFFER, 2001).

A atividade física realizada é fundamental na geração de calor pelo metabolismo, influenciando diretamente a temperatura da pele e a taxa de transpiração do indivíduo (LAMBERTS *et al.*, 2011). Para que o conforto térmico seja alcançado, é essencial que a temperatura corporal permaneça dentro de limites estreitos e que a umidade da pele se mantenha baixa (ASHRAE 55, 2017). É importante notar que o desconforto térmico pode surgir de fatores localizados, mesmo quando a temperatura corporal geral é considerada confortável. Esses fatores incluem variações de temperatura verticalmente (dos pés à cabeça), assimetria de radiação, correntes de ar frias localizadas e contato com superfícies frias ou quentes (LAMBERTS *et al.*, 2011; KING e OSMOND, 2012).

Embora a ASHRAE 55 (2017) defina a condição de conforto térmico considerando esses fatores, alguns estudos, como os desenvolvidos por Lamberts *et al.* (2011), enfatizam que a abordagem adaptativa também deve ser considerada. Essa abordagem sugere que o conforto térmico é resultado da adaptação do corpo humano ao ambiente externo, e não apenas das condições internas controladas. Isso implica que o conforto pode variar conforme o ambiente externo, aos hábitos individuais e culturais, desafiando a uniformidade das definições tradicionais de conforto térmico.

De acordo com o modelo adaptativo de conforto térmico proposto por Humphreys (1979), as pessoas têm a capacidade de se adaptar a uma ampla gama de condições térmicas através de mudanças comportamentais, fisiológicas e psicológicas. Esse modelo sugere que o conforto térmico não é apenas uma questão de manter condições estritamente controladas, mas também de permitir que os indivíduos façam ajustes, como mudar de roupa, ajustar a ventilação ou modificar a atividade física, para alcançar o conforto. Além disso, a expectativa e a experiência prévia com diferentes climas desempenham um papel fundamental na percepção de conforto, indicando que o conforto térmico é mais subjetivo e contextual do que as definições tradicionais sugerem.

Portanto, enquanto a ASHRAE 55 (2017) e Lamberts *et al.* (2011) destacam a importância de condições internas controladas para o conforto térmico, é essencial considerar a flexibilidade e a adaptabilidade dos indivíduos às condições externas e às suas preferências pessoais. Isso implica uma abordagem mais holística e menos rígida na definição e busca pelo conforto térmico.

Estudar conforto térmico tem a finalidade de possibilitar a proposição de condições mínimas adequadas que proporcionem bem-estar aos ocupantes, permitindo que haja maior produtividade e rendimento nas atividades humanas. O corpo humano, por ser um sistema termodinâmico regido pelas leis da física, apresenta um sistema de trocas de calor com o meio, produzindo calor e interagindo com o ambiente a todo instante. Sendo assim, cada indivíduo apresenta um esforço distinto para se manter em balanço térmico com o meio, acarretando diferentes respostas fisiológicas.

A concepção do projeto deve ser pensada com a finalidade de atender os requisitos do desempenho térmico, pois a maneira que a edificação interage com o ambiente é afetada por diversos aspectos como: exposição solar dos elementos que compõem a envoltória, ganho de calor solar, capacidade de promover a refrigeração passiva e favorecimento da ventilação natural. Os aspectos projetuais que contribuem com interações citadas são: forma da edificação, orientação da implantação do edifício, tratamento da área externa, ventilação interna (se favorece ou não as trocas de calor), características térmicas dos materiais escolhidos, dimensões e sombreamento das aberturas.

2.1.1 Variáveis do conforto térmico

As variáveis ambientais que influenciam no conforto térmico e que podem ser medidas diretamente incluem a temperatura do ar, a temperatura radiante, a umidade relativa e a velocidade do ar. Além disso, a atividade física e o vestuário dos ocupantes são fatores que afetam a sensação de conforto térmico humano (LAMBERTS *et al.*, 2011).

2.1.1.1 Temperatura radiante média (TRM)

A temperatura radiante média é a temperatura uniforme em um ambiente, obtida através das variáveis de temperatura do ar. Para medir a TRM, utiliza-se frequentemente o termômetro de globo, que integra a temperatura do ar, a velocidade do vento e a radiação térmica recebida de todas as superfícies circundantes (ASHRAE 55, 2017). A TRM considera a influência da radiação térmica no ambiente, sendo essencial para determinar o conforto térmico percebido pelos ocupantes.

A TRM é particularmente relevante em ambientes onde a radiação térmica pode variar, como em edifícios com grandes superfícies envidraçadas ou em áreas industriais com

equipamentos que emitem calor. A medição precisa da TRM é fundamental para a avaliação do índice de temperatura efetiva (ETI) e do índice de conforto térmico (Voto Médio Previsto - PMV¹), que são utilizados para projetar sistemas de climatização mais eficientes e assegurar o bem-estar dos ocupantes (FANGER, 1970; ISO 7726, 1998).

Estudos mostram que a temperatura radiante pode influenciar a sensação térmica dos indivíduos, especialmente em ambientes onde as superfícies possuem temperaturas muito diferentes da temperatura do ar. Por exemplo, em um escritório com janelas grandes e exposição solar direta, a TRM pode ser mais alta do que a temperatura do ar, levando a desconforto térmico se não for adequadamente controlada (PARSONS, 2002).

2.1.1.2 Temperatura do ar

A temperatura do ar influencia diretamente o balanço térmico do corpo humano. Ela é a variável mais importante para o conforto térmico, pois dependendo da temperatura do ambiente, o corpo humano pode liberar mais ou menos calor para o meio, podendo provocar as sensações de conforto ou desconforto térmico. Temperaturas inadequadas podem causar desconforto, reduzindo a produtividade e o bem-estar dos ocupantes. A ASHRAE 55 (2017) estabelece faixas de temperatura recomendadas para conforto térmico em ambientes internos, que variam geralmente entre 20 °C e 24 °C no inverno e entre 23 °C e 26 °C no verão.

2.1.1.3 Velocidade do ar

Para medir a velocidade do ar, é necessário definir sua magnitude e direção. A velocidade do ar em ambientes internos geralmente apresenta valores baixos, mas é um fator importante para o conforto térmico dos ocupantes. A velocidade do ar influencia a troca de calor entre o corpo humano e o ambiente. Quanto maior a velocidade do ar, seja ele natural ou produzido de forma artificial, maior será a perda de calor pela pele. Isso ocorre porque o ar em movimento acelera a evaporação do suor, removendo a água que está em contato com a pele e, assim, reduzindo a sensação de calor (ASHRAE 55, 2017). Existem dois tipos principais de equipamentos para medir a velocidade do ar, sendo eles o termo-anemômetro e o Anemômetro Giratório (ou Anemômetro de Hélice).

¹ Predicted Mean Vote

O Termo-Anemômetro é um aparelho mais sensível, ideal para medições em ambientes internos. Ele funciona medindo a diferença de temperatura entre dois sensores, um aquecido e outro à temperatura do ar, para determinar a velocidade do fluxo de ar. Devido à sua sensibilidade, é adequado para detecções precisas em ambientes onde a velocidade do ar é baixa (LIU *et al.*, 2011). O Anemômetro Giratório possui hélices que se movem de acordo com a velocidade do vento. Embora seja mais robusto e adequado para medições externas ou onde a velocidade do ar é relativamente alta, ele apresenta menor precisão para velocidades baixas (HOBBS, 2020).

2.1.1.4 Umidade do ar

A variável em questão mede a quantidade de vapor de água presente no ar, conhecida como umidade. A umidade é importante para determinar as trocas de calor que ocorrem por evaporação entre o corpo humano e o ambiente. A umidade influencia diretamente o conforto térmico e a percepção de calor dos ocupantes de um ambiente. A Umidade Absoluta é a massa de vapor de água presente em um volume específico de ar, sendo medida em gramas de vapor de água por metro cúbico de ar (g/m^3). Já a Umidade Relativa é a relação entre a quantidade de vapor de água presente no ar e a quantidade máxima que o ar poderia conter à mesma temperatura, expressa em porcentagem (%). A umidade relativa é uma medida mais comum porque reflete como o ambiente "sente" para os ocupantes em termos de conforto térmico.

A umidade absoluta pode ser medida diretamente através de higrômetros eletrolíticos ou calculada a partir de combinações de variáveis. Os Higrômetros Eletrolíticos utilizam sensores que medem a condutividade elétrica, que varia com a quantidade de vapor de água no ar (WALKER e CAMPION, 1965). Esses sensores são precisos e podem fornecer leituras em tempo real.

A umidade absoluta também pode ser determinada indiretamente combinando medições de outras variáveis, como a temperatura do ar e a umidade relativa, ou a temperatura do ar (temperatura de bulbo seco) e a temperatura de bulbo úmido. Fórmulas psicrométricas e gráficos de psicrometria são usados para essas conversões (ASHRAE 55, 2017). O psicrômetro é um dispositivo que mede a temperatura de bulbo seco (temperatura do ar) e a temperatura de bulbo úmido (temperatura medida com um termômetro envolto em um pano úmido). A diferença entre essas duas temperaturas permite calcular a umidade relativa e, por consequência, a umidade absoluta.

A umidade do ar afeta a capacidade do corpo humano de dissipar calor através da evaporação do suor. Em ambientes com alta umidade, a evaporação do suor é inibida, o que pode levar a uma sensação de calor excessivo e desconforto. Para temperaturas elevadas, uma baixa umidade do ar pode aumentar a sensação de conforto térmico até certo ponto, pois facilita a evaporação do suor, ajudando o corpo a dissipar calor de forma mais eficiente. Por outro lado, em ambientes com baixa umidade, a evaporação é facilitada, o que pode causar sensação de frio e ressecamento da pele e mucosas (FANGER, 1970). Portanto, há um equilíbrio necessário entre a umidade do ar e a temperatura para atingir o conforto térmico ideal.

2.1.1.5 Metabolismo

Dentre as variáveis que influenciam no conforto térmico, está o metabolismo, que varia de acordo com a atividade realizada e pode ser influenciado por diversas características individuais, como sexo, peso, idade, altura, entre outros. A taxa metabólica é a quantidade de energia produzida pelo corpo e é uma das principais determinantes da sensação térmica.

O metabolismo é medido em unidades de watts por metro quadrado de superfície corporal (W/m^2). A taxa metabólica varia com diferentes tipos de atividades físicas. Atividades sedentárias, como estar sentado, apresentam taxas metabólicas mais baixas, enquanto atividades físicas intensas, como esportes, apresentam taxas mais altas (ASHRAE 55, 2017; ISO, 2004; ISO, 2005).

De acordo com a ASHRAE 55 (2017) e a ISO 7730 (2005), a taxa de metabolismo para a atividade física de estudar, que é considerada uma atividade sedentária, é tipicamente baixa. Esta taxa pode ser medida em unidades de equivalentes metabólicos de tarefas (MET) ou em W/m^2 de superfície corporal. O MET é uma unidade que representa a taxa metabólica durante uma atividade específica em comparação com a taxa metabólica de repouso. Para atividades sedentárias como estudar, a taxa metabólica é geralmente considerada entre 1,0 e 1,2 METs, o que equivale a 58 a 70 W/m^2 . Na Tabela 1 estão apresentados os valores de algumas atividades.

Tabela 1 - Valores de taxas metabólicas de algumas atividades.

Atividade	Metabolismo	
	W/m^2	MET
Sentado, relaxado	58	1,0
Em pé relaxado ou atividade sedentária (escritório, escola, etc.)	70	1,2

Fonte: ISO 7730 (2005).

2.1.1.6 Vestimenta

A vestimenta atua como um isolante térmico, apresentando resistência às trocas de calor entre o corpo e o ambiente. Essa resistência é fundamental para o conforto térmico, pois a roupa minimiza a sensibilidade do corpo em relação à velocidade do ar e às variações de temperatura. As roupas fornecem uma barreira que reduz a perda de calor do corpo para o ambiente ou, em condições quentes, impedem a entrada excessiva de calor. A eficácia desse isolamento térmico depende do tipo de tecido, da espessura e do ajuste das roupas. As vestimentas ajudam a moderar a sensação térmica ao diminuir a exposição direta do corpo às mudanças rápidas na temperatura ambiente e ao fluxo de ar. Isso é particularmente importante em ambientes com correntes de ar ou onde a temperatura varia.

Cada tipo de tecido e estilo de roupa possui uma resistência térmica distinta, que é expressa em clo (unidade de isolamento térmico). De acordo com Lamberts *et al.* (2014), 1 clo representa uma resistência térmica de $0,155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$, o que equivale a um terno completo, enquanto uma camiseta leve pode fornecer cerca de 0,1 clo. Além disso, o tamanho e a quantidade de peças de roupa também influenciam a resistência térmica total. Os índices de resistência térmica dos tipos de vestimenta podem ser encontrados na ASHRAE 55 (2017) ou na ISO 7730 (2005).

2.2 Conforto térmico em ambientes educacionais

O ambiente educacional escolar é um espaço de suma importância para o desenvolvimento das capacidades físico-mentais dos indivíduos. Para assegurar um aprendizado eficaz, é essencial que o ambiente escolar ofereça o máximo de conforto possível, considerando que alunos e professores passam longos períodos nesses espaços. Pesquisas indicam que o bem-estar humano, a produtividade no trabalho e o desempenho em testes estão intimamente ligados à qualidade do ambiente interno (SINGH *et al.*, 2019). Isso sugere que nossos sentidos, incluindo audição, olfato, visão e aspectos emocionais, estão conectados à nossa sensação de bem-estar. Diversos estudos destacam que o conforto ambiental, que inclui aspectos térmicos, acústicos e de iluminação, influencia diretamente a eficiência do aprendizado e a saúde dos ocupantes dos edifícios escolares (BURKE & KEELER, 2010).

A sensação de conforto térmico de uma pessoa é influenciada por uma combinação complexa de fatores, incluindo a idade do indivíduo, o clima externo e o tipo de edificação em que ele se encontra. Essas variáveis desempenham um papel importante na determinação da

faixa de temperatura em que uma pessoa se sente confortável. Pesquisas, como a realizada por Arsad et al. (2023), destacam como esses elementos interagem para moldar a experiência térmica em ambientes internos. No entanto, uma questão persistente na literatura e na prática é a ausência de normas regulamentadoras específicas que definam faixas de conforto térmico adaptadas às diferentes faixas etárias. Essa lacuna normativa reflete a complexidade de adaptar as diretrizes de conforto térmico às diversas características fisiológicas e comportamentais de crianças, adolescentes, adultos e idosos.

Rodríguez *et al.* (2019) ressaltam que as normas de conforto térmico para edifícios muitas vezes não são adequadas para ambientes educacionais, condicionando a necessidade de desenvolver diretrizes específicas para escolas. A pesquisa também evidenciou que o conforto térmico pode variar entre os diferentes estágios escolares, sugerindo que as soluções devem ser adaptadas às necessidades específicas de cada grupo etário. Segundo Know e Chun (2003) e De Dear e Brager (1998), padrões e diretrizes localizadas, desenvolvidos com base nas condições climáticas e culturais regionais, podem garantir um melhor conforto térmico nos ambientes projetados.

Atualmente, as normas mais amplamente adotadas para o conforto térmico, como a ASHRAE 55 e a ISO 7730, oferecem diretrizes gerais para ambientes térmicos. Contudo, essas diretrizes são baseadas principalmente em pesquisas com adultos, muitas vezes ignorando as diferenças fisiológicas entre as faixas etárias. Por exemplo, a ASHRAE 55 utiliza modelos de conforto baseados no índice PMV e no Percentual Previsto de Insatisfeitos (PPD²), desenvolvidos com base em estudos com adultos em ambientes controlados, sem considerar as necessidades térmicas específicas de crianças e idosos (ASHRAE 55, 2017).

Padrões de conforto térmico desenvolvidos para uma região climática específica não podem ser aplicados de forma eficaz em outra região. Por exemplo, o que é considerado confortável em um clima temperado pode ser desconfortável em uma região tropical (NICOL & HUMPHREYS, 2002). Segundo Brager e De Dear (2001), sistemas de controle climático personalizados e estratégias de conforto adaptativo podem abordar essas diferenças individuais, fornecendo ambientes térmicos mais adequados e personalizados.

Há uma carência de estudos que investiguem padrões de conforto térmico específicos para diferentes faixas etárias, com a maioria das pesquisas focadas em adultos (ARAÚJO, 2019). A maioria dos estudos são pesquisas de campo em ambientes reais, o que limita as intervenções e pode comprometer a coleta de dados precisos. Além disso, a variabilidade nos métodos de

² *Predicted Percentage of Dissatisfied*

coleta de dados pode dificultar a comparação entre estudos (ARAÚJO, 2019). Outro desafio enfrentado nas pesquisas é a dificuldade em obter respostas precisas e confiáveis de indivíduos na faixa etária de 4 a 6 anos, devido à limitação em sua capacidade de verbalizar sensações térmicas de maneira clara e consistente. Essa falta de informações é preocupante, pois crianças e idosos têm capacidades termorregulatórias diferentes, o que os torna mais suscetíveis a desconfortos térmicos extremos.

Pesquisas como as de Arenhardt e Wander (2017), Silveira et al. (2018) e Freitas et al. (2019), têm mostrado que a percepção de conforto térmico varia entre diferentes grupos etários, devido a diferenças fisiológicas e metabólicas. Silveira et al. (2018) destacam que crianças em idade escolar frequentemente experimentam desconforto térmico em ambientes projetados com base em parâmetros adequados para adultos. Crianças tendem a ser mais sensíveis às variações de temperatura devido a seus sistemas metabólicos em desenvolvimento, o que pode torná-las mais vulneráveis ao desconforto térmico (Arenhardt e Wander, 2017). Além disso, Arenhardt e Wander (2017) mencionam que as estratégias de adaptação térmica, como o uso de ventiladores e sistemas de ar-condicionado, muitas vezes não consideram as necessidades específicas de diferentes faixas etárias, o que pode resultar em condições de desconforto e até mesmo em riscos à saúde.

Considerando os estudantes do ensino superior, Perillo et al. (2017) e Araújo (2019) destacam que adultos jovens têm uma capacidade maior de adaptação térmica em comparação com crianças e adolescentes.

Araújo (2019) enfatiza que os padrões de conforto térmico para adultos são frequentemente utilizados como referência na elaboração de modelos preditivos. A autora destaca que, para os adultos, a faixa de temperatura confortável geralmente está entre 22 °C e 27 °C, com variações dependendo do clima externo e das atividades realizadas.

Estudos realizados por Bernardi e Kowaltowski (2006) discutem a influência das intervenções dos usuários no conforto ambiental das salas de aula, evidenciando que a participação ativa dos ocupantes pode tanto favorecer quanto dificultar as condições de conforto. É importante que as edificações projetadas proporcionem aos usuários possibilidades de adaptação ao longo do tempo, promovendo assim melhores condições. Custódio et al. (2024) acrescentam uma dimensão socioeconômica ao debate, avaliando como o contexto econômico dos estudantes influencia sua percepção de conforto.

Outro ponto importante levantado por Araújo (2019) é a concentração dos estudos em climas específicos, como o quente e úmido, tropical e subtropical, sem a devida atenção às

diferenças regionais e às variações climáticas dentro de um mesmo país, como o Brasil. Essa falta de diversidade nos estudos de campo limita a aplicabilidade das normas existentes, que tendem a ser generalistas e não consideram as variações de clima e idade, o que justifica o presente estudo no sentido de ampliar o conhecimento nos mais diferentes cenários climáticos.

Análises de conforto ambiental em escolas públicas do município de Cajazeiras-PB, considerando os aspectos de conforto térmico, acústico e lumínico verificaram que as temperaturas interna das salas de aula variaram entre 30 °C e 31 °C, com umidade relativa entre 30% e 33% (DIAS *et al.*, 2022). Esses níveis de temperatura e umidade geraram desconforto para os usuários, especialmente após o intervalo, determinando a necessidade de medidas para melhorar o conforto térmico. Em regiões de clima quente, como é o caso de Cajazeiras-PB, onde a temperatura média anual é de 26,1 °C, a radiação solar direta pode causar desconforto.

A avaliação das condições térmicas em escolas públicas no semiárido paraibano observaram uma predominância de desconforto térmico nos ambientes internos das escolas, tanto em períodos secos quanto chuvosos. As salas de aula apresentavam variações de temperatura que resultavam em sensações térmicas desconfortáveis durante a maior parte do dia, especialmente nas horas de aula (PINHEIRO, 2023). A orientação das janelas e a falta de ventilação cruzada foram identificadas como fatores críticos que influenciavam o conforto térmico. O autor recomenda a reavaliação dessas características arquitetônicas, sugerindo a revisão dos materiais de construção, otimização da orientação das aberturas para favorecer a ventilação cruzada e o aumento das áreas de sombreamento ao redor das escolas para reduzir as temperaturas internas.

Pesquisa em quatro salas de aula de duas edificações distintas na Universidade Federal de Goiás, no campus de Goiânia, cujo o objetivo era comparar a percepção dos usuários das salas de aula com os resultados técnicos obtidos da avaliação do conforto ambiental, verificou uma discrepância entre os dados técnicos obtidos e a percepção dos usuários (OCHOA *et al.*, 2012). Mesmo quando as salas estavam dentro da zona de conforto térmico, muitos usuários relataram desconforto, especialmente, durante períodos de altas temperaturas e umidade relativa. A percepção dos usuários sobre o conforto térmico não coincidiu com os dados térmicos, revelando que menos de 90% dos usuários estavam satisfeitos. Isso sugere que, além das configurações técnicas, fatores subjetivos e as preferências pessoais dos ocupantes também influenciam a percepção do conforto térmico.

Apesar da falta de normas específicas, a flexibilidade das diretrizes de conforto térmico permite que os projetistas adaptem as condições térmicas a diferentes contextos e grupos etários. No entanto, essa abordagem exige um nível de especialização e conhecimento. Além

disso, a falta de padrões claros pode resultar em inconsistências na aplicação das diretrizes de conforto térmico, deixando as populações mais vulneráveis expostas a condições inadequadas.

2.2.1 Variação de faixa de conforto térmico no ambiente escolar

No âmbito internacional, Arsad et al. (2023) realizaram uma pesquisa abrangente com 31 artigos relevantes publicados entre 2010 e 2022, para identificar a temperatura de conforto térmico em ambientes internos e as adaptações comportamentais associadas. A pesquisa indica que a faixa de temperatura de conforto térmico em ambientes internos varia de 15,0 a 33,8 °C. Essa faixa variou dependendo de vários fatores, como características climáticas, modo de ventilação, tipo de edifício e idade da população estudada, indicando que idosos e crianças pequenas têm aceitação térmica distinta.

Os autores acima citados, observaram que o clima externo é um fator crítico que afeta a sensação de conforto térmico. Enquanto em países subtropicais, por exemplo, apresentam a faixa mais ampla de temperatura de conforto térmico interno, variando de 15,0 °C a 32,5 °C, nos países tropicais, onde as temperaturas são mais constantes e elevadas durante todo o ano, a faixa de conforto térmico interno varia de 22,0 °C a 33,8 °C. Observaram, no primeiro caso, a necessidade de adaptação a climas com verões intensos e invernos rigorosos, onde os residentes precisam ajustar seu comportamento para manter o conforto em ambas as extremidades do espectro térmico. Em contraste, no segundo caso, a adaptação a um ambiente quente e úmido frequentemente exige o uso intensivo de ventiladores e ar-condicionado para atingir o conforto térmico. Já em países de clima temperado a faixa de temperatura de conforto térmico variou de 20,0 °C a 30,0 °C, refletindo a necessidade de se adaptar a variações sazonais mais moderadas, enquanto estudos realizados em climas oceânicos e desérticos indicam faixas mais restritas, de 20,2 °C a 20,9 °C e 22,0 °C a 25,0 °C, respectivamente.

Arenhardt e Wander (2017) reforçam a ideia de que a arquitetura das escolas deve ser adaptada às condições climáticas locais para otimizar o conforto térmico e a eficiência energética. Os autores mencionam que, em regiões com alta variação climática, é necessário adotar sistemas híbridos de climatização que permitam o uso de ventilação natural e mecânica conforme necessário.

Para Arsad et al. (2023), o tipo de edificação também exerce uma influência sobre a sensação de conforto térmico. Edifícios educacionais, por exemplo, mostraram a faixa mais ampla de temperaturas de conforto térmico interno, variando de 15,0 °C a 32,5 °C, o que reflete

a diversidade de atividades e a necessidade de atender a uma ampla gama de ocupantes, desde crianças pequenas até adultos jovens. Crianças pequenas possuem uma faixa de temperatura de conforto térmico mais estreita devido à sua menor capacidade de adaptação às mudanças de temperatura. No caso de crianças em idade pré-escolar (3-6 anos) observaram que elas se sentem confortáveis em temperaturas internas que variam de 23,0 °C a 26,0 °C, uma faixa relativamente estreita, que reflete sua alta sensibilidade às variações térmicas.

Na faixa etária de estudantes do ensino fundamental e médio (7-18 anos) a faixa de conforto térmico foi mais ampla, variando de 19,5 °C a 29,2 °C. Esse grupo demonstrou maior flexibilidade adaptativa, sendo capaz de ajustar o vestuário e utilizar métodos como ventiladores para alcançar o conforto térmico. Para adultos jovens e estudantes universitários (18-40 anos), a faixa de conforto térmico encontrada variou de 16,0 °C a 33,8 °C, dependendo das condições climáticas e do ambiente construído, o que reflete uma maior capacidade de adaptação desse grupo etário, que frequentemente utiliza uma combinação de ventiladores, ar-condicionado e ajustes no vestuário para manter o conforto (ARSAD et al., 2023).

Os idosos (acima de 65 anos) apresentaram uma faixa de conforto térmico que variou de 19,0 °C a 30,0 °C. Embora essa faixa seja mais ampla, ela não necessariamente satisfaz as necessidades de saúde a longo prazo, devido à redução da sensibilidade térmica dos idosos, o que dificulta a detecção de estresses térmicos e a recuperação dos mesmos (ARSAD et al., 2023).

As adaptações comportamentais, como o ajuste de vestuário, uso de ventiladores e ar-condicionado, são essenciais para manter o conforto térmico, especialmente em climas extremos e em populações vulneráveis, como crianças pequenas e idosos. As descobertas descritas por Arsad et al. (2023) reforçam a necessidade de uma abordagem personalizada para o conforto térmico, que considere tanto as condições ambientais quanto as características dos ocupantes.

Os estudos apresentados revelam a complexidade e as lacunas existentes na pesquisa sobre conforto térmico para diferentes faixas etárias, considerando aspectos regionais como clima, costumes e arquitetura. Embora tenha havido um aumento nas publicações nos últimos anos, ainda há muito a ser explorado. Nesse sentido, é visível a necessidade de modelos regionais adaptados ao clima e cultura brasileiros, bem como a importância de pesquisas de maior abrangência, que considerem as particularidades de cada faixa etária, especialmente no contexto de mudanças climáticas.

2.3 Desempenho térmico em edificações

De acordo com a NBR 15220-2:2023 (ABNT, 2023), o desempenho térmico das edificações é definido através dos cálculos de transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar dos elementos e componentes da edificação. O desempenho térmico de uma edificação refere-se à capacidade da construção de manter condições internas confortáveis, independentemente das condições climáticas externas (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Cada material construtivo se comporta termicamente de maneira diferente e possui propriedades distintas. Na NBR 15220-2:2023 (ABNT, 2023) podem ser encontradas informações sobre as principais propriedades térmicas de determinados elementos construtivos. É importante entender o comportamento térmico de cada material a ser empregado na envoltória da edificação e conhecer o fluxo de calor que será transmitido para o ambiente construído. Além disso, a análise das propriedades térmicas dos materiais construtivos e a implementação de estratégias são importantes para auxiliar em decisões de projetos que reduzam a necessidade de aquecimento e resfriamento artificial. A escolha adequada do material irá determinar se a edificação possui ou não um bom desempenho térmico.

Para melhorar o desempenho térmico das edificações, várias estratégias podem ser adotadas. Utilizar materiais com baixa transmitância térmica é fundamental para reduzir a transferência de calor entre o interior e o exterior da edificação, melhorando assim o isolamento térmico. Implementar ventilação natural, como ventilação cruzada, ventilação na cobertura e ventilação sob a edificação, ajuda a substituir o ar quente interno por ar fresco externo, contribuindo para o conforto térmico (LAMBERTS *et al.* 2016). Gan *et al.* (2019) discutem como a integração de sistemas de ventilação natural e mecânica pode reduzir a necessidade de climatização artificial, promovendo economia de energia e melhorando o conforto térmico.

Outra estratégia eficaz é o resfriamento evaporativo, que pode ser alcançado aumentando a umidade relativa do ar e reduzindo a temperatura por meio da evaporação da água no ambiente, mantendo as temperaturas internas mais baixas. O sombreamento é uma das estratégias mais importantes a ser aplicada, o uso de brises e outros elementos para controlar a incidência solar e reduzir o ganho de calor durante o verão, podem garantir melhor conforto térmico dentro do ambiente. Além disso, utilizar materiais com alta capacidade térmica reduz a amplitude térmica interna em relação à externa, mantendo o ambiente mais estável e confortável ao longo do dia (LAMBERTS *et al.* 2016).

Lamberts *et al.* (2016) abordam o desempenho térmico das edificações em diversos aspectos, focando principalmente nas propriedades térmicas dos materiais e na aplicação de estratégias para otimização térmica. Os autores destacam a importância das propriedades térmicas dos materiais construtivos, que influenciam diretamente no conforto térmico e na eficiência energética da edificação. Dentre as propriedades estudadas estão a transmitância térmica (U), que é a medida da quantidade de calor que passa através de um material por unidade de área e diferença de temperatura, a capacidade térmica (CT), que representa a capacidade de um material de armazenar calor e contribui para a estabilidade da temperatura interna da edificação e a absortividade solar (α), que é a fração de radiação solar absorvida pela superfície do material. Materiais com alta absortividade tendem a aquecer mais rapidamente, influenciando o desempenho térmico, a ABNT NBR 15220-2:2023 fornece tabelas com todas essas propriedades.

2.3.1 Simulações de desempenho térmico em edificações

A importância de estudar o desempenho térmico das edificações está diretamente relacionada à busca por eficiência energética, conforto ambiental nas construções e reduzir as emissões de carbono. As simulações de desempenho térmico são fundamentais para atingir esses objetivos, pois permitem prever o comportamento térmico dos edifícios sob diversas condições climáticas e de ocupação, além de implementar soluções que melhoram a qualidade dos ambientes construídos, mantendo temperaturas internas confortáveis, reduzindo a necessidade de aquecimento e resfriamento artificial, possibilitando avaliar e otimizar o consumo de energia de um edifício (ADÁN *et al.* 2023; COELHO, 2020).

Cerca de 40% das emissões do setor de construção que causam o efeito estufa provêm de edifícios existentes (ZARZUELA *et al.*, 2019). As edificações são responsáveis por uma grande parte do consumo energético global, o que destaca a importância de se buscar métodos que promovam a eficiência desde as fases iniciais do projeto (OLIVEIRA, 2023).

Em um cenário de crescente consumo energético, a eficiência e o uso racional de energia nas edificações são essenciais para evitar a escassez de recursos e minimizar o impacto ambiental (CHEPP & GASPARIN, 2019). A aplicação de códigos, normas e diretrizes específicos para a simulação de desempenho térmico contribui para a conservação energética, o desenvolvimento sustentável e o conforto térmico dos ocupantes (SANTOS & SOUZA, 2013).

Mendes *et al.* (2024) realizaram uma revisão sistemática de métodos para avaliar o desempenho térmico de edifícios através de simulações. Eles observaram um aumento na importância dada ao desempenho térmico ao longo dos anos, destacando a evolução e o refinamento das ferramentas de simulação. Os países com as maiores quantidades de publicações sobre o tema são predominantemente do Hemisfério Norte, com destaque para os Estados Unidos, Reino Unido e China.

Diversos estudos têm sido conduzidos para analisar diferentes aspectos e metodologias dessas simulações. De Wilde e Tian (2009) destacam a relevância das simulações de desempenho térmico para quantificar os riscos que as mudanças climáticas representam para os edifícios. As simulações ajudam a prever o desempenho futuro dos edifícios e a desenvolver estratégias de adaptação adequadas. Além disso, as simulações proporcionam uma melhor compreensão da interação entre os elementos do edifício e o clima local, permitindo a aplicação de estratégias que atendam aos critérios de sustentabilidade, sendo fundamental para a construção de edificações mais sustentáveis e eficientes energeticamente (PEREIRA *et al.* (2021).

As simulações são essenciais para validar o consumo de energia e o conforto dos ocupantes em diferentes etapas do processo de concepção das edificações (LAMBERTS *et al.*, 2010). Reproduzir a realidade através de simulações computacionais permite a comparação de diferentes alternativas projetuais, auxiliando na escolha mais eficiente (FREIRE; AMORIM, 2011; PEREIRA, 2019). Os autores ressaltam que o bom desempenho térmico deve estar presente em todas as fases do projeto arquitetônico, desde a escala urbana até os cômodos de uma edificação, contribuindo para a eficiência energética e a sustentabilidade.

O uso de simulações pode identificar e corrigir falhas no projeto que, de outra forma, resultariam em desconforto térmico e alto consumo energético (QUEIRÓZ *et al.*, 2015). Quando bem executadas, essas simulações podem resultar em economias consideráveis ao longo da vida útil do edifício, tanto em termos de energia quanto de manutenção, garantindo ainda que os edifícios atendam às exigências de conforto térmico e eficiência energética desde a fase de projeto até a operação (BERNARDO *et al.*, 2017; MELO, 2021).

A modelagem computacional pode simplificar a avaliação do desempenho térmico, permitindo ajustes nas fases iniciais do projeto (PILAR, 2020). As decisões tomadas ainda na fase projetual, são geralmente mais eficazes e menos dispendiosas do que mudanças realizadas após a construção, pois a possibilidade de testar várias opções antes da construção física resulta

em projetos mais eficientes e alinhados às necessidades específicas de cada edificação (COELHO, 2020; QUINTANILHA *et al.*, 2023).

Enquanto métodos simplificados de avaliação podem apresentar incertezas, comprometendo a análise da edificação, os programas de simulação energética permitem a verificação isolada de cada fator interveniente, oferecendo uma análise mais detalhada e precisa do desempenho térmico (LAMBERTS *et al.*, 2014). O uso de ferramentas BIM possibilita uma análise eficiente e detalhada do desempenho térmico das edificações, facilitando a tomada de decisões e evitando retrabalho (NASCIMENTO *et al.*, 2023).

A modernização energética de um edifício pode resultar em economias no consumo de energia e melhorar as condições internas de conforto, reduzindo os custos operacionais, aumentando a vida útil dos edifícios e valorizando os imóveis (MYTAFIDES *et al.*, 2017).

As simulações de desempenho térmico permitem a modelagem detalhada dos fluxos de calor e do comportamento térmico das edificações (AMARA *et al.*, 2015). Além de permitir ajustar parâmetros como temperatura, umidade e fluxo de ar, criando ambientes internos mais confortáveis e saudáveis, essenciais para evitar o desenvolvimento de fungos e outros organismos prejudiciais à saúde (COELHO, 2020; GONZÁLEZ *et al.* 2022; AL HERR *et al.*, 2021).

Segundo Hensen e Lamberts (2019) e Cicozzi *et al.* (2021), as simulações permitem uma análise multidisciplinar e abrangente, possibilitando uma avaliação integrada das opções de projeto, como sistemas de iluminação e ar-condicionado, componentes construtivos e variações no desenho arquitetônico. Para Abanda e Byers (2016), Coelho (2020), Carvalho *et al.* (2022) e Al Horr *et al.* (2021), as simulações auxiliam na identificação e aplicação de estratégias passivas de conforto ambiental, como a correta orientação da edificação, o uso de materiais com propriedades térmicas adequadas, a implementação de sistemas de sombreamento e ventilação natural, essenciais para minimizar o consumo de energia com sistemas de climatização. Isso é especialmente relevante em ambientes de trabalho e educacionais, onde pode aumentar a produtividade e o bem-estar dos ocupantes (PEREIRA *et al.*, 2021; MELO, 2021; DIAS *et al.*, 2022; QUINTANILHA *et al.*, 2023; AL HERR *et al.*, 2021).

Os estudos demonstram que as edificações projetadas com base em simulações térmicas, apresentam uma redução no consumo de energia e melhor desempenho ambiental, alinhando-se às metas globais de eficiência energética e sustentabilidade, reduzindo o impacto ambiental (MENDES *et al.*, 2005; CICOZZI *et al.*, 2021). Apesar dos benefícios, a simulação de desempenho térmico também apresenta desafios, um deles é a complexidade dos dados de

entrada e a necessidade de uma análise detalhada e precisa para obter resultados confiáveis (BONOMOLO et al. 2021). A necessidade de uma grande quantidade de dados válidos e a complexidade dos programas de simulação são barreiras que devem ser superadas. Além disso, a formação adequada dos profissionais envolvidos é essencial para garantir a correta interpretação dos resultados das simulações e a aplicação eficaz das conclusões no projeto (SANTOS & SOUZA, 2013).

2.4 Arquitetura bioclimática

Victor Olgyay foi o primeiro a utilizar o termo "arquitetura bioclimática", desenvolvendo diversas pesquisas publicadas na década de 1950 (OLGYAY, 1968). A arquitetura bioclimática relaciona fatores climáticos à arquitetura, integrando áreas como meteorologia, biologia, topografia e climatologia para auxiliar na concepção de projetos adequados a cada região. Por se tratar de construções que se moldam à região, os projetos utilizam técnicas específicas para soluções de conforto ambiental, respeitando o bioclima local e suas variações (como quantidade de luz solar, chuva, umidade, predominância dos ventos, entre outros). A arquitetura bioclimática valoriza ainda o uso de materiais construtivos locais, pois aproveitá-los pode resultar em um ganho em eficiência energética, além de promover a sustentabilidade.

É importante observar as características próprias de cada local, pois as decisões tomadas na concepção do projeto podem beneficiar ou prejudicar o conforto térmico. O modo de projetar levando em consideração apenas a estética deve ser deixada de lado, voltando os projetos para as necessidades de cada programa e as características climáticas de cada região. Na maior parte do território brasileiro, há uma necessidade de proteger as janelas da incidência solar, recuando as paredes e criando espaços de convivência que circundam a edificação. No entanto, essa prática foi deixada de lado com o passar dos anos. As casas dos antigos engenhos possuíam esse recuo para proteção das fachadas, utilizando varandas que circundavam toda a edificação (HOLANDA, 1978). Porém, os projetos modernistas, com suas características de volumes puros, vieram para quebrar essa cobertura ao utilizar telhados escondidos nas platibandas, deixando as fachadas expostas à incidência solar.

No entanto, é necessário reconhecer que a arquitetura modernista trouxe avanços, promovendo uma estética limpa e funcional que influenciou a arquitetura contemporânea. As técnicas de construção e os materiais modernos também permitiram a criação de edifícios mais leves e versáteis. Além disso, a integração de tecnologias de isolamento térmico e sistemas de

climatização eficientes compensou, em muitos casos, a exposição direta ao sol, proporcionando conforto térmico aos ocupantes. Portanto, um equilíbrio entre a tradição da arquitetura bioclimática e as inovações modernistas pode resultar em projetos que sejam tanto eficientes quanto esteticamente agradáveis, respeitando as características climáticas locais sem renunciar aos avanços tecnológicos e estéticos.

É importante evitar a concepção de projetos com volumes puros, dando preferência a longas projeções, recuos nas paredes, e fachadas sombreadas e abertas (HOLANDA, 1978). Essa abordagem ressalta a preocupação com a arquitetura que não protege as fachadas, resultando em ambientes que recebem diretamente a radiação solar na envoltória da edificação e raios solares que penetram pelas aberturas sem proteção. A larga utilização do ar-condicionado já era uma preocupação do referido autor, que recomendava proteger as aberturas com elementos sombreados e abrigados, permitindo que permanecessem abertas. O projetista deve estudar o caminho do sol sobre a fachada para projetar proteções eficientes. Empregar técnicas de proteção solar reduz o consumo de energia elétrica ao longo da vida útil da edificação, pois reduz a necessidade de utilização do sistema de climatização (HOLANDA, 1978).

A funcionalidade de uma edificação inclui os conceitos de conforto ambiental (térmico, acústico e visual). A escolha dos elementos e materiais utilizados é essencial para garantir o conforto térmico desejado. A estética empregada no projeto também tem um grande impacto na temperatura interna dos ambientes. Embora a beleza seja um dos aspectos mais valorizados em um projeto, tanto a parte interna quanto a externa devem estar em equilíbrio para que a funcionalidade e a forma sejam satisfatoriamente atendidas. Entre os aspectos que contribuem para a beleza estão os materiais empregados, as aberturas, os equipamentos e as funções dos espaços, que devem estar em harmonia para favorecer o desempenho térmico da edificação e o conforto térmico dos ocupantes.

O arquiteto Diebédo Francis Keré, vencedor do Prêmio Pritzker de Arquitetura em 2022, desenvolveu vários projetos que utilizam os conceitos básicos da arquitetura bioclimática, sendo o seu primeiro projeto a Escola Primária de Gando (Figura 1). O projeto foi concebido para atender parâmetros como custos e clima, utilizando argila da própria localidade como material para a fabricação dos tijolos. Além disso, o arquiteto projetou grandes e elevadas coberturas que protegem as paredes e oferecem sombra para as aberturas, promovendo o resfriamento da laje da edificação.

Figura 1 - Escola primária de Gando, 2001.



Fonte: ArchDaily (2016). Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/786882/escola-primaria-em-gando-kere-architecture>. Acesso em: 14 mar. 2024.

Em outro projeto mais recente, a Escola Secundária de Lycée Schorge (Figura 2A), Keré utilizou os mesmos conceitos citados anteriormente, acrescentando estratégias de resfriamento evaporativo (Figura 2B) e ventilação cruzada pela cobertura. No projeto, também foi considerada a proteção das fachadas, utilizando finos pedaços de madeira local que formam uma cortina para filtrar a incidência dos raios solares.

Figura 2 - (A) Escola Secundária de Lycee Schorge, 2016. (B) Diagrama de resfriamento evaporativo.

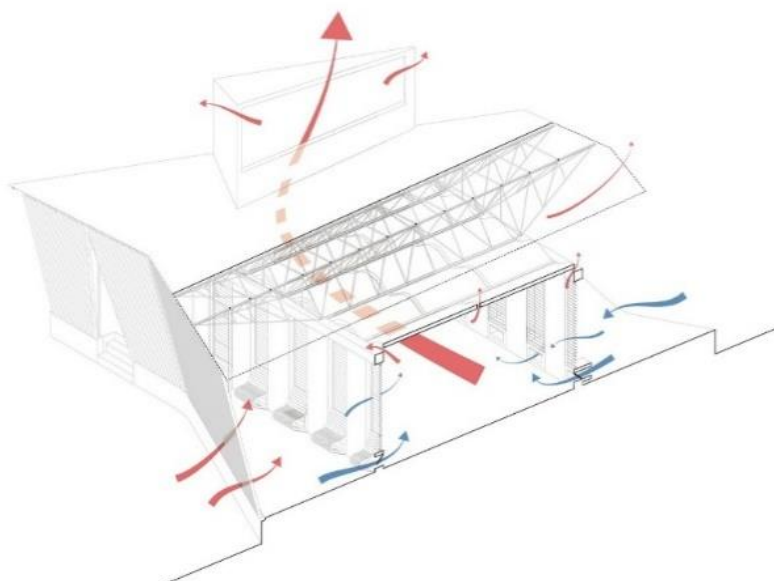


Fonte: ArchDaily (2016). Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/786882/escola-primaria-em-gando-kere-architecture>. Acesso em: 14 mar. 2024.

O ar quente proveniente do exterior entra na edificação e, através do sistema de resfriamento evaporativo instalado nas janelas, é resfriado (Figura 3). A cobertura elevada permite que o ar quente do ambiente suba e saia pela chaminé projetada, proporcionando um eficiente sistema de renovação de ar. A enorme cobertura ondulada é um dos principais elementos de ventilação

e iluminação natural do edifício. Os componentes de gesso e concreto estão ligeiramente deslocados uns dos outros, permitindo que o edifício "respire", renovando o ar constantemente. O forro de cores claras serve para difundir a luz natural indireta, proporcionando ambientes amplamente iluminados durante o dia, sem expor os espaços internos à incidência direta dos raios solares (ARCHDAILY, 2017).

Figura 3 - Diagrama de ventilação.



Fonte: ArchDaily (2016). Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/786882/escola-primaria-em-gando-kere-architecture>. Acesso em: 14 mar. 2024.

No Brasil, é possível encontrar alguns projetos que utilizam estratégias bioclimáticas em sua concepção. É importante salientar que muitos desses projetos foram desenvolvidos em meados do século XX. Com o passar dos anos, a arquitetura passou por diversas transformações, dando lugar a edifícios envidraçados, sem proteções nas janelas. Essa mudança no comportamento projetual é resultado da facilidade na obtenção de equipamentos de ar-condicionado. Naquela época, o poder de compra dos consumidores era menor, o que obrigava os projetistas a conceberem edificações com melhor desempenho térmico.

Exemplos de boa arquitetura bioclimática podem ser encontrados, como o Hospital da Restauração (Figura 4), situado no Recife e projetado por Acácio Gil Borsó. O projeto possui uma fachada totalmente protegida por uma composição de brises verticais e horizontais, que protegem as janelas dos raios solares e das chuvas, permitindo que permaneçam abertas durante todo o dia.

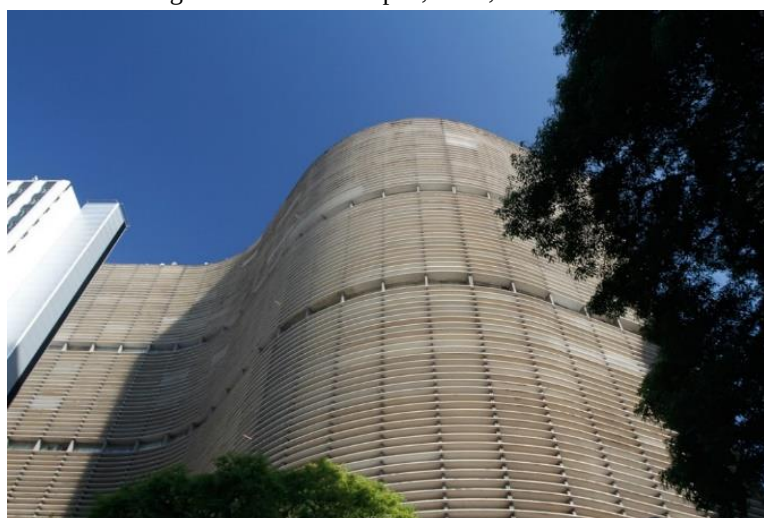
Figura 4 - Hospital da Restauração, 1951, Recife.



Fonte: Portal Vitruvius (2012). Disponível em: <https://vitruvius.com.br/index.php/revistas/read/arquitextos/13.147/4466>. Acesso em: 20 mar. 2024.

O Edifício Copan (Figura 5), localizado no coração de São Paulo, é um ícone da arquitetura modernista brasileira, projetado pelo renomado arquiteto Oscar Niemeyer. Inaugurado em 1966, o edifício destaca-se não apenas por sua monumentalidade e forma sinuosa, mas também pelo uso inovador de brises, elementos fundamentais na sua concepção bioclimática. Os brises instalados nas fachadas do Copan, são projetados para controlar a incidência de luz solar direta nos apartamentos, reduzindo o ganho térmico e, conseqüentemente, a necessidade de sistemas de climatização artificial. Essas estruturas de proteção solar permitem que a luz natural penetre nos ambientes de maneira difusa, proporcionando iluminação adequada sem sobrecarregar os espaços internos com calor excessivo.

Figura 5 - Edifício Copan, 1966, São Paulo.



Fonte: Jovem Pan (2022). Disponível em: <https://jovempan.com.br/programas/jornal-da-manha/apos-10-anos-em-negociacao-prefeitura-aprova-projeto-de-restauro-da-fachada-do-edificio-copan.html>. Acesso em: 15 abr. 2024.

A utilização dos brises no Edifício Copan demonstra um entendimento profundo das condições climáticas de São Paulo e uma preocupação com o conforto térmico dos usuários. Eles funcionam como uma barreira física contra a radiação solar direta, evitando que o calor excessivo aqueça as superfícies internas dos apartamentos. Essa solução arquitetônica não apenas melhora o conforto térmico, mas também contribui para a eficiência energética do edifício, ao reduzir a demanda por ar-condicionado. Além de sua função prática, os *brises-soleil* conferem ao Copan uma identidade estética única. Eles são parte integrante do design modernista de Niemeyer, harmonizando forma e função em uma solução arquitetônica que é tanto bela quanto funcional. A presença desses elementos ressalta o compromisso do arquiteto com uma arquitetura que responde de maneira inteligente às condições ambientais, promovendo um ambiente interno agradável e sustentável para os moradores.

O Edifício Santo Antônio, situado no Recife, Pernambuco, é um exemplo de arquitetura bioclimática no Brasil, projetado pelo arquiteto Acácio Gil Borsói. Esse edifício emprega uma estratégia bioclimática eficiente para proteger a fachada voltada para o poente, utilizando cobogós, um elemento arquitetônico que se destaca por suas múltiplas vantagens funcionais e estéticas (Figura 6). Os cobogós são elementos vazados que podem ser feitos de diversos materiais, como cerâmica, concreto ou vidro. A utilização dos cobogós nas edificações oferece vários benefícios que estão alinhados com os princípios da arquitetura bioclimática, que busca harmonizar a construção com o clima local, promovendo conforto térmico e eficiência energética.

Figura 6 - Edifício Santo Antônio, 1963, Recife.



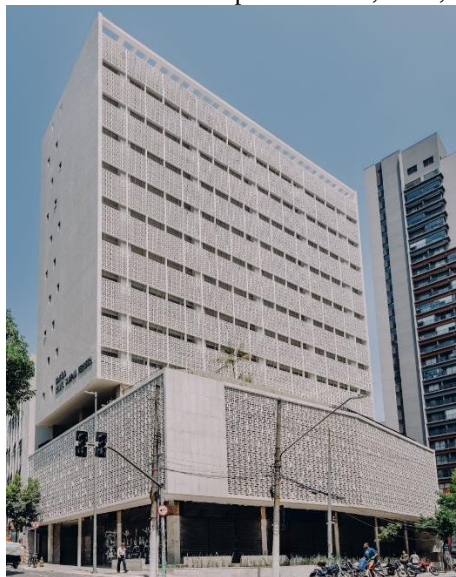
Fonte: Revista Continente (2011). Disponível em: <https://revistacontinente.com.br/edicoes/119/a-partitura-moderna-de-acacio-gil-borsoi>. Acesso em: 15 abr. 2024.

Uma das principais vantagens dos cobogós é sua capacidade de filtrar os raios solares. Eles permitem a passagem de luz natural de forma difusa, reduzindo o ganho de calor direto dentro dos ambientes. Isso é particularmente útil em regiões com alta incidência solar, como o Recife, onde o Edifício Santo Antônio está localizado. Ao mitigar a entrada direta de calor, os cobogós contribuem para a manutenção de temperaturas internas mais amenas, diminuindo a necessidade de uso de sistemas de climatização artificial, como ar-condicionado. Além da filtragem de luz, os cobogós também facilitam a ventilação natural, essencial para a renovação do ar interno e o conforto térmico dos ocupantes. A ventilação cruzada, promovida pelos elementos vazados, ajuda a dissipar o calor acumulado, melhorando a qualidade do ar e reduzindo o consumo energético com ventiladores e condicionadores de ar.

Comparados com outras soluções de sombreamento, como os brises, os cobogós não exigem um estudo detalhado para sua aplicação, tornando-se uma opção prática e eficiente para os arquitetos. Sua instalação é mais simples e pode ser adaptada a diferentes tipos de projetos, desde residenciais até comerciais, sem comprometer a estética do edifício. Os cobogós também possuem um valor estético, pois adicionam uma textura única às fachadas e podem ser configurados em diversos padrões, contribuindo para a identidade visual do edifício. No contexto brasileiro, esses elementos têm um valor cultural importante, remetendo à tradição arquitetônica modernista do país.

Outro edifício que possui grande valor arquitetônico, é o edifício Renata Sampaio Ferreira (Figura 7), construído em meados da década de 1950, passou por diversas adaptações arquitetônicas comandadas pelo escritório Metro Arquitetos. No entanto, a fachada e as áreas comuns continuam intactas, respeitando o legado do arquiteto Oswaldo Bratke (1907-1997), responsável pelo projeto original. O edifício possui uma proteção de cobogós na fachada principal, que permite a ventilação e a iluminação dos ambientes sem o ganho térmico proveniente dos raios solares.

Figura 7 - Edifício Renata Sampaio Ferreira, 1950, São Paulo.



Fonte: Metro Arquitetos (2022). Disponível em: <https://metroarquitetos.com.br/projeto/renata-sampaio-2022/>. Acesso em: 15 abr. 2024.

A relevância da arquitetura bioclimática se torna ainda mais evidente no contexto atual, onde a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental são prioridades globais. O aquecimento global e a escassez de recursos energéticos reforçam a necessidade de projetos arquitetônicos que minimizem o consumo de energia e maximizem o uso de fontes renováveis. A arquitetura bioclimática, com seu foco em soluções passivas e adaptadas ao ambiente natural, oferece um caminho promissor para enfrentar esses desafios.

2.5 Normas internacionais

As normas internacionais que tratam de simulações energéticas estabelecem diretrizes e recomendações para garantir que as edificações atendam aos requisitos de eficiência energética, conforto térmico e minimização do impacto ambiental. Elas auxiliam na redução da pegada de carbono dos edifícios por meio de práticas eficientes de projeto e operação, contribuindo para a diminuição do consumo energético global, resultando em economia de custos e recursos.

A ISO 52016-1:2017 é uma norma internacional que estabelece procedimentos para calcular as necessidades de energia para aquecimento e resfriamento de edifícios, bem como as temperaturas internas e as cargas de calor sensível e latente. A norma fornece métodos para determinar a quantidade de energia necessária para manter condições térmicas confortáveis dentro de um edifício, levando em consideração variáveis como o clima externo, as características do edifício, a ocupação e os sistemas de aquecimento e resfriamento. A ISO faz

parte de um conjunto de normas que contribuem para a avaliação e comparação do desempenho energético de diferentes edifícios, permitindo uma análise consistente e precisa.

A norma recomenda o uso de métodos de simulação que operam em uma base horária para fornecer uma análise detalhada e dinâmica das condições térmicas e necessidades energéticas ao longo do tempo. Inclui diretrizes para modelar os diferentes componentes do edifício, como paredes, janelas, pisos e tetos, e suas propriedades térmicas, como massa térmica, resistência térmica e capacidades caloríficas. Considera ainda as influências externas, como clima, radiação solar e ventos, bem como as influências internas, como ocupação, equipamentos e iluminação, ao calcular as necessidades de energia. Por fim, aborda como os sistemas de controle (termostatos, ventilação, etc.) interagem com o comportamento térmico do edifício e influenciam o consumo de energia, o que não consta na ABNT NBR 15.575-1:2024.

A ISO 52017-1:2017 complementa a ISO 52016-1, mas foca mais especificamente nos procedimentos de cálculo genéricos para determinar as cargas de calor sensível e latente e as temperaturas internas. A ISO 52016-1:2017 é mais específica no cálculo das necessidades de energia para aquecimento e resfriamento, enquanto a ISO 52017-1:2017 fornece uma base genérica para calcular cargas de calor e temperaturas internas.

A ISO 52018-1:2017 é uma norma que fornece uma visão geral das opções para indicadores de desempenho energético de edifícios, relacionados ao balanço de energia térmica e às características da envoltória do edifício. Ela é projetada para auxiliar na avaliação e comparação do desempenho energético parcial de edifícios, especialmente no que se refere ao balanço térmico e às propriedades dos materiais de construção. A norma aborda a simulação térmica e energética de edifícios ao definir indicadores que podem ser utilizados como entradas ou resultados em simulações. Esses indicadores ajudam a avaliar e melhorar o desempenho energético de partes específicas do edifício.

A EN 16798-1:2019 é uma norma europeia que estabelece parâmetros ambientais internos para o projeto e avaliação do desempenho energético de edifícios. A norma fornece diretrizes para garantir a qualidade do ar interno, o conforto térmico, a iluminação adequada e as condições acústicas apropriadas. Os procedimentos descritos para as simulações incluem parâmetros de entrada com valores de referências de temperatura, umidade, níveis de CO₂, taxas de ventilação e níveis de iluminação. É definido também diretrizes para modelar o uso e a ocupação dos edifícios, incluindo perfis de ocupação, uso de equipamentos e padrões de comportamento dos ocupantes. A norma oferece ainda uma base comum para a avaliação do desempenho ambiental interno de diferentes edifícios, facilitando a comparação dos resultados

simulados. A parte 2 dessa norma (EN 16798-2:2019) a complementa, fornecendo uma interpretação detalhada dos requisitos estabelecidos na parte 1. Ela se concentra em parâmetros ambientais internos para o projeto e a avaliação do desempenho energético dos edifícios, sendo fundamental para a simulação térmica e energética de edifícios, definindo parâmetros que influenciam diretamente o consumo de energia e o conforto interno. Além disso, define parâmetros de temperatura de conforto, como temperatura interna que devem ser mantidas para garantir o conforto térmico dos ocupantes, estabelece níveis recomendados de umidade relativa e incentiva o uso de luz natural para reduzir o consumo de energia com iluminação artificial.

A ASHRAE Standard 90.1-2022 é uma norma que estabelece os requisitos mínimos de eficiência energética para o projeto de edifícios, exceto edifícios residenciais de baixa altura. Essa norma é amplamente utilizada nos Estados Unidos e em outros países como referência para regulamentações de eficiência energética. Ela tem como objetivo reduzir o consumo de energia em edifícios comerciais e de grande porte, estabelecendo requisitos mínimos para sistemas de iluminação, HVAC, envelope do edifício, sistemas de água quente e outros componentes de construção. Nessa norma são incluídas diretrizes específicas sobre a realização de simulações térmicas e energéticas e um método de desempenho onde a simulação energética do edifício proposto deve ser comparada a um edifício de referência para determinar se este atende ou supera os requisitos mínimos de eficiência energética.

A ASHRAE Standard 140-2020, é uma norma que estabelece métodos padronizados de teste para avaliar a precisão e a confiabilidade dos programas de simulação de energia para edifícios. Para a realização de uma simulação térmica e energética consistente e confiável, é necessário que seja utilizado softwares que se enquadrem nos padrões descritos nessa norma.

Essas normas, ao fornecerem métodos e diretrizes claras para a realização de simulações térmicas e energéticas, auxiliam na construção de edifícios mais eficientes e sustentáveis, contribuindo para a redução do consumo de energia e dos impactos ambientais. Elas fornecem uma base consistente para avaliação e comparação do desempenho energético dos edifícios, facilitando a implementação de soluções mais eficientes e a conformidade com regulamentações de eficiência energética.

2.6 Softwares de simulação térmica e energética

Atualmente, uma variedade de softwares e ferramentas são utilizados para realizar simulações energéticas. Alguns dos mais utilizados são o EnergyPlus, IES VE (Integrated

Environmental Solutions Virtual Environment), eQuest (Quick Energy Simulation Tool), OpenStudio e DesignerBuilder. Até 2025, também eram utilizados o Autodesk Insight 360 e o Autodesk Green Building Studio (GBS), contudo, o GBS foi descontinuado, enquanto o Autodesk Insight passou a se consolidar como uma ferramenta voltada para a análise de carbono, permitindo a avaliação integrada do carbono operacional e incorporado em edificações.

O IES VE foi lançado em 1994 na Escócia, a empresa responsável por seu desenvolvimento, a Integrated Environmental Solutions (IES), é uma organização líder na criação de ferramentas para simulação ambiental e energética de edifícios. Ele é uma plataforma para análises detalhadas de desempenho ambiental e energético (WILDE & VAN DER VOORDEN, 2004). Suas funcionalidades incluem simulação térmica dinâmica, análise de iluminação natural, avaliação de ventilação e desempenho de sistemas HVAC, entre outras. Na academia, é empregado em pesquisas e estudos sobre eficiência energética, sustentabilidade e modelagem de edifícios. No setor profissional, é utilizado para projetar edifícios que atendam às normas de eficiência energética e sustentabilidade, além de ajudar na certificação de edifícios verdes.

O eQuest foi lançado em 1999, como uma ferramenta gratuita para simulação energética de edificações, desenvolvida pelos especialistas *James J. Hirsch & Associates e Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) nos Estados Unidos. Este software foi criado com o objetivo de simplificar o uso de simulações energéticas avançadas e torná-las acessíveis para uma gama mais ampla de profissionais da construção. O eQuest utiliza o motor de simulação DOE-2, que permite a modelagem detalhada de sistemas de energia de edifícios. DOE-2 é um motor de simulação energética de edifícios desenvolvido pelo LBNL e pelo U.S. *Department of Energy* (DOE).

O eQuest oferece uma interface gráfica amigável, que facilita a criação de modelos de edifícios e a análise de diferentes cenários de consumo energético. Suas principais funcionalidades incluem a simulação de cargas térmicas, análise de desempenho de HVAC, iluminação, e a avaliação de medidas de conservação de energia, sendo amplamente utilizado para análises preliminares de desempenho energético de edifícios (HIRSCH *et al.*, 1999). No meio acadêmico, é amplamente utilizado como uma ferramenta de ensino e pesquisa para estudos de eficiência energética e sustentabilidade em edificações, pois fornece resultados detalhados. Além disso, é frequentemente utilizado em projetos de certificação *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) e outras iniciativas de construção sustentável (TURNER e FRANKEL, 2008).

O software EnergyPlus foi desenvolvido pelo DOE, tendo sido lançado no ano de 2001. Ele é um dos softwares mais avançados para simulação térmica e energética de edificações, permitindo a modelagem de sistemas HVAC, iluminação, e outras cargas de edifícios. O software EnergyPlus foi criado para superar as limitações de seus predecessores, DOE-2 e BLAST, combinando os melhores recursos de ambos e adicionando novas capacidades para uma simulação mais detalhada e precisa (CRAWLEY *et al.*, 2001). Seu acesso para utilização é disponibilizado de forma gratuita, sendo mais democrático.

Muitos estudos e teses de doutorado utilizam o EnergyPlus devido à sua precisão e capacidade de simular condições realistas de operação de edifícios. No setor profissional, EnergyPlus é utilizado para projetar edifícios energeticamente eficientes, realizar auditorias energéticas e apoiar certificações de construção sustentável, como LEED.

O DesignerBuilder foi lançado em 2005 e utiliza o motor de simulação EnergyPlus, oferecendo uma interface gráfica intuitiva que facilita a modelagem e análise de edifícios. É uma ferramenta poderosa para simulações detalhadas de desempenho energético, conforto térmico, iluminação natural e qualidade do ar interno. Profissionais do setor de construção civil também utilizam o DesignBuilder para otimizar projetos de edifícios, melhorar a eficiência energética e cumprir normas de sustentabilidade (CRAWLEY *et al.*, 2008). Desde seu lançamento, ele tem desempenhado um importante papel tanto no meio acadêmico quanto no profissional. Na academia, ele é amplamente utilizado em pesquisas sobre eficiência energética, conforto térmico, e sustentabilidade de edifícios. Essa ferramenta permite que pesquisadores realizem análises detalhadas e validem suas hipóteses com base em simulações precisas.

O OpenStudio foi desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) dos EUA e lançado em 2010. Ele é uma plataforma de código aberto que também utiliza o EnergyPlus como motor de cálculo, facilita a modelagem energética através de uma interface gráfica e integrações com outras ferramentas de BIM (GUGLIELMETTI *et al.*, 2011). No meio acadêmico, o OpenStudio tem sido amplamente utilizado em pesquisas de desempenho energético de edifícios, devido à sua flexibilidade e capacidade de integração com outras ferramentas de simulação, como o EnergyPlus, sendo frequentemente citado como uma ferramenta chave para a modelagem de edifícios e análise de eficiência energética (LONG *et al.*, 2010; TORCELLINI *et al.*, 2011).

O DOMUS é um software brasileiro de simulação energética desenvolvido para avaliar o desempenho higratérmico e energético de edificações, criado pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), em parceria com a Eletrobras, como parte do programa Procel

Edifica. Seu desenvolvimento começou em 1998, inserido em um contexto de crescente demanda por ferramentas que permitissem avaliar e melhorar a eficiência energética de edificações. Ao longo dos anos, o software foi sendo aprimorado para incorporar metodologias avançadas de simulação, validadas de acordo com normas internacionais, como a ASHRAE 140.

O DOMUS foi validado com base em estudos comparativos, o que garante a confiabilidade dos resultados obtidos com o software. Um marco importante no desenvolvimento do Domus foi sua integração ao Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel Edifica), a partir de 2009, o que consolidou o software como uma ferramenta essencial para a simulação de edificações no Brasil. Esse software tem sido utilizado por arquitetos e engenheiros para simular o comportamento térmico e energético de edificações, tanto em projetos novos quanto em reformas além do uso por pesquisadores para otimizar o desempenho energético das edificações, contribuindo para a etiquetagem de eficiência energética no Brasil (ROCHA *et al.*, 2018).

Atualmente a equipe de desenvolvimento do DOMUS continua trabalhando na melhoria do software, com o objetivo de integrar novas funcionalidades, como a leitura de arquivos BIM e a interface com outros programas de simulação, além de ampliar sua aplicabilidade para diferentes tipos de edificações (KRAUSE, 2024)

O Autodesk Green Building Studio foi lançado inicialmente como um serviço independente antes de ser integrado às soluções da Autodesk. A versão inicial do GBS foi lançada em 2005 e, ao longo dos anos, recebeu várias atualizações para melhorar suas funcionalidades e integração com outras ferramentas da Autodesk. Tratava-se de uma plataforma de simulação energética baseada em nuvem, projetada para auxiliar arquitetos, engenheiros e designers a avaliar e otimizar o desempenho energético de edifícios, com integração direta ao Revit e a outros softwares da Autodesk.

O Autodesk Insight 360, lançado em 2015, também ofereceu recursos avançados de simulação energética e análise térmica diretamente integrados à plataforma BIM do Revit. Essa ferramenta permitia avaliar o desempenho energético e ambiental de modelos de construção de forma prática, além de disponibilizar cenários comparativos de eficiência energética. Com a atualização mais recente, o Insight passou a focar principalmente na análise de carbono, consolidando-se como um recurso para mensurar e visualizar o carbono operacional e incorporado em edificações, em linha com as novas demandas de sustentabilidade.

Muitos outros softwares lançados são utilizados por profissionais e pesquisadores que buscam ferramentas mais intuitivas, que facilitam a modelagem e a visualização dos resultados. Vale salientar que o EnergyPlus é amplamente utilizado, não só por ser de acesso livre, mas também por sua abrangência e robustez. O desenvolvimento de ferramentas de simulação energética tem progredido ao longo das últimas décadas, com cada software oferecendo funcionalidades específicas para atender às necessidades dos projetistas. O uso desses programas permite a análise detalhada e otimização do desempenho energético de edificações, contribuindo para a criação de edifícios mais eficientes e sustentáveis.

2.7 Metodologia BIM

O *Building Information Modeling* (BIM) é uma abordagem integrada para a construção, que envolve a criação e uso de um modelo digital para planejar, projetar, construir e gerenciar edifícios e infraestrutura. Diferente das ferramentas *Computer-Aided Design*³ (CAD), que utilizam pontos, linhas e blocos bidimensionais, o BIM utiliza objetos digitais que contêm informações detalhadas sobre os componentes da construção, como custos, marcas, modelos, fabricantes, potências e materiais. À medida que os projetos de construção se tornam mais complexos, o BIM permite a integração entre diferentes especialidades aos desenhos de arquitetura, viabilizando uma gestão mais eficiente das informações da construção. Essa capacidade de associar informação aos objetos da construção é o que caracteriza a metodologia BIM (DANTE, 2022).

Apesar de suas vantagens, a implementação do BIM enfrenta grandes desafios, especialmente em termos de interoperabilidade e integração entre diferentes plataformas de software. Gu e London (2010) apontaram que, apesar dos avanços na tecnologia BIM, a falta de padrões uniformes e a complexidade das ferramentas de software são obstáculos para sua adoção ampla e eficaz. A resistência à mudança cultural nas indústrias de arquitetura, engenharia e construção também podem dificultar a plena realização dos benefícios do BIM. De forma semelhante, Ghaffarianhoseini *et al.* (2017) destacam que a implementação do BIM pode ser cara e requer um investimento substancial em treinamento e atualização de software, o que pode ser uma barreira para pequenas e médias empresas. A integração do BIM em projetos de construção pode enfrentar resistência por parte de profissionais acostumados com métodos tradicionais de trabalho, resultando em uma curva de aprendizagem acentuada, além disso, a

³ Desenho Assistido por Computador

mudança para o BIM implica em uma transformação organizacional, que muitas empresas podem achar difícil de realizar (AZHAR, 2011).

Krygiel e Nies (2008) afirmaram que o BIM é mais do que apenas uma representação gráfica do projeto, é uma metodologia abrangente que incorpora dados de projeto, construção e operação em um modelo tridimensional integrado, facilitando a colaboração entre todas as partes envolvidas no projeto. Eastman *et al.* (2011) definem o BIM como um processo que envolve a geração e gestão de representações digitais das características físicas e funcionais de um local. O *National Institute of Building Sciences* (NIBS, 2007) também definiu o BIM como uma tecnologia e um conjunto de processos associados para produzir, comunicar e analisar modelos de construção, abrangendo a geometria, as relações espaciais, a geografia e as propriedades dos componentes da construção. Esses modelos digitais servem como um recurso compartilhado de informações sobre uma instalação, formando uma base confiável para a tomada de decisões durante todo o seu ciclo de vida, desde a concepção inicial até a demolição. De acordo com o instituto, o BIM pode ser entendido de três maneiras diferentes: como um produto, como uma tecnologia da informação ou como um requisito para a gestão de instalações.

Os principais escritórios de arquitetura, engenharia e construção começaram a transição das tecnologias CAD para a metodologia BIM, visando a otimização de processos, melhoria dos fluxos de trabalho, compatibilidade entre as diferentes especialidades e uniformidade nos documentos emitidos. A expectativa é que essa transição aumente a eficiência nos processos típicos da indústria, reduzindo a quantidade e a gravidade dos problemas associados aos métodos mais tradicionais.

O BIM não é apenas um produto ou uma tecnologia transformadora para a concepção de edifícios, mas representa uma mudança na metodologia de trabalho. Ele permite que o edifício seja representado por objetos inteligentes que contêm informações detalhadas sobre suas características e facilita a compreensão de como esses objetos interagem entre si no modelo da construção. O seu uso impacta a criação de projetos e visualizações dos modelos, além de melhorar a relação entre os diferentes agentes envolvidos na construção, facilitando o desenvolvimento, permitindo testar diferentes soluções de design e analisar aspectos como consumo de energia, comportamento térmico e acústico, segurança contra incêndios, sistemas estruturais, configurações espaciais, orientabilidade, custos e viabilidade de construção. Além disso, uma equipe de projeto com diversas especialidades pode trabalhar simultaneamente, detectando possíveis conflitos e erros na concepção do projeto. Para os construtores e

subcontratados, o BIM oferece uma compreensão clara de como as tarefas devem ser executadas, minimizando erros e desperdícios durante a fase de construção. Após a construção, facilita a gestão das informações referentes à manutenção e limpeza, incluindo periodicidade e detalhes dos serviços. Embora a tecnologia apresente um grande potencial para transformar a indústria da construção, é fundamental reconhecer e abordar os desafios existentes para assegurar uma implementação bem-sucedida e plena utilização dos seus benefícios.

Durdyev *et al.* (2021) destacam que países desenvolvidos, como os Estados Unidos e o Reino Unido, apresentam uma adoção mais ampla e avançada das ferramentas BIM para avaliação energética, atribuída a fatores como avanços tecnológicos, maior conscientização e políticas governamentais favoráveis. Semelhantemente, Arenas e Shafique (2023), em uma pesquisa de revisão mais atualizada, com o objetivo de investigar as tendências e aplicações de edifícios sustentáveis baseados em BIM ao redor do mundo, identificaram um aumento nas publicações sobre o tema a partir de 2015, com a China predominando como o país com maior número de estudos de caso, seguida pela Inglaterra, Austrália e Estados Unidos. Os autores concluíram que o BIM é uma ferramenta poderosa que aprimora as abordagens ambientais e sustentáveis nas fases de projeto e construção de edifícios verdes.

Pan *et al.* (2024) descreve que o BIM pode ser uma ferramenta eficaz para alcançar a sustentabilidade das edificações. Segundo os autores a indústria da construção consome uma grande quantidade de energia e contribui para as emissões de gases de efeito estufa. Nos Estados Unidos, por exemplo, edifícios consomem cerca de 40% da energia total do país e emitem 20% do CO₂. Com isso, o setor de construção tem um impacto negativo no meio ambiente devido ao consumo de energia e emissões de carbono, o que intensifica os problemas de mudanças climáticas e esgotamento de recursos.

O BIM pode ser utilizado para comparar e alcançar metas energéticas de diferentes designs, resultando em edifícios eficientes em termos de energia e adaptados às necessidades específicas. O BIM permite a realização de análises de desempenho sustentável desde as fases iniciais do projeto, facilitando a tomada de decisões informadas que podem minimizar impactos adversos e melhorar a eficiência energética do edifício. Edifícios projetados com BIM podem alcançar um desempenho energético superior, economizando energia e reduzindo a dependência de fontes de energia ineficientes e caras. O BIM automatiza registros e documentações, tornando os processos mais confiáveis e eficientes em termos de tempo. Isso inclui a simulação e análise de modelos integrados antes da fase de construção (PAN *et al.*, 2024).

As ferramentas BIM podem efetivamente melhorar a avaliação do desempenho energético dos edifícios, permitindo uma análise mais precisa do consumo energético e das emissões de gases de efeito estufa.

2.8 A utilização do REVIT para simulações térmicas e energéticas

O Revit oferece vantagem principalmente em relação à facilidade na modelagem e à praticidade de utilizar uma única plataforma integrada. Utilizar uma única plataforma reduz o retrabalho e os erros de transferência de dados, pois geralmente arquitetos projetam edifícios em um modelo, enquanto os consultores de energia recriam esse design em um modelo de energia do edifício (BEM), levando à duplicação de esforços e possíveis erros (BEAZLEY et al., 2017). O Revit permite a criação de modelos tridimensionais detalhados que incluem as propriedades físicas e térmicas dos materiais de construção, refletindo fielmente as condições reais. Isso possibilita uma representação precisa da edificação, essencial para simulações realistas de desempenho energético, permitindo uma análise detalhada do comportamento térmico da edificação. As análises energéticas podiam ser realizadas em tempo real, com ajustes e otimizações aplicados diretamente no modelo BIM, promovendo um fluxo de trabalho contínuo e eficiente.

No Revit, era possível simular diferentes cenários de desempenho energético, permitindo que os projetistas tomassem decisões informadas desde as fases iniciais do projeto e facilitassem o processo iterativo de refinamento. Essa possibilidade favorecia práticas de construção sustentável, contribuindo para a criação de edificações que não só atendiam aos requisitos normativos, mas também reduziam o impacto ambiental. O uso do Revit também era amplamente aplicado em simulações de retrofit, em que se avaliavam os impactos de intervenções em edificações existentes para melhorar o desempenho energético e cumprir normas de sustentabilidade (RODRIGUES et al., 2020).

As ferramentas BIM mais populares para avaliação energética eram o Revit e o GBS, amplamente utilizadas em diferentes tipos de projetos de construção, incluindo residenciais, comerciais, educacionais e de planejamento urbano (DURDYEV et al., 2021). De acordo com pesquisas recentes, a combinação do Revit com o GBS foi considerada uma abordagem bem-sucedida para análises energéticas em edifícios, apresentando resultados satisfatórios. Essa integração, que também incluía o Insight 360, utilizava motores de simulação como o DOE-2 e o EnergyPlus, permitindo uma análise aprofundada do desempenho energético das

edificações, incluindo consumo de energia, cargas térmicas e conforto térmico, além de facilitar a tomada de decisões informadas desde as fases iniciais do projeto até a otimização contínua do desempenho (MAHAARAJA & RENUKA, 2023).

Entretanto, é importante destacar que, a partir de 2025, a Autodesk descontinuou o GBS e reconfigurou o Insight, que passou a ser direcionado prioritariamente para análises de carbono (operacional e incorporado), não oferecendo mais os recursos de simulação energética como anteriormente descritos. Dessa forma, embora a literatura registre amplamente o uso do Revit integrado ao GBS e ao Insight, atualmente sua relevância permanece sobretudo na etapa de modelagem BIM e na definição das propriedades térmicas dos materiais, enquanto as simulações energéticas passaram a depender de softwares específicos, como o EnergyPlus.

2.8.1 Precisão das simulações

Zarzuela *et al.* (2019) observaram que a introdução de dados (*inputs*) no GBS é mais intuitiva e confortável em comparação com outras ferramentas. A interface limpa e a facilidade na modelagem em 3D e a precisão dos dados climatológicos foram particularmente apreciadas, facilitando o processo de avaliação energética. Além disso, o GBS permite a realização de estudos solares completos e precisos, criando massas no entorno e oferecendo um estudo visual detalhado do estudo da influência da luz solar. Ainda, segundo os autores, em várias categorias avaliadas, como dados gerais, uso/custo de energia, e carga de calefação e refrigeração, o GBS demonstrou ser uma ferramenta eficiente e confiável. Por meio do software é possível gerar relatórios detalhados e claros, permitindo uma fácil interpretação dos dados. Apesar dos aspectos positivos, os autores mencionaram algumas dificuldades na utilização do GBS, sendo que a principal limitação identificada foi a ausência de uma análise completa do ciclo de vida, que incluiria desde a fabricação dos materiais até a manutenção e vida útil do edifício.

Estudos, como o de Henschel (2018), indicam que a precisão das simulações realizadas com o *Energy Analysis* do Autodesk Revit integrada ao GBS, quando comparada com dados reais de consumo de energia, apresentou um desvio menor em relação ao *EnergyPlus*, com uma margem de erro de 0,5% contra 7,5%. Este desvio mais baixo indica uma maior precisão do *Energy Analysis* comparado ao *EnergyPlus*. No entanto, a precisão dessas ferramentas pode variar dependendo da qualidade dos dados inseridos e da complexidade do modelo.

Shultz (2018), Kamarudin *et al.* (2019) e Fitriani *et al.* (2022) afirmam que a utilização do GBS foi um componente fundamental para a realização de simulações energéticas preliminares

e análises de sustentabilidade, fornecendo dados essenciais que auxiliaram na avaliação inicial do desempenho energético dos edifícios durante as fases iniciais de projeto.

André (2019) e Pereira *et al.* (2021) utilizaram o GBS para realizar as simulações energéticas de uma edificação e concluíram que o software é uma ferramenta eficaz, além de facilitar a interoperabilidade de informações entre programas BIM, permitindo uma transferência de dados sem grandes perdas. Isso assegura que as informações inseridas no modelo BIM possam ser utilizadas diretamente nas simulações energéticas, eliminando a necessidade de revisões manuais. Além disso, a interface amigável do GBS amplia a capacidade de projetar edifícios de alto desempenho, economizando tempo e custos em comparação com métodos convencionais de análise energética.

Taha *et al.* (2020) desenvolveu um estudo em que adotou GBS para análise energética e o Insight 360 para simulações de desempenho energético e análise de iluminação na fase de projeto. O objetivo foi melhorar o desempenho da iluminação natural, determinar a iluminação artificial adequada e seus custos, calcular a energia renovável e economia de custo a partir de painéis fotovoltaicos e avaliar o desempenho energético na fase de projeto. Os resultados demonstraram que a tecnologia BIM pode auxiliar no aumento da eficiência energética e resolver problemas relacionados ao desempenho energético na fase de projeto. Os resultados evidenciam que houve um aumento notável no desempenho da iluminação natural e artificial, com custos reduzidos graças ao uso de painéis fotovoltaicos. O estudo também destaca que a simulação e análise energética durante a fase de projeto potencializa a redução de custos.

Taha *et al.* (2020) examinaram o impacto de diversos parâmetros de projeto, como orientação, proporção janela-parede e tipo de vidro, no desempenho e custo de energia elétrica, utilizando o edifício da Reitoria da Faculdade de Agricultura da Universidade de Diyala, no Iraque. Os autores verificaram como o uso das ferramentas BIM podem aumentar a eficiência do uso da água e melhorar a ventilação natural. Por meio de simulações, os autores determinaram que a orientação do edifício, a proporção janela-parede e o tipo de vidro têm um impacto relevante no consumo de energia e nos custos associados. Pereira *et al.* (2021) observaram que o uso do GBS permite simulações precisas e detalhadas, que são essenciais para a tomada de decisões.

Balo e Ulutas (2023) realizaram uma simulação no GBS para determinar a espessura ótima de isolamento para paredes sanduíche, utilizando uma combinação de modelagem matemática e o Revit. Segundo os autores, as simulações forneceram resultados altamente precisos para determinar a espessura ideal de isolamento. O uso do Revit permitiu comparar diferentes

combinações de materiais de construção e isolamento, identificando as mais eficazes para minimizar o consumo de energia.

De acordo com Nascimento *et al.* (2023), a utilização do GBS permitiu a execução de simulações detalhadas de desempenho energético, auxiliando na identificação de estratégias para melhorar a eficiência energética das edificações. As simulações consideraram diferentes cenários de ventilação, aquecimento e resfriamento, proporcionando uma visão abrangente do consumo energético. Em um dos casos estudados, as simulações resultaram em uma redução de até 35% no consumo anual de energia após a implementação das melhorias sugeridas pelo software, como o aprimoramento do isolamento térmico e a otimização dos sistemas de ventilação. O uso do GBS ajudou a identificar problemas específicos relacionados à ventilação e à insolação das edificações, detectando áreas com ventilação insuficiente e radiação de calor excessiva, o que permitiu a proposição de soluções para melhorar o conforto térmico dos ocupantes.

Najjar *et al.* (2023) afirmaram que a utilização do GBS foi fundamental para obter resultados detalhados e precisos sobre o desempenho energético de construções modulares com estrutura metálica em diferentes zonas bioclimáticas do Brasil. As simulações foram realizadas em conformidade com as recomendações da norma ABNT NBR 15220-3:2005 para as dimensões das aberturas de ventilação. O uso do GBS facilitou a avaliação detalhada do consumo anual de eletricidade e do uso específico para sistemas de iluminação e HVAC. A precisão dos resultados permitiu aos autores analisarem de forma abrangente como as diferentes dimensões das aberturas de ventilação impactam na eficiência energética das construções.

Maglad *et al.* (2023) desenvolveram uma análise energética utilizando o Insight 360, o que permitiu a realização de simulações detalhadas, gerando diferentes cenários de design que variavam a orientação do edifício, proporção de janelas para paredes, tipos de materiais de construção, e outros parâmetros relevantes. Para os autores, além das economias de energia, os resultados obtidos relevam que houve uma redução nos custos operacionais e uma contribuição para a sustentabilidade ambiental.

Dantas (2022) obteve resultados confiáveis através das simulações desenvolvidas com a ferramenta Insight. No entanto, foram identificadas limitações na inserção de alguns dados de entrada e na exportação dos dados de saída, o que exigiu a transferência de arquivos para o OpenStudio para obtenção completa dos resultados. As simulações realizadas nos dois softwares apresentaram resultados consistentes, com variações de até 1% em mais de 98% das horas do ano entre as ferramentas. Isso demonstra a eficácia do Insight em fornecer resultados

confiáveis para a análise de eficiência energética dos edifícios. Contudo, a exportação dos dados do Insight para o OpenStudio apresentou algumas limitações, indicando a necessidade de utilizar ambos os softwares de maneira complementar para obter resultados mais detalhados e precisos. A pesquisa constatou que a combinação das capacidades de ambos os softwares pode potencializar a criação de uma ferramenta de programação visual em ambiente BIM, que ofereça as capacidades de cálculo do OpenStudio com a interface amigável do Insight.

2.8.2 Limitações em normas locais

Oliveira, Jesus e Conde (2023) observaram que as análises do Revit não satisfizeram completamente os requisitos da NBR 15.575-1:2013, mas são úteis para diagnósticos preliminares. Os resultados obtidos no estudo demonstraram que o uso de ferramentas BIM, especificamente o Revit e o Insight 360, foi eficaz na realização de simulações energéticas analíticas. As simulações permitem identificar pontos críticos no projeto do edifício que poderiam ser habilitados para melhorar a eficiência energética. Isso sugere que, embora úteis, essas ferramentas podem necessitar de complementos ou ajustes para atender a normas específicas locais de construção e eficiência energética. Pimentel *et al.* (2020) utilizaram o GBS e verificou limitações da ferramenta para atender aos pré-requisitos do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações (RTQ-C), sendo necessária a exportação para outros softwares de simulação.

Muta *et al.* (2024) realizaram simulações de iluminação natural utilizando a ferramenta Insight, em conformidade com a NBR 15575:2013. Os resultados foram analisados para verificar a quantidade de luz natural que penetra nos diferentes ambientes do edifício, gerando mapas de iluminação e gráficos que mostram a distribuição da luz ao longo do dia e das diferentes estações do ano. O estudo concluiu que o *Insight Lighting Analysis* não é totalmente compatível com os critérios requeridos pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RTQ-R). A ferramenta é mais direcionada para atender aos critérios de certificação LEED, o que resulta em limitações ao tentar aplicá-la segundo as normas brasileiras. Da mesma forma Pereira *et al.* (2021) afirmam que a utilização do Revit para certificação energética pode acelerar o processo e reduzir os custos associados. No entanto, a padronização internacional dos esquemas de certificação energética ainda é necessária para melhorar a eficiência e confiabilidade das certificações realizadas através do BIM. Outro fator considerado como desafio por Beazley *et al.* (2017), são as limitações atuais

devido à dependência do banco de dados de materiais da Autodesk, que é baseado nos EUA, o que requer a personalização de dados para materiais locais.

Tanto o Insight quanto o GBS oferecem possibilidades limitadas para os usuários editarem os parâmetros de simulação, o que pode levar a inconsistências nos resultados quando comparados com a realidade do edifício. Isso implica que, apesar de serem ferramentas úteis para as fases iniciais do projeto, não são recomendadas para a etiquetagem energética devido à limitação no número de configurações de simulação disponíveis.

2.8.3 Facilidade de uso e interface

Macedo (2021) realizou um estudo para analisar, comparar e verificar a confiabilidade do desempenho do software Revit para estudos de desempenho térmico e lumínico de edificações. O autor concluiu que embora a interface amigável do Revit e suas ferramentas integradas como o Insight 360 permitam uma rápida realização de múltiplas simulações, houve algumas dificuldades na manipulação do Insight, sugerindo que a facilidade de uso pode não ser uniforme para todos os usuários e pode variar com a complexidade do projeto. Pereira *et al.* (2021) destacam a facilidade de uso e acessibilidade do GBS, o que facilita a integração das análises de desempenho energético nos processos de projeto desde as fases iniciais. Essa acessibilidade contribui para uma maior adesão por parte dos projetistas e engenheiros.

Algumas ferramentas adicionais podem ser incorporadas ao BIM para facilitar o processo de modelagem. Pereira *et al.* (2021) avaliaram o uso de linguagens de programação visuais como Dynamo e Grasshopper, quanto a sua importância e benefícios na modelagem e análise de desempenho dos edifícios e destacaram que a integração dessas linguagens visa simplificar e automatizar processos complexos de design e análise, proporcionando maior eficiência e precisão.

As linguagens de programação visuais, como Dynamo e Grasshopper, permitem a automação de tarefas repetitivas e complexas dentro do ambiente BIM. Isso facilita a criação de modelos paramétricos que podem ser facilmente ajustados e analisados, melhorando a eficiência do processo de design. Além disso, essas ferramentas oferecem alta flexibilidade na customização de fluxos de trabalho, permitindo que os profissionais ajustem as ferramentas BIM às necessidades específicas de seus projetos, criando soluções sob medida para problemas complexos de design e análise.

2.8.4 Limitações de edição e personalização

Coelho (2020) realizou simulações utilizando as ferramentas Insight e OpenStudio para verificar o desempenho térmico de uma edificação. Os resultados das simulações do OpenStudio apresentaram valores 5% mais altos em comparação aos obtidos com o Insight. Segundo a autora, o Insight se mostrou adequado para as fases iniciais do projeto devido à sua capacidade de realizar múltiplas simulações de forma rápida e intuitiva, permitindo a comparação de diversos cenários e ajudando a identificar as variáveis mais influentes no consumo energético do edifício. Além disso, as análises indicaram que a escolha da ferramenta de simulação e os parâmetros de configuração têm um impacto substancial nos valores estimados de consumo energético. A pesquisa concluiu que ferramentas mais detalhadas, como OpenStudio e EnergyPlus, são mais indicadas para fases avançadas do projeto. Por outro lado, o Insight, apesar de suas limitações em termos de precisão e detalhamento dos resultados, é útil para estimativas preliminares e comparações entre diferentes cenários de projeto.

Macedo (2021) observou que o Revit facilita a análise do conforto ambiental durante as fases iniciais do projeto, mas apresenta limitações em termos de profundidade e confiabilidade quando comparado a programas específicos de simulação. Portanto, a autora recomenda a utilização de ferramentas complementares para obter diagnósticos mais completos.

Segundo Gomes (2021) os resultados obtidos no GBS foram considerados promissores, mas com limitações devido aos parâmetros de simulação disponíveis para edição, especialmente na caracterização do sistema de ar-condicionado, afetando os resultados da avaliação da envoltória do edifício. Quintanilha *et al.* (2023) realizaram simulações para verificar o desempenho térmico e consumo energético de uma edificação com fachada verde. Embora os resultados tenham sido satisfatórios, os autores mencionaram algumas limitações, pois a precisão dos resultados depende da qualidade, detalhamento refinado da modelagem no Revit e exportação correta dos dados.

Fitriani *et al.* (2022) verificaram que a combinação do Revit e do GBS permitiu realizar simulações detalhadas, considerando vários fatores como localização geográfica, dados climáticos, propriedades do envelope térmico do edifício e características operacionais. Porém, os autores destacam que um dos principais desafios encontrados foi a criação dos cenários de simulação, que tiveram de ser desenvolvidos com base nas variáveis disponíveis no software Revit, o que pode limitar a capacidade de adaptação dos cenários às condições locais específicas. Embora haja inúmeras vantagens, também há desafios relacionados à incerteza e

sensibilidade nas análises de desempenho energético baseadas em BIM, sugerindo a necessidade de metodologias aprimoradas para lidar com essas questões (DURDYEV *et al.*, 2021).

Apesar das limitações mencionadas, a aplicação do Revit e do GBS para análises de desempenho térmico e energético é de grande importância. Essas ferramentas oferecem uma maneira eficiente e integrada de realizar simulações energéticas e de desempenho térmico, permitindo que as equipes de projeto tomem decisões informadas desde as fases iniciais. A acessibilidade e a facilidade de uso do Revit e do GBS são vantagens a serem apreciadas, especialmente para projetos que requerem uma rápida interação e otimização. Além disso, a integração do Revit com outras ferramentas BIM facilita a colaboração entre diferentes disciplinas, promovendo um fluxo de trabalho contínuo e eficiente. A capacidade de realizar simulações detalhadas e identificar estratégias de melhoria de eficiência energética contribui para o desenvolvimento de edificações mais sustentáveis e energeticamente eficientes.

2.9 Interoperabilidade entre o BIM e BEM para simulações energéticas

A interoperabilidade entre ferramentas BIM e BEM é uma área de crescente importância na arquitetura e engenharia, especialmente à medida que a eficiência energética se torna um foco central nos projetos de construção. BIM e BEM são tecnologias complementares que, quando integradas de forma eficiente, podem proporcionar um fluxo de trabalho mais robusto e preciso, resultando em edificações mais sustentáveis. No entanto, essa integração ainda enfrenta desafios, principalmente relacionados à perda de dados e à complexidade do processo de transferência de informações entre diferentes softwares. Pretti (2018) investigou essas dificuldades, apontando a necessidade de avanços tecnológicos e metodológicos para superar as barreiras de interoperabilidade e garantir resultados confiáveis nas simulações energéticas.

Pretti (2018) avaliando a interoperabilidade entre ferramentas BIM e BEM, com foco na eficiência energética das edificações, observou perda de informações durante o compartilhamento de dados entre diferentes ferramentas e como isso afeta os resultados das análises de eficiência energética. O autor destaca a importância de um fluxo de dados contínuo entre softwares, utilizando o Autodesk Revit para modelagem BIM e programas como GBS, EnergyPlus, eQUEST, DesignBuilder, IES-VE, OpenStudio e Insight para análises de eficiência energética.

Pretti (2018) investigou três formas de interoperabilidade: direta (GBS e Insight), por exportação (GBS e DesignBuilder) e indireta (EnergyPlus). A interoperabilidade indireta refere-se ao compartilhamento de dados entre ferramentas BIM e BEM através de um intermediário, como um arquivo padronizado ou um software que atua como ponte entre as ferramentas principais. Os formatos mais comuns incluem Industry Foundation Classes (IFC) e Green Building XML (gbXML). Por exemplo, GBS converte um arquivo exportado (gbXML) para o formato específico necessário para a ferramenta BEM, como o Input Data File (IDF) usado pelo EnergyPlus. No desenvolvimento da pesquisa foi evidenciada a perda ou não reconhecimento de informações no processo de interoperabilidade e nas exportações utilizando gbXML e IFC, resultando em resultados pouco confiáveis. A exportação do arquivo IDF para o EnergyPlus apresentou desafios, pois resultou em perdas de informações importantes, sendo que essas perdas afetaram negativamente a preparação dos arquivos para as simulações. No caso específico do EnergyPlus, embora tenha sido possível abrir os arquivos IDF, a organização do arquivo para a realização das simulações foi bastante trabalhosa, sendo necessário utilizar o IDF Editor para verificar e ajustar as informações contidas nos arquivos, o que adicionou complexidade e tempo ao processo. Além disso, ocorreram discrepâncias na localização definida nos modelos, que exigiram ajustes manuais, evidenciando as dificuldades de interoperabilidade entre as ferramentas BIM e BEM. No entanto, o EnergyPlus destacou-se por ser a única ferramenta BEM que apresentou resultados mais confiáveis de simulação. Este desempenho positivo é atribuído à capacidade do EnergyPlus de manter a integridade dos dados necessários para simulações energéticas precisas.

A interoperabilidade entre ferramentas BIM e BEM ainda enfrenta desafios, especialmente no que diz respeito à preservação de informações durante o processo de compartilhamento de dados, o que impacta diretamente a precisão das simulações energéticas. Pretti (2018) identificou que a interoperabilidade entre os softwares testados não foi satisfatória, uma vez que a maioria das ferramentas BEM não conseguiu realizar simulações após a importação dos arquivos nos formatos gbXML e IFC, ou ao carregar arquivos IDF. Isso evidencia uma limitação na capacidade dessas ferramentas de interpretar corretamente os dados exportados a partir de modelos BIM, o que compromete tanto a eficiência quanto a confiabilidade das simulações energéticas.

Embora a pesquisa de Pretti (2018) tenha identificado problemas, especialmente na exportação e importação de dados, outras pesquisas apresentam diferentes perspectivas sobre essa questão. Ao abordar este tema, foram considerados outros estudos relevantes, como os de

Reis (2023), Coelho (2020), Pimentel *et al.* (2020), Duarte *et al.* (2021), Dantas (2022), Muta *et al.* (2024), Asdrubali *et al.* (2021), e Guilherme e Maciel (2023), a fim de fornecer uma visão abrangente sobre os desafios e soluções no campo da interoperabilidade entre BIM e BEM.

Reis (2023) destaca que a transferência de modelos entre diferentes ferramentas, sem um processo metodológico adequado, frequentemente resulta em perda de informações, especialmente ao utilizar arquivos no formato IFC. Segundo a autora, esses arquivos não demonstram plena compatibilidade na análise de sistemas HVAC, com modelos mais complexos apresentando inconsistências geométricas, particularmente em superfícies inclinadas. Além disso, Reis (2023) enfatiza que a falta de bidirecionalidade na exportação e importação de modelos entre softwares como Revit e DesignBuilder impede uma integração completa dos processos, dificultando o retorno de arquivos modificados nas ferramentas de simulação para o software BIM original, gerando a necessidade de realizar novas modelagens e exportações. Esse ponto é corroborado por Muta *et al.* (2024), que identificaram problemas na importação de arquivos gbXML para o DesignBuilder, resultando em perda de dados e a necessidade de ajustes manuais.

Adicionalmente, Reis (2023) observa que a quantidade de informações fornecidas por um modelo BIM pode ser maior do que a necessária para a análise em um software BEM, o que pode resultar em sobrecarga ou má interpretação dos dados. A autora também destaca que o retrabalho em algumas etapas é necessário para se obter resultados satisfatórios na simulação térmica.

Coelho (2020) comparou as ferramentas de simulação energética Insight e OpenStudio, revelando importantes conclusões sobre suas capacidades, limitações e adequação para diferentes fases do projeto de construção. Os resultados do Insight mostraram valores elevados, embora um pouco mais próximos aos de ferramentas mais detalhadas, como o GBS. Já o OpenStudio apresentou resultados de consumo energético mais próximos da realidade esperada. A diferença nos resultados foi atribuída às diferentes suposições e ao nível de detalhe que cada ferramenta permite configurar. Destaca-se também desafios na exportação de modelos do Revit para o OpenStudio, como a perda de informações, incluindo cargas térmicas e tabelas de operação. Além disso, a geometria dos modelos exportados apresentou problemas, especialmente ao se utilizar o método de configurações de energia no Revit. Apesar das variações nos valores absolutos entre as ferramentas, a tendência geral dos resultados foi consistente, o que permitiu identificar as soluções mais eficientes em termos de energia. Nesse contexto, ferramentas como o Insight são úteis para uma visão geral e para identificar as opções

mais promissoras, enquanto ferramentas como o OpenStudio são essenciais para análises mais precisas e detalhadas (Coelho, 2020).

Pimentel *et al.* (2020) observaram que o GBS não atendeu às expectativas da pesquisa, o que levou à necessidade de interoperabilidade com outros softwares de simulação, como EnergyPlus, IES-VE e DesignBuilder. O EnergyPlus foi considerado uma alternativa viável por ser amplamente utilizado e gratuito, mas sua interface complexa foi vista como uma dificuldade. Foram avaliadas diversas alternativas para exportar a geometria do Revit para o EnergyPlus utilizando programas intermediários, sendo esse processo considerado oneroso e complexo. Por fim, o DesignBuilder foi escolhido por sua interface amigável e pela capacidade de importar modelos BIM do Revit via arquivo gbXML, facilitando a interoperabilidade. Ao final os autores concluíram que a melhor estratégia para garantir eficiência energética e conformidade com as normas brasileiras é a interoperabilidade entre Revit e DesignBuilder, apesar dos desafios de interoperabilidade.

Duarte *et al.* (2021) compararam os resultados das simulações energéticas realizadas no GBS e no DesignBuilder, observando diferenças nos resultados devido às particularidades de cada ferramenta e aos métodos de simulação empregados. Durante o processo de exportação e importação de dados do Revit para as ferramentas BEM, os autores identificaram erros e omissões de alguns dados, como propriedades de materiais e geometria das estruturas. Esses erros podem levar a discrepâncias nos resultados das simulações energéticas. A diversidade de ferramentas utilizadas para diferentes aspectos do modelo (geometria, análise térmica, ocupação, etc.) dificultou a manutenção de uma troca de dados precisa e consistente entre os softwares, uma vez que cada ferramenta pode interpretar e processar os dados de maneiras ligeiramente diferentes, afetando a precisão das simulações. Em relação ao consumo energético, os autores destacam que as simulações no GBS forneceram uma estimativa inicial baseada em padrões de uso e dados climáticos históricos. No entanto, o DesignBuilder ofereceu uma análise mais detalhada, especialmente em aspectos como sistemas HVAC, conforto térmico e consumo energético, resultando em estimativas mais precisas quando comparadas aos dados reais.

No que diz respeito ao conforto térmico, o GBS foi eficaz para identificar tendências gerais de desempenho térmico, mas faltou detalhamento em relação à distribuição de temperaturas internas e às cargas térmicas específicas. Por outro lado, o DesignBuilder permitiu uma análise térmica mais detalhada, oferecendo visualizações precisas das distribuições de temperatura e cargas térmicas, o que é importante para otimizações específicas de design, como a colocação de janelas e o isolamento térmico.

Quanto aos sistemas HVAC, a simulação no GBS foi básica, proporcionando uma visão geral da eficiência energética dos sistemas instalados. Já no DesignBuilder, a simulação foi mais robusta, permitindo ajustes detalhados nos parâmetros de operação dos sistemas, resultando em uma análise mais realista e precisa da eficiência energética desses sistemas.

Dantas (2022) observou que as comparações entre os resultados obtidos por meio de simulações em softwares de base BEM e BIM mostraram que os modelos alcançaram resultados equiparáveis e convergentes. No entanto, o processo de exportação de arquivos entre os programas revelou-se arriscado, frequentemente resultando em retrabalho e tornando o processo de simulação mais trabalhoso. O autor ressaltou que, embora o Insight não possa substituir o OpenStudio, ele pode ser utilizado como uma ferramenta complementar de modelagem.

Muta *et al.* (2024) destacaram que, durante a importação de arquivos gbXML exportados do Revit, o DesignBuilder apresentou problemas relacionados aos sistemas HVAC especificados no software de origem, o que exigiu ajustes manuais para corrigir as configurações no DesignBuilder. Além disso, ocorreram perda de dados e problemas de geometria durante a importação, necessitando de correções para que o modelo pudesse ser utilizado adequadamente. Um dos problemas identificados foi a duplicação da área do edifício pelo DesignBuilder, o que impactou negativamente os resultados da simulação. De maneira semelhante, Asdrubali *et al.* (2021) evidenciaram a necessidade de refinamento no processo de interoperabilidade, destacando a perda de informações durante a exportação de BIM para BEM e a falta de automatização completa nesse processo. Guilherme e Maciel (2023) concluíram que o DesignBuilder possui melhor capacidade de troca de dados e menor perda de informações essenciais durante a transferência entre aplicativos. No entanto, a complexidade da geometria dos modelos ainda pode comprometer a eficiência dessa transferência, levando os autores a destacar a necessidade de simplificação das geometrias para evitar perda de dados durante a movimentação entre os softwares.

A interoperabilidade entre softwares BIM e BEM, apesar de essencial para o desenvolvimento de edificações energeticamente eficientes, ainda é um processo complexo e trabalhoso. A pesquisa de Pretti (2018) e outros estudos revisados destacam que a troca de dados entre diferentes ferramentas, como Revit, DesignBuilder, EnergyPlus, e outras, frequentemente resulta em perda de informações e a necessidade de ajustes manuais, impactando a precisão das simulações. Embora algumas ferramentas, como o DesignBuilder, tenham demonstrado maior capacidade de preservar dados durante a transferência, a

complexidade das geometrias e a falta de automatização completa continuam sendo grandes obstáculos.

Portanto, para que a interoperabilidade entre BIM e BEM se torne uma prática rotineira nos processos de projeto arquitetônico, é necessário um esforço contínuo em pesquisa e desenvolvimento. Esse esforço deve focar na simplificação dos processos, na melhoria da confiabilidade das exportações e importações de dados, e na automação das interações entre os diferentes softwares. Somente assim será possível alcançar a plena integração dessas tecnologias, permitindo que elas cumpram seu papel na otimização da eficiência energética e na sustentabilidade das construções.

3 METODOLOGIA

3.1 Natureza da Pesquisa e Objeto de Estudo

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo experimental-simulativo, conforme as diretrizes de Groat e Wang (2013), integrando procedimentos quantitativos e de modelagem computacional. O objetivo é avaliar o desempenho térmico de um edifício educacional de múltiplos pavimentos localizado na cidade de Catalão–GO, por meio de simulações paramétricas realizadas com o motor de simulação EnergyPlus, amplamente utilizado para a análise do comportamento termoenergético de edificações.

A metodologia adota uma estrutura quase experimental, em que um modelo base é comparado a três cenários de intervenção, permitindo o controle de variáveis e a análise de causalidade entre modificações construtivas e respostas térmicas simuladas. Dois desses cenários correspondem a estratégias arquitetônicas passivas aplicáveis, sendo elas a fachada com vegetação e a segunda pele ventilada, enquanto o terceiro consiste em uma simulação hipotética com paredes externas compostas por painéis de EPS (poliestireno expandido).

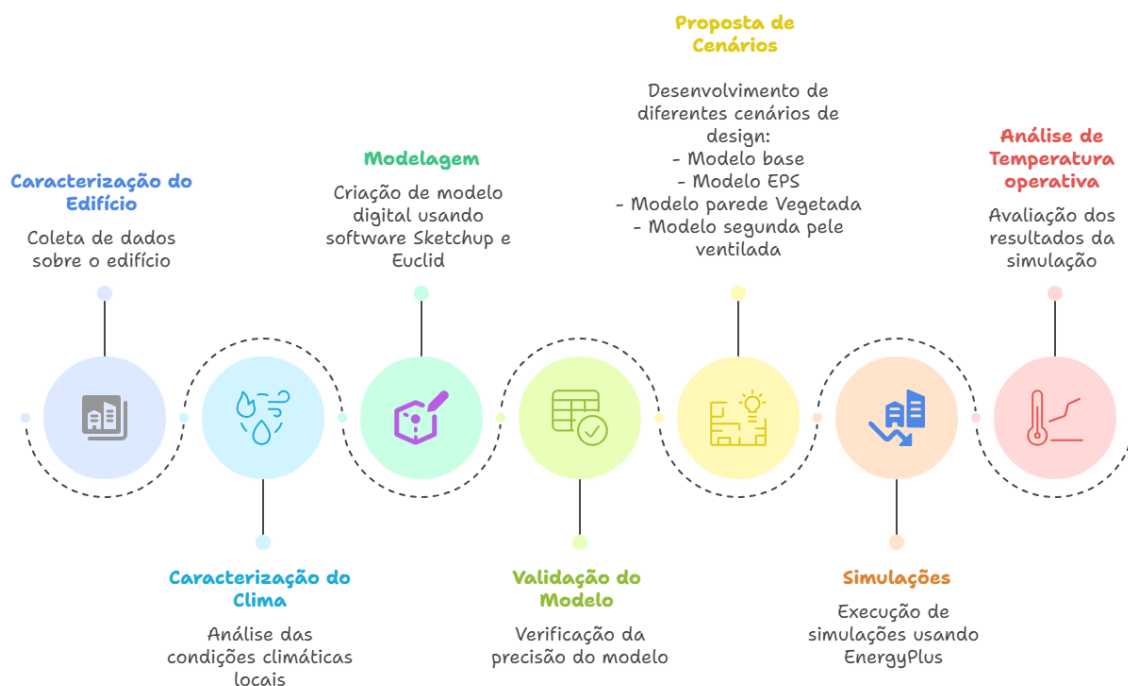
As configurações foram fundamentadas nas recomendações bioclimáticas da ABNT NBR 15220-3:2024 para a zona 4B e seguiram os princípios de controle experimental, com variáveis dependentes e independentes claramente definidas. Foram consideradas constantes as condições de ocupação, ventilação e cargas internas (iluminação, equipamentos e metabolismo dos usuários), permitindo a comparação objetiva entre as alternativas.

A etapa de modelagem digital envolveu a caracterização arquitetônica e construtiva da edificação, contemplando materiais, orientação solar, disposição das fachadas e tipos de esquadrias, fatores determinantes para o balanço térmico. Três salas foram selecionadas como unidades de atribuição: a sala 301 (fachada noroeste), a sala 205 (entre noroeste e sudoeste) e a sala 108 (fachada nordeste), esta última considerada referência de melhor desempenho.

As simulações foram conduzidas conforme as diretrizes da ABNT NBR 15575-1:2025 e da Instrução Normativa INMETRO INI-C (2022), que orientam a avaliação do desempenho térmico e da eficiência energética de edificações. O comportamento térmico foi analisado a partir da temperatura operativa, parâmetro que representa a média ponderada entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média, conforme a ASHRAE Standard 55 (2023) e a ABNT NBR 16401-2 (2008).

Essa métrica, amplamente reconhecida por sua acurácia e replicabilidade, permite comparar o desempenho térmico relativo entre cenários distintos, assegurando trabalhabilidade e validade interna ao processo de simulação. A Figura 8 apresenta o esquema metodológico sintetizado do estudo, evidenciando o fluxo de modelagem, simulação e análise.

Figura 8 - Esquema do processo metodológico da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

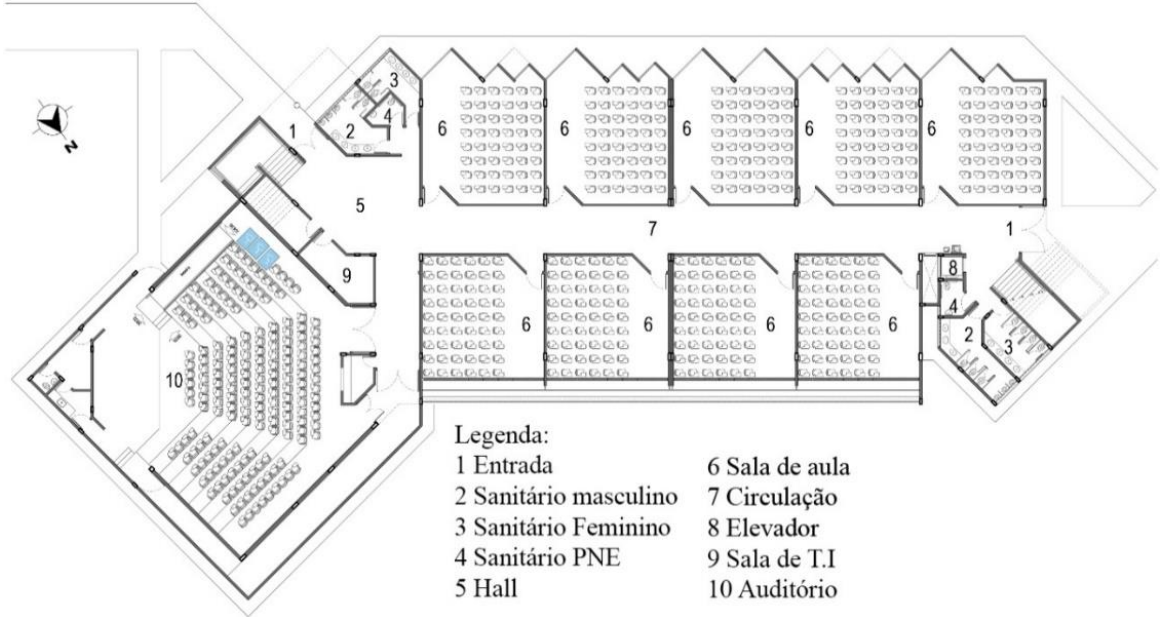
3.2 Caracterização do Edifício

O edifício selecionado para a simulação termo energética é o Bloco Didático I da Universidade Federal de Catalão (UFCAT), localizado na cidade de Catalão-GO. O bloco possui área construída total de 3.358,16 m², distribuída em três pavimentos. O pavimento térreo tem 1.336,10 m², e os dois pavimentos superiores possuem 1.011,03 m² cada. Sua ocupação inclui 28 salas de aula, 1 auditório, sanitários em todos os andares, salas administrativas, áreas técnicas (como elevador, shaft e sala de T.I.) e apoio ao Diretório Central dos Estudantes (DCE), conforme ilustrado nas Figuras 9, 10 e 11.

A edificação é composta predominantemente por estrutura de concreto armado e alvenaria de vedação. Todas as esquadrias da edificação são em perfis de alumínio com fechamento em vidro. O sistema de ventilação natural é baseado em janelas do tipo Maxim-Ar, com aberturas

parciais em dois dos três módulos de cada vão. As paredes internas e externas da edificação são compostas por alvenaria de tijolos cerâmicos, assentados com argamassa e revestidos com reboco em ambas as faces. As lajes são do tipo mista, constituídas por placas de EPS e concreto, e o forro interno é composto por painéis de gesso. A cobertura é formada laje e telhas termoacústicas.

Figura 9 - Planta baixa Pavimento Térreo.



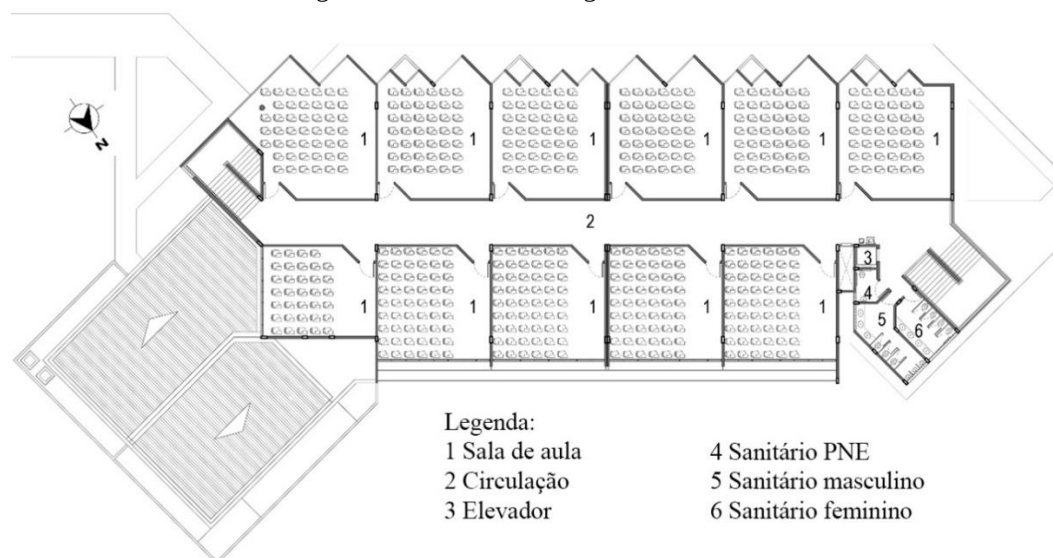
Fonte: UFCAT, ajustado pela autora (2022).

Figura 10 - Planta baixa Primeiro Pavimento.



Fonte: UFCAT, ajustado pela autora (2022).

Figura 11 - Planta baixa Segundo Pavimento.



Fonte: UFCAT, ajustado pela autora (2022).

A fachada voltada para o sudoeste é composta predominantemente por esquadrias em quase toda sua extensão (Figura 12). Contudo, essa orientação apresenta baixo aproveitamento da ventilação natural, uma vez que os ventos predominantes em Catalão sopram das direções nordeste e leste. O posicionamento das esquadrias foi definido de forma a minimizar a incidência solar direta no período vespertino, protegendo os ambientes internos do ganho térmico excessivo insolação poente.

Figura 12 - Fachada Sudoeste.



Fonte: Fotografado pela autora (2022).

Por outro lado, as salas voltadas para o Nordeste (Figura 13) são protegidas por brises metálicos fixos, que contribuem para o sombreamento da fachada. Essas salas possuem

esquadrias em toda a extensão da parede externa, o que favorece a entrada de luz natural e proporciona boa iluminação interna. No entanto, mesmo com os brises, parte da radiação solar incide no ambiente durante o período da manhã, especialmente nas áreas próximas às janelas, ocasionando desconforto térmico pontual. As escadas de acesso, posicionadas ao norte, apresentam fechamento em vidro, o que permite a entrada de ventilação cruzada e iluminação natural nas áreas de circulação entre as salas.

Figura 13 - Fachada Nordeste.



Fonte: Fotografado pela autora (2022).

3.2.1 Sistema de Iluminação

O sistema de iluminação da edificação é composto integralmente por luminárias do tipo calha comercial equipadas com lâmpadas tubulares fluorescentes. Não há presença de dispositivos com acionamento automático, sensores de presença ou controle por fotocélula. A operação é realizada manualmente e não existem divisões de circuitos por ambiente, o que limita a flexibilidade de controle do consumo energético.

As luminárias estão distribuídas de acordo com o uso e dimensão de cada espaço, apresentando variação no tipo e quantidade de lâmpadas. Os modelos identificados foram de 2 lâmpadas de 120 cm, 2 lâmpadas de 60 cm e 4 lâmpadas de 60 cm, todos do tipo sobrepor. A distribuição por ambiente é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Distribuição do sistema de iluminação.

Tipo de Luminária	Ambiente	Quantidade por ambiente
Luminária calha comercial para 2 lâmpadas tubulares, 120cm tipo sobrepor	Salas 101-109	9
	Escritório 1	6
	Escritório 2	12
	Sala DCE	9
Luminária calha comercial para 4 lâmpadas tubulares, 60cm tipo sobrepor	Circulação, térreo	19
	Circulação, 1º pavimento	15
	Circulação, 2º pavimento	14
	WC Fem, pavimento térreo	4
	WC Mas, pavimento térreo	4
	WC PNE, pavimento térreo	1
	WC Fem (próximo ao auditório)	3
	WC Mas (próximo ao auditório)	3
	WC PNE (próximo ao auditório)	1
	Circulação, térreo	3
	WC Fem, 2º pavimento	4
Luminária calha comercial para 2 lâmpadas tubulares, 60cm tipo sobrepor	WC Mas, 2º pavimento	4
	WC PNE, 2º pavimento	1
	Escada, térreo	3
	Salas 301-310	9
	Circulação, 1º pavimento	1
	Escada, 1º pavimento	2
	Escada, 2º pavimento	3
	Salas 201-208	9
	Sala 210	6

Fonte: Elaborada pela própria autora (2022).

3.2.2 Sistema de condicionamento de ar

O sistema de climatização da edificação é composto por equipamentos do tipo split, distribuídos entre as salas de aula e o setor administrativo. As salas de aula de todos os pavimentos estão equipadas com aparelhos do tipo split do modelo teto, com capacidade de 60.000 BTU/h, adequados para ambientes com maior carga térmica interna. Já o setor administrativo, localizado no primeiro pavimento, dispõe de cinco unidades do tipo split janela, com capacidade de 20.000 BTU/h cada. Na Tabela 3-3 está apresentado o levantamento da quantidade e especificações dos equipamentos de climatização por pavimento.

Tabela 3 - Levantamento da quantidade de equipamentos de climatização.

Pavimento	Modelo	Tipo	Capacidade (BTU/h)	Quantidade
Térreo	1	Split (teto)	60000	9
1º pavimento	1	Split (teto)	60000	9
	2	Split (janela)	20000	5
2º pavimento	1	Split (teto)	60000	11

Fonte: Elaborada pela própria autora (2022).

3.3 Caracterização do clima de Catalão – zona bioclimática 4B

Esta seção apresenta a caracterização climática da cidade de Catalão, situada na zona bioclimática 4B de acordo com a ABNT NBR 15220-3:2024, que corresponde a regiões de clima quente e seco, com temperatura média anual de bulbo seco entre 22,9 °C e 25 °C e umidade relativa média inferior a 70,3%. São discutidos os principais parâmetros climáticos que influenciam o desempenho térmico das edificações, além das estratégias passivas recomendadas pela norma, como sombreamento, ventilação natural e uso de materiais com inércia térmica. Também são abordadas propostas de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro, com destaque para novas metodologias que buscam refletir com maior precisão a diversidade climática nacional.

3.3.1 Clima de Catalão segundo a NBR 15220-3:2024

O Brasil, devido à sua vasta extensão territorial, apresenta uma grande diversidade climática. Para orientar soluções arquitetônicas adaptadas às condições ambientais de cada região, a ABNT NBR 15220-3:2024 propôs um novo zoneamento bioclimático, substituindo a antiga divisão em oito zonas por uma classificação mais precisa, composta por 12 zonas. Essa norma estabelece diretrizes construtivas específicas para o projeto arquitetônico, contemplando estratégias de sombreamento, ventilação natural, escolha de materiais, orientação solar e definição das tipologias edificantes mais adequadas a cada contexto climático.

De acordo com a ABNT NBR 15220-3:2024, a cidade de Catalão-GO está inserida na zona bioclimática 4B, caracterizado por climas levemente quentes e secos com elevada amplitude térmica diária. O clima local é classificado como Aw segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, indicando clima tropical com estação seca no inverno, com predominância de chuvas entre os meses de outubro e março. As temperaturas mais amenas ocorrem entre junho

e julho, com médias em torno de 20,8 °C, enquanto os verões apresentam altas temperaturas associadas à elevada umidade relativa do ar, (CARDOSO, 2014).

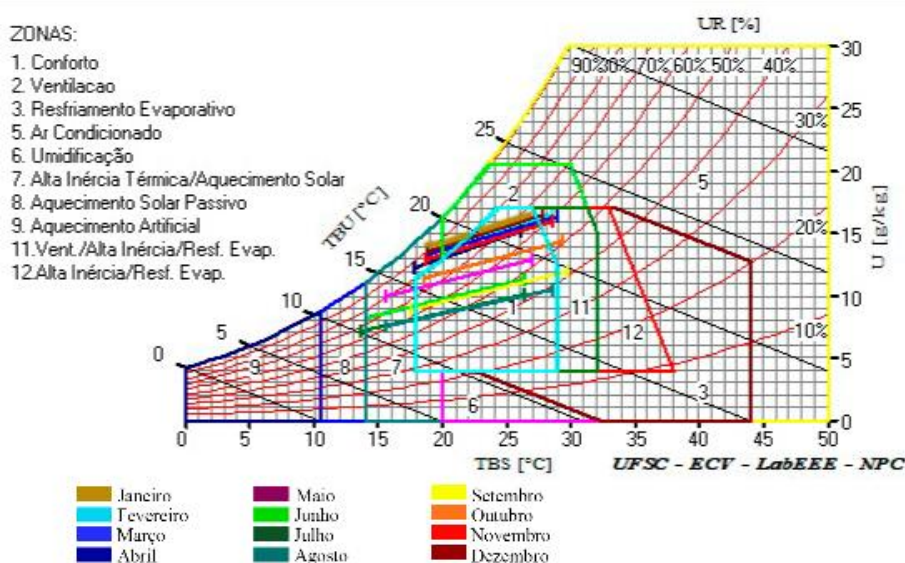
3.3.2 Estratégias Projetuais para a Zona Bioclimática 4B

Para a zona bioclimática 4B, a ABNT NBR 15220-3:2024 recomenda a adoção de aberturas médias para ventilação natural, sombreamento eficaz das aberturas, paredes externas com alta inércia térmica e coberturas leves com isolamento térmico adequado. As estratégias passivas mais indicadas para este tipo de clima incluem o uso de ventilação cruzada, sombreamento adequado, inércia térmica para retardar os ganhos de calor e, em determinados períodos do ano, o resfriamento evaporativo.

A norma ressalta que o conforto térmico nas regiões do grupo B, como é o caso de Catalão, está diretamente relacionado à baixa umidade relativa do ar. Dessa forma, a renovação constante do ar interno se mostra essencial, tanto para melhorar a qualidade do ambiente quanto para auxiliar na redução da umidade acumulada, contribuindo para uma sensação térmica mais confortável ao longo do dia (ABNT, 2024).

A carta bioclimática da cidade de Catalão (Figura 14), obtida por meio do software Analysis Bio, aponta a faixa de conforto térmico entre 18 °C e 29 °C, com umidade relativa entre 20% e 80%. A ventilação natural é eficaz em temperaturas externas entre 20 °C e 32 °C, desde que o ar interno esteja mais frio e a umidade se mantenha entre 15% e 75% (LAMBERTS et al., 2016).

Figura 14 - Carta bioclimática apresentando as normais climatológicas da cidade de Catalão, GO.



Fonte: Analysis Bio (2022).

3.3.3 Dados climáticos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a cidade de Catalão

Para o desenvolvimento de edificações termicamente eficientes, é imprescindível considerar as variáveis climáticas do local de implantação, bem como as necessidades de conforto térmico específicas para cada tipo de uso e atividade. Segundo Lamberts et al. (2014), os elementos fundamentais que compõem o clima local incluem radiação solar, temperatura do ar, regime de ventos, umidade relativa, precipitação e cobertura de nuvens.

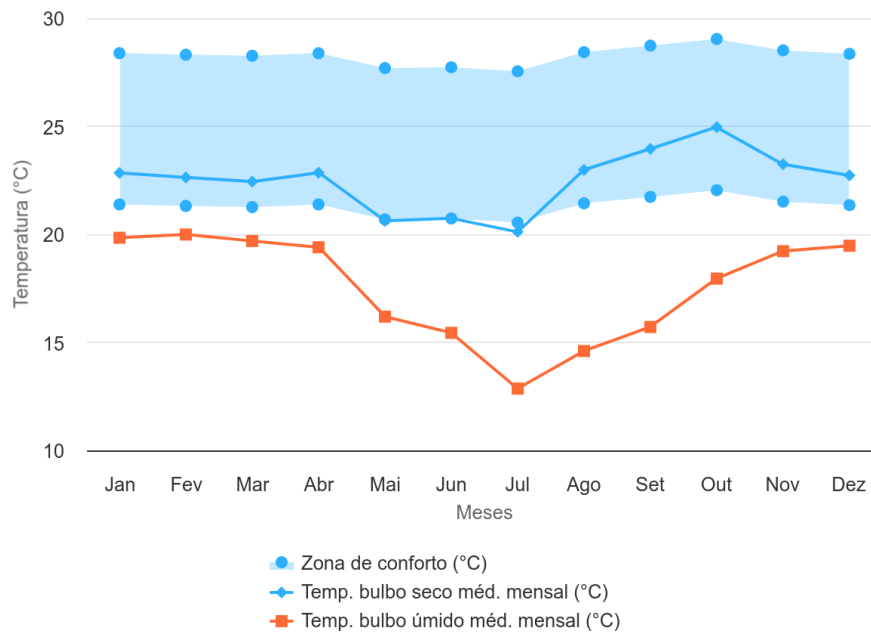
Quando não é possível realizar um levantamento climático de campo, recomenda-se a utilização de dados oficiais disponibilizados pelo INMET, órgão vinculado ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Esses dados representam uma base confiável para compreender o comportamento climático de diversas regiões brasileiras.

Outra importante fonte de dados é a plataforma *Projetando Edificações Energeticamente Eficientes* (ProjetEEE)⁴, que disponibiliza gráficos derivados de informações coletadas pelo INMET no ano de 2016, último ciclo com dados validados para uso em simulações termoenergéticas. Nessa plataforma, é possível consultar gráficos climáticos de temperatura, umidade, precipitação, radiação solar, ventos e zona de conforto térmico, além de diretrizes projetuais específicas para cada cidade analisada.

Para a cidade de Catalão – GO, os dados referentes ao ano de 2016 mostram que a menor temperatura de bulbo úmido foi registrada em julho (12,86 °C), enquanto a temperatura mínima de bulbo seco foi de 20,11 °C no mesmo período. Já a maior temperatura de bulbo úmido ocorreu em fevereiro (19,99 °C), e a temperatura máxima de bulbo seco foi verificada em outubro, com 24,96 °C (Figura 15). A análise desses dados possibilita ao projetista identificar estratégias passivas mais adequadas, como o uso de massa térmica, sombreamento, ventilação natural ou isolamento térmico, otimizando o conforto dos usuários ao longo do ano.

⁴ <https://projeteee.mme.gov.br/>

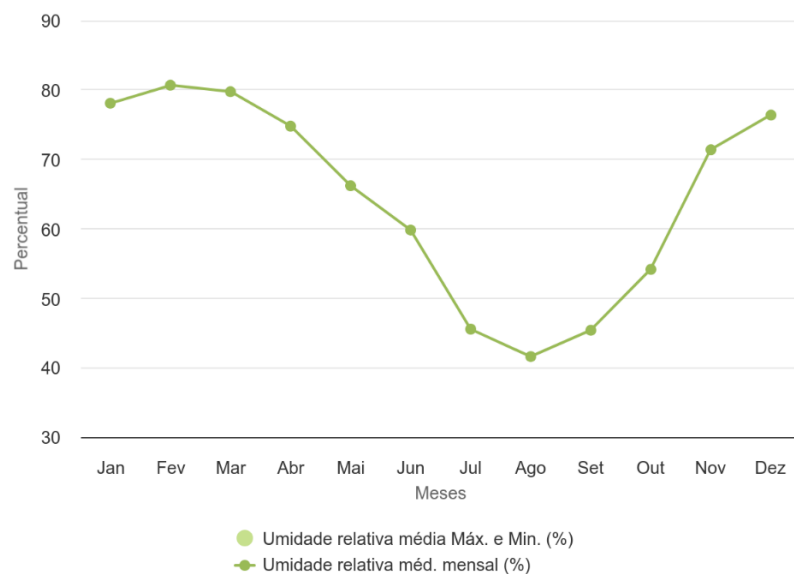
Figura 15 - Gráfico de temperaturas da cidade de Catalão- GO, ano de 2016.



Fonte: ProjeTEEE (2024). Disponível em: <https://projeteer.mme.gov.br/>. Acesso em: 2 jul. 2022.

O gráfico de umidade relativa do ar (Figura 16) apresenta os valores mensais de umidade na cidade de Catalão. Durante os períodos de maior umidade, ocorre uma redução na amplitude térmica diária, resultando em noites mais quentes e sensação de abafamento. Por outro lado, nos meses com umidade relativa mais baixa, há um aumento na amplitude térmica, com dias quentes e noites mais frias, o que também pode gerar desconforto, especialmente em ambientes mal isolados termicamente.

Figura 16 - O gráfico de umidade relativa da cidade de Catalão- GO, ano de 2016.



Fonte: ProjeTEEE (2024). Disponível em: <https://projeteer.mme.gov.br/>. Acesso em: 2 jul. 2022.

As médias mensais de temperaturas de conforto térmico para Catalão são apresentadas na Tabela 4.

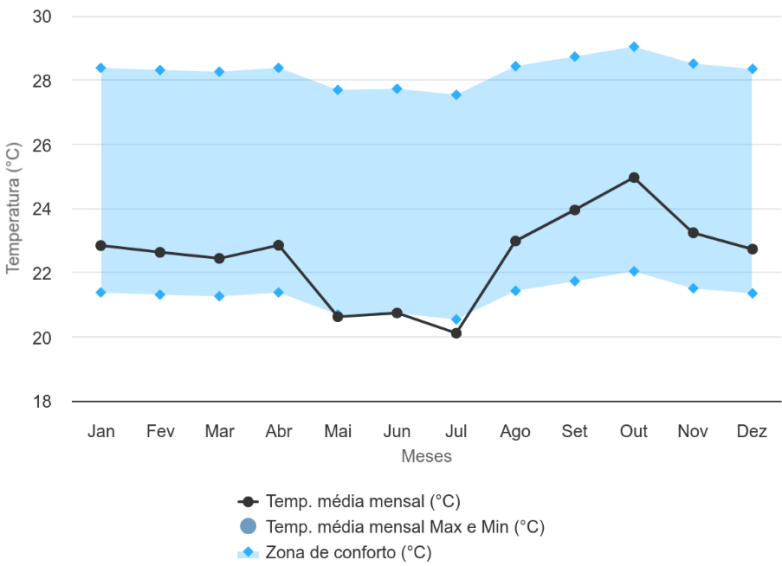
Tabela 4 - Temperaturas mínimas e máximas de conforto térmico para a cidade de Catalão.

Mês	Temperatura mínima de conforto térmico (°C)	Temperatura máxima de conforto térmico (°C)
Janeiro	21,38	28,38
Fevereiro	21,31	28,31
Março	21,26	28,26
Abril	21,38	28,38
Maio	20,69	27,69
Junho	20,73	27,73
Julho	20,54	27,54
Agosto	21,43	28,43
Setembro	21,73	28,73
Outubro	22,04	29,04
Novembro	21,51	28,51
Dezembro	21,35	28,35

Fonte: ProjeteEE (2024). Adaptado pela autora. Disponível em: <https://projeteee.mme.gov.br/>. Acesso em: 2 jul. 2022.

No gráfico de temperatura e zona de conforto do ano de 2016 (Figura 17), a menor temperatura média mensal foi registrada em julho, apresentando 20,11 °C, com uma temperatura máxima de 25,91 °C e uma mínima de 14,94 °C. A maior temperatura média mensal ocorreu em outubro, com 24,96 °C, sendo a temperatura máxima de 30,76 °C e a mínima de 20,06 °C. O gráfico da zona de conforto foi definido levando em consideração as observações de Givoni (1992), que notou que o ser humano é capaz de se adaptar ao ambiente ao interagir com fatores físicos e psicológicos.

Figura 17 - O gráfico de temperatura e zona de conforto da cidade de Catalão- GO, ano de 2016.

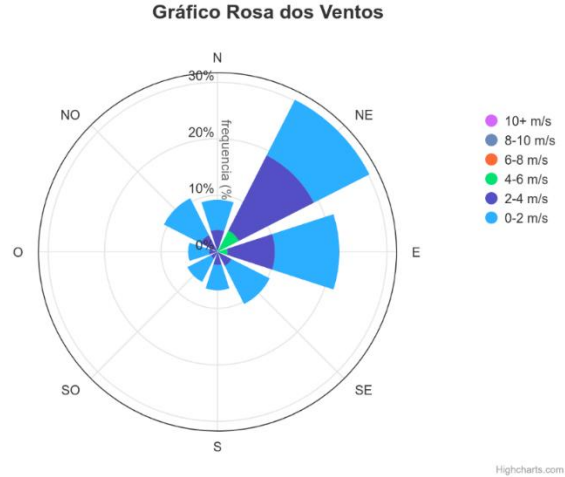


Fonte: ProjeteEE (2024). Disponível em: <https://projeteee.mme.gov.br/>. Acesso em: 2 jul. 2022.

Na Figura 18 está apresentada a rosa dos ventos para a cidade de Catalão, revelando predominância de ventos provenientes das direções Nordeste (NE) e Leste (E). As velocidades mais frequentes situam-se nas faixas de 0 a 4 m/s, sendo que ventos superiores a 6 m/s são raros.

Essas informações são essenciais para orientar a implantação das aberturas nas fachadas, favorecendo o aproveitamento da ventilação natural e contribuindo para o desempenho térmico e a eficiência energética da edificação. A constância na direção dos ventos ao longo do dia e da noite facilita a adoção de estratégias passivas de resfriamento, especialmente em projetos localizados na Zona Bioclimática 4B.

Figura 18 - O gráfico da rosa dos ventos da cidade de Catalão-GO.



Fonte: ProjeteEE (2024). Disponível em: <https://projeteee.mme.gov.br/>. Acesso em: 2 jul. 2022.

As estratégias bioclimáticas para edificações em Catalão podem ser aprimoradas com o suporte dos dados do site ProjeteEE, que apresenta recomendações específicas com base nas condições climáticas locais. No Quadro 1 estão sintetizados os níveis de conforto térmico ao longo do ano e as estratégias projetuais mais indicadas para cada período.

Quadro 1 - Estratégias bioclimáticas para conforto térmico de edificações em Catalão.

Estação	Horário	Desconforto por frio	Conforto térmico	Desconforto por calor
Verão	00h às 06h	56%	4%	40%
	Estratégias	Inércia Térmica para aquecimento Ventilação natural		
	06h às 12h	10%	50%	40%
	Estratégias	Sombreamento Ventilação natural		
	12h às 18h	5%	67%	28%
	Estratégias	Sombreamento Ventilação natural		
	18h às 00h	24%	26%	50%
Outono	Estratégias	Ventilação natural Inércia Térmica para aquecimento		
	00h às 06h	78%	5%	17%

	Estratégias	Inércia Térmica para aquecimento Ventilação natural		
	06h às 12h	26%	60%	14%
	Estratégias	Inércia Térmica para aquecimento		
	12h às 18h	4%	88%	8%
	Estratégias	-		
	18h às 00h	41%	26%	32%
	Estratégias	Inércia Térmica para aquecimento Ventilação natural		
Inverno	00h às 06h	77%	13%	11%
	Estratégias	Inércia Térmica para aquecimento		
	06h às 12h	30%	62%	7%
	Estratégias	Inércia Térmica para aquecimento		
	12h às 18h	4%	84%	12%
	Estratégias	-		
	18h às 00h	36%	55%	8%
Primavera	Estratégias	Inércia Térmica para aquecimento		
	00h às 06h	53%	27%	20%
	Estratégias	Inércia Térmica para aquecimento Ventilação natural		
	06h às 12h	12%	66%	22%
	Estratégias	Sombreamento Ventilação natural		
	12h às 18h	3%	70%	27%
	Estratégias	Sombreamento Inércia Térmica para resfriamento Resfriamento evaporativo		
	18h às 00h	20%	59%	21%
	Estratégias	Inércia Térmica para aquecimento Ventilação natural		

Fonte: ProjeTEEE (2024). Adaptado pela autora. Disponível em: <https://projeteee.mme.gov.br/>. Acesso em: 2 jul. 2022.

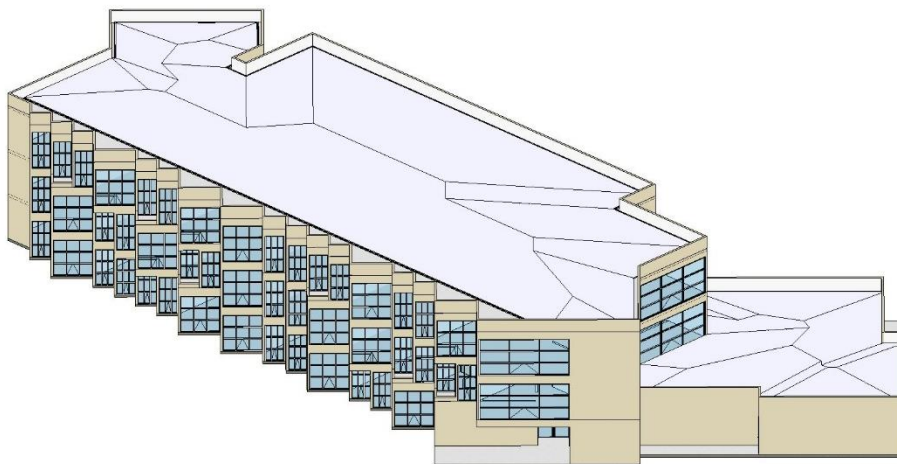
Como pode ser observado no verão se concentra os maiores índices de desconforto por calor, principalmente durante as tardes e noites, exigindo sombreamento eficaz e ventilação natural. No inverno, o desconforto térmico é associado às temperaturas mais baixas, sendo recomendada a inércia térmica voltada ao aquecimento dos ambientes. Já na primavera, devido à baixa umidade do ar, destaca-se a necessidade de estratégias combinadas, como inércia térmica e resfriamento evaporativo, que contribuem para manter o conforto térmico e equilibrar a umidade interna dos espaços.

3.4 Modelagem Digital

A primeira etapa metodológica consistiu na modelagem digital tridimensional da edificação em estudo, desenvolvida na plataforma Autodesk Revit, conforme os princípios da metodologia BIM. O modelo foi elaborado de modo a representar com precisão os elementos geométricos,

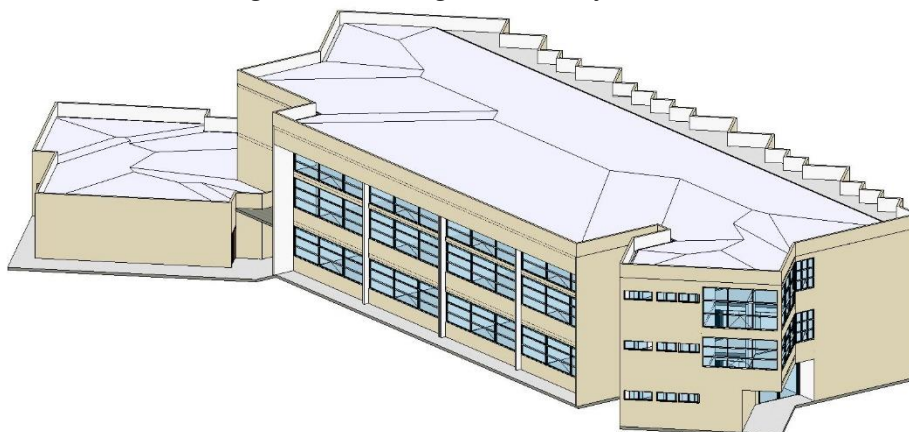
volumetrias, aberturas e materiais construtivos da edificação, garantindo a fidedignidade necessária para a etapa subsequente de análise termoeenergética (Figuras 19 e 20).

Figura 19 - Modelagem da edificação no Revit.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2024).

Figura 20 - Modelagem da edificação no Revit.

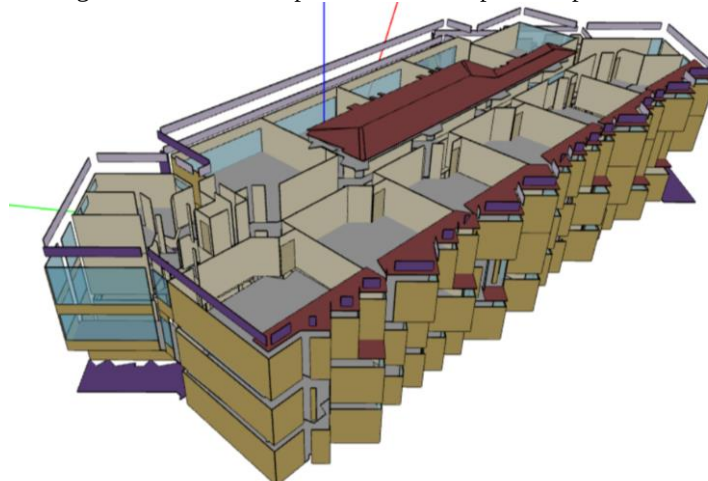


Fonte: Elaborado pela própria autora (2024).

Inicialmente, a proposta metodológica previa a integração entre o modelo BIM e a plataforma GBS para as simulações. No entanto, durante o desenvolvimento da pesquisa, a Autodesk anunciou a descontinuação do GBS, o que inviabilizou sua utilização e exigiu uma reestruturação da metodologia.

Como alternativa, foi realizado o processo de exportação do modelo do Revit para o OpenStudio, com o objetivo de manter a fidelidade geométrica e acelerar a criação das zonas térmicas. No entanto, os testes revelaram diversas incompatibilidades e falhas geométricas, especialmente em superfícies, janelas e definições de zoneamento, o que comprometeu a viabilidade do uso direto do modelo exportado. A complexidade da arquitetura e a quantidade de zonas do edifício educacional intensificaram os erros durante a conversão (Figura 21).

Figura 21 - Modelo exportado do Revit para o OpenStudio.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2024).

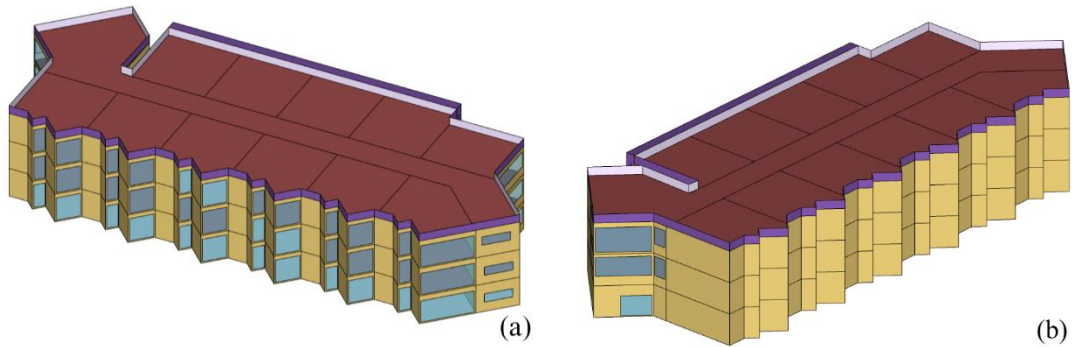
Diante das limitações observadas nas tentativas anteriores de integração via Revit e OpenStudio, optou-se por uma nova abordagem para a modelagem tridimensional da edificação.

3.4.1 Criação do modelo tridimensional do edifício

A modelagem tridimensional da edificação foi realizada no software SketchUp, com o uso do plugin Euclid, que permite a exportação precisa da geometria para o EnergyPlus, facilitando a integração entre as etapas de modelagem e simulação. O modelo foi concebido de forma simplificada, porém termicamente representativa, assegurando a fidelidade das informações essenciais para a análise de desempenho energético.

Para evitar erros frequentes relacionados à sobreposição de superfícies e inconsistências geométricas, especialmente em coberturas compartilhadas por múltiplos pavimentos, adotou-se a estratégia de modularização vertical. Assim, todos os pavimentos foram modelados com base em um pavimento tipo, garantindo uniformidade na volumetria e na distribuição espacial dos ambientes. Além disso, foi necessária uma simplificação adicional: devido à elevada complexidade geométrica das salas voltadas para a fachada poente, marcadas por variações na forma das plantas, adotou-se uma tipologia representativa, que foi replicada ao longo do pavimento. As Figura 22a e Figura 22b mostram as fachadas sudoeste e noroeste respectivamente.

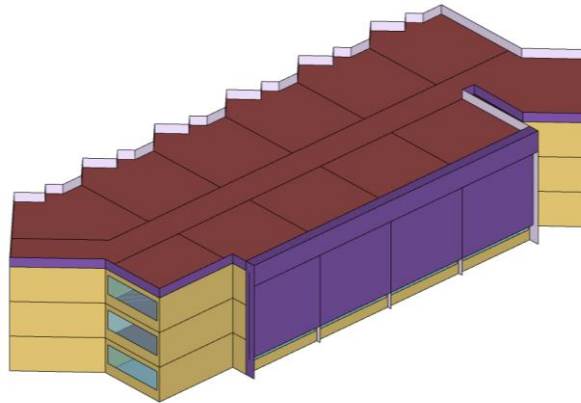
Figura 22 - (a) Fachada Sudoeste; (b) Fachada Noroeste.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Na Figura 23 está apresentada a fachada nordeste da edificação, destacando os elementos de sombreamento do tipo brise, representados no modelo por objetos do tipo *Shading*⁵.

Figura 23 - Fachada Nordeste.



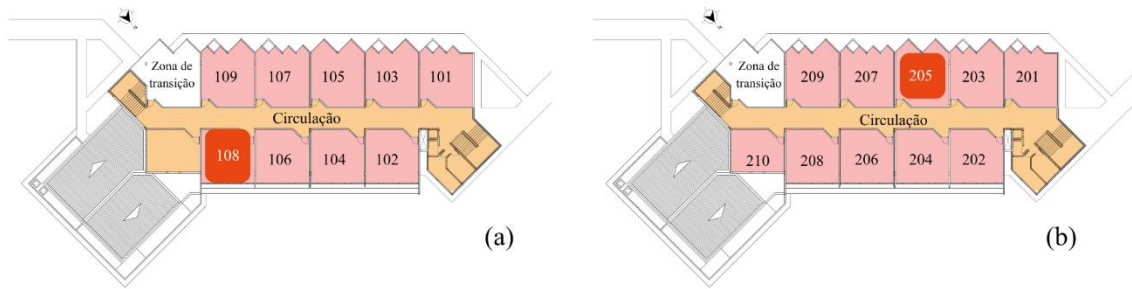
Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

A planta do último pavimento foi utilizada como referência para a replicação dos demais andares da edificação. O primeiro e segundo pavimentos foram configurados com dez salas de aula e uma zona térmica de transição (sala sem carga térmica). Ambientes com características de uso e exposição semelhantes, como banheiros, escadas e a caixa do elevador, foram agrupados em uma única zona térmica, totalizando doze zonas por pavimento.

O pavimento térreo apresenta nove salas de aula, configuração adotada para representar com maior fidelidade as condições reais da edificação. As Figuras 24a, 24b e 25 ilustram as nomenclaturas das zonas térmicas simuladas para o pavimento térreo, o primeiro e o segundo pavimentos, respectivamente, destacando em vermelho as salas 108, 205 e 301, selecionadas para análise detalhada.

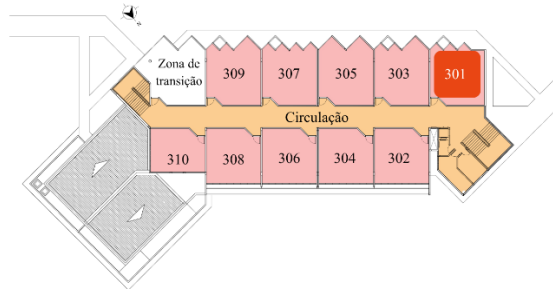
⁵ Elemento que representa sombreamento.

Figura 24 - (a) planta baixa do pavimento térreo; (b) planta baixa do primeiro pavimento.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

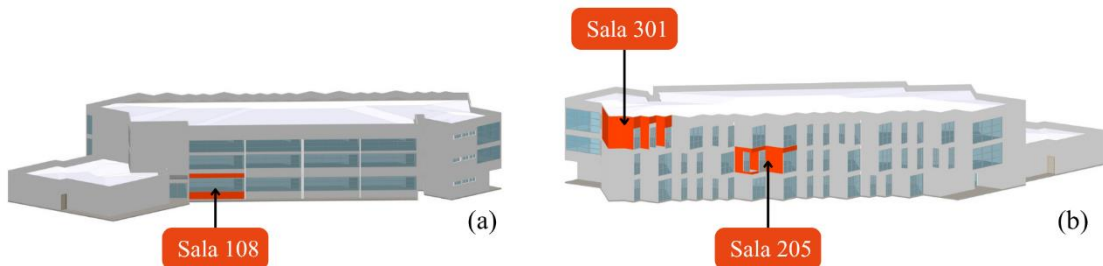
Figura 25 - Planta baixa do segundo pavimento.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

A Figura 26a destaca em vermelho a localização da sala 108, enquanto a Figura 26b indica as salas 205 e 301.

Figura 26 - (a) fachada nordeste, sala 108; (b) fachada sudoeste, sala 205 e 301.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

3.4.2 Validação do modelo

Para verificar a fidedignidade do modelo termoenérgico simulado, realizou-se uma validação comparativa entre os dados de temperatura do ar obtidos por meio do EnergyPlus e as médias horárias medidas in loco por Adiane Borges et al. (2016), abrangendo períodos representativos das quatro estações do ano (verão, inverno, primavera e outono) (Tabela 5). O cálculo do *Root Mean Square Error*⁶ (RMSE) resultou em 1,817 °C, valor que atende ao

⁶ Raiz do Erro Quadrático Médio

critério de precisão estabelecido pela ASHRAE Guideline 14-2014 para validações de temperatura interna ($RMSE \leq 2,0$ °C). Diante desse desempenho, o modelo demonstrou consistência e pode ser considerado validado para aplicação nas análises dos cenários propostos.

Tabela 5 - Média das temperaturas medidas in loco e simuladas.

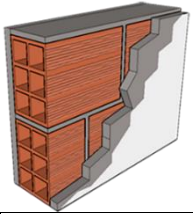
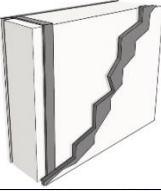
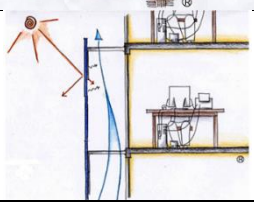
Dia simulado	Média de temperatura medida in loco (°C)	Média de temperatura simulada (°C)
15/11/2013	26,2	28,20
16/11/2013	27,4	28,60
23/11/2013	26,9	27,82
18/01/2014	25,5	28,48
13/02/2014	27,2	28,48
27/02/2014	28,2	28,23
03/05/2014	23,9	23,68
17/05/2014	25,7	23,84
31/05/2014	23,6	24,82
06/08/2014	25	21,78
07/08/2014	23,5	21,79
08/08/2014	24,1	21,96

Fonte: Dados medidos in loco obtidos de ADIANE BORGES et al. (2016); dados simulados elaborados pela autora (2025).

3.4.3 Cenários de simulação

Múltiplos cenários foram simulados para o edifício em estudo, sendo que o edifício existente foi designado como modelo base. Além disso foram testados: modelo EPS, modelo fachada vegetada, modelo segunda pele ventilada. Cada cenário considera alterações específicas na envoltória do edifício, mantendo constantes os parâmetros de ocupação, carga interna, ventilação, infiltração e condições climáticas (Quadro 2). A vegetação e a Segunda Pele Ventilada foi instalada apenas nas paredes externas da fachada Noroeste.

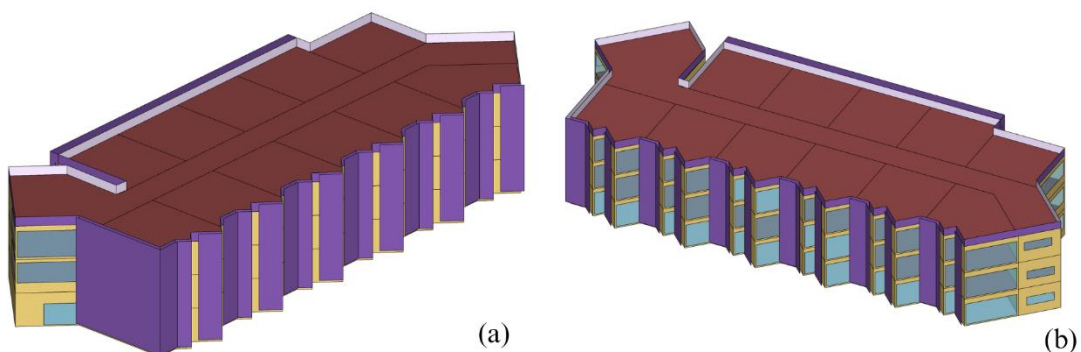
Quadro 2 - Síntese dos modelos simulados.

Cenário	Modelo	Representação
1	Modelo Base: Representa as condições reais do edifício, conforme levantamento in loco. Todas as superfícies e materiais foram definidos conforme sua composição original, sem alterações ou melhorias termoenergéticas. Este modelo serve como referência para comparação com os demais.	
2	Modelo EPS: Substituição do núcleo da parede externa por placas de Poliestireno Expandido (EPS), visando maior isolamento térmico. O restante da composição da parede (camadas externas e internas) foi mantido conforme o modelo base. A escolha do EPS como material isolante se justifica por seu baixo custo, leveza e elevada resistência térmica.	
3	Modelo Fachada Vegetada: Simula a adição de uma camada externa de vegetação vertical, do tipo parede verde aderida. Essa estratégia atua como barreira ao ganho de calor por radiação direta, além de contribuir para a evapotranspiração e melhora da umidade relativa local. A vegetação foi modelada como uma camada com propriedades térmicas definidas com base na literatura científica recente.	
4	Modelo Segunda Pele Ventilada: Implementação de uma segunda pele composta por painéis fotovoltaicos com espaçamento ventilado entre a fachada original e a nova camada. Essa solução proporciona sombreamento constante, atenuação do ganho térmico por radiação direta e permite ventilação natural do envelope externo.	

Fonte: ProjetEEE (2024). Disponível em: <https://projeteer.mme.gov.br/estrategias-bioclimaticas/>. Acesso em: 2 jul. 2025.

A representação da segunda pele no modelo foi realizada através dos elementos de *Shading*, posicionados a 40cm da fachada (Figura 27a, Figura 27b).

Figura 27 - Fachada Noroeste; (b) Fachada Sudoeste.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Na Figura 28 e Figura 29, estão ilustradas a proposta de fachada vegetada, composta por cobertura com vegetação do tipo hera (*Hedera helix*).

Figura 28 - Proposta do modelo Fachada Vegetada.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Figura 29 - Proposta do modelo Fachada Vegetada.

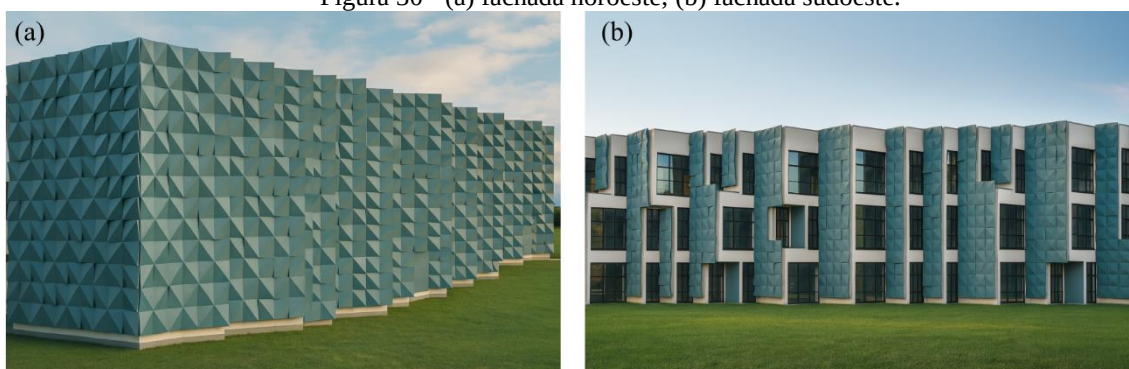


Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Para a estratégia de segunda pele ventilada, optou-se pela aplicação de painéis fotovoltaicos da marca Solarix⁷, na cor Mono Musgo e com dimensões de 70 × 70 cm. Nas Figuras 30a e 30b, estão demonstradas a configuração adotada para essa solução.

⁷ <https://solarix-solar.com/en/collection>

Figura 30 - (a) fachada noroeste; (b) fachada sudoeste.



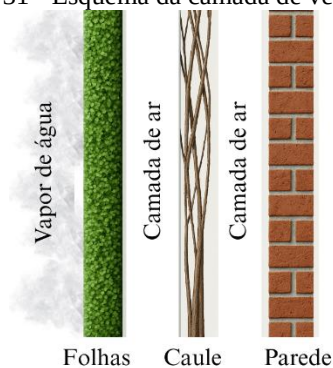
Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

3.4.4 Propriedade Térmica dos materiais

As propriedades térmicas dos materiais utilizados nas simulações foram definidas com base em dados extraídos de artigos científicos previamente selecionados e da ABNT NBR 15220:3-2005, buscando representações realistas de elementos construtivos comuns no contexto brasileiro e internacional.

A vegetação utilizada na simulação foi modelada com base nos dados de Yoshimi e Altan (2011), por meio de uma representação multicamada composta por cinco elementos: vapor de água, folhagem, camada de ar, caules e uma segunda camada de ar (Figura 31). Cada componente foi atribuído com suas respectivas propriedades térmicas, buscando representar de forma simplificada a atuação passiva da vegetação sobre a envoltória do edifício. Para as camadas de ar, adotou-se o valor de resistência térmica $R = 0,15 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (Figura 31).

Figura 31 - Esquema da camada de vegetação.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

As propriedades térmicas adotadas para o material EPS foram baseadas nos dados experimentais apresentados por Dena *et al.* (2021), que identificaram valores de condutividade térmica de $0,036 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, densidade de 30 kg/m^3 e calor específico de $1450 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

Na Tabela 6 estão relacionados os materiais aplicados por local (telhado, paredes, laje, piso e vegetação), especificando a espessura, condutividade térmica, densidade e calor específico.

Tabela 6 - Propriedade térmica dos materiais.

Local de Aplicação	Nome do Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m·K)	Densidade (kg/m³)	Calor Específico (J/kg·K)
Vegetação	Vapor de água	0,002	5,56	0,6	1966
	Folhagem	0,001	0,4	533	100
	Caules	0,015	0,14	110	1880
Telhado	Aço Galvanizado	0,002	55.0	7800	460
	Poliestireno Telha	0,06	0,04	16	1210
Parede	Reboco	0,025	1,15	2000	1000
	Tijolo Cerâmico	0,09	0,9	1600	920
	Argamassa Pintura	0,002	0,7	1200	840
	EPS Parede	0,08	0.036	30	1450
Laje	Forro de Gesso	0,03	0.35	700	840
	EPS Laje	0,08	0.036	20	1200
Piso	Concreto	0,1	1,75	2200	1000
	Piso Cerâmico	0,01	0,9	1600	920

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15220-3 (2005); Yoshimi e Altan (2011); Dena et al. (2024).

3.4.5 Configuração das simulações

Foi utilizado o arquivo climático EPW desenvolvido a partir de dados do INMET 2018 e disponibilizado pelo LABEEE/UFSC. A configuração do sistema de climatização nas simulações seguiu as diretrizes estabelecidas pela Portaria nº 309, de 22 de junho de 2022, do Ministério de Minas e Energia (MME), complementadas pela Nota Técnica nº 02/2024 emitida pelo Procel Edifica. Foi adotada a temperatura de *setpoint*⁸ de 24 °C para os sistemas de refrigeração, sendo o seu acionamento restrito aos períodos de ocupação das zonas térmicas simuladas.

Com base no escopo de aplicação do método de simulação, foi considerada neste estudo, a possibilidade de alternância entre estratégias passivas e ativas de condicionamento ambiental. Dessa forma, a operação dos sistemas de climatização foi modelada de forma a ocorrer apenas quando a temperatura do ambiente ultrapassa o valor de referência estipulado, compatibilizando o modelo computacional com uma abordagem de ventilação híbrida. Tal abordagem é prevista nas instruções normativas como alternativa viável para análise de edificações.

⁸ Ponto de ajuste

Para a definição da temperatura do solo utilizada nas simulações, adotaram-se os valores constantes na Tabela 7.

Tabela 7 - Temperatura do solo.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
25,26	25,03	24,31	23,72	22,77	22,42	22,51	23,02	23,82	24,65	25,35	25,67

Fonte: Sorgato et al. (2011).

Como não havia dados precisos sobre a potência das luminárias instaladas no ambiente real, estimou-se um valor com base no nível mínimo de iluminância recomendado pela norma NBR ISO/CIE 8995-1:2013, que estabelece 300 lux para salas de aula destinadas a atividades de leitura, escrita e exposição em quadro.

Para as simulações, considerou-se o funcionamento da edificação durante todos os dias do ano, excetuando-se os finais de semana. O *timestep*⁹ adotado foi de 15 minutos, o que proporciona maior precisão na representação das variações térmicas ao longo do dia. Os demais parâmetros e configurações adotados no modelo estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Configuração do arquivo de simulação.

Parâmetro	Configuração
Período de funcionamento do sistema de iluminação	07:00h às 22:00h
Período de ocupação das salas de aula	
Período de funcionamento dos equipamentos eletrônicos	
Período de funcionamento do sistema de climatização HVAC	
Taxa metabólica	70 W/m ²
Sistema de iluminação	3,05 W/m ²
Equipamentos	2,5 W/m ²
Ocupação das salas 310 e 210	38 pessoas
Ocupação das demais salas de aula	50 pessoas

Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

3.5 Limitações encontradas e transição metodológica

Durante o desenvolvimento da presente pesquisa, houve uma mudança na abordagem metodológica inicialmente planejada, motivada por fatores externos, especificamente a descontinuação de um dos softwares inicialmente selecionados para as simulações. O estudo previa a utilização da metodologia BIM aplicada à análise de desempenho térmico, com modelagem realizada no software Autodesk Revit e simulações conduzidas por meio da plataforma GBS, ferramenta então integrada ao ecossistema Autodesk. A escolha se justificava

⁹ Timestep: Intervalo de tempo entre os cálculos da simulação.

pela integração entre modelagem e simulação, visando agilidade, precisão geométrica e coerência de dados entre as fases de projeto e análise.

No entanto, durante o período de execução da pesquisa, foi anunciado oficialmente o encerramento do suporte e funcionamento do GBS em 1º de julho de 2025. Tanto o Autodesk Insight Energy Analysis quanto o GBS foram descontinuados e substituídos pela nova geração do Autodesk Insight Carbon Analysis, voltada prioritariamente para a avaliação de carbono. Essa mudança inviabilizou a continuidade do plano metodológico original e tornou necessária a reavaliação dos métodos de simulação adotados.

Entre as alternativas consideradas, avaliou-se a utilização do ClimateStudio, software desenvolvido pela Solemma, que permite a exportação de modelos do Revit para análises ambientais. Embora tenha se mostrado eficiente para estudos de iluminação natural e radiação solar, apresentou limitações para simulações energéticas completas no contexto desta pesquisa, uma vez que os fluxos de trabalho recomendados demandam a modelagem direta no Rhinoceros para maior fidelidade dos resultados. Dessa forma, apesar de sua relevância para outras abordagens de desempenho ambiental, o ClimateStudio não se mostrou adequado para a análise termoenergética detalhada proposta neste estudo.

Após a análise de alternativas viáveis e tecnicamente compatíveis com os objetivos da pesquisa, optou-se pela utilização do EnergyPlus. Sua adoção possibilitou maior flexibilidade e personalização dos parâmetros físicos e ambientais, garantindo maior precisão nas análises. Essa transição exigiu a reestruturação do modelo geométrico e a adaptação de estratégias inicialmente previstas.

Importante ressaltar que as discussões contidas no capítulo de revisão bibliográfica sobre a integração entre BIM e análise de desempenho térmico permanecem pertinentes. Elas fundamentam a proposta metodológica inicial, servindo como referência para pesquisas futuras, inclusive para uma possível integração mais robusta entre modelagem informacional e simulação energética, quando soluções mais estáveis estiverem disponíveis.

A mudança metodológica, portanto, não compromete os objetivos da pesquisa, mas, ao contrário, refina seu foco e amplia a profundidade técnica da análise, permitindo maior controle sobre os parâmetros de entrada e uma avaliação mais criteriosa dos cenários propostos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir das simulações termoenergéticas realizadas para o edifício educacional estudado, com base na comparação do desempenho térmico em dois dias representativos: o dia mais quente do ano e um dia típico de inverno.

Embora a Portaria nº 309, de 22 de junho de 2022, do Ministério de Minas e Energia (MME), recomende a realização da análise para o dia típico de verão, os dados climáticos de Catalão-GO indicaram que a maior temperatura do ano é registrada no mês de outubro. Com base nisso, foi selecionado o dia 29/10, por apresentar os picos térmicos mais elevados ao longo do ano simulado. Para o período de inverno, seguiu-se a recomendação da INI-C, tendo sido identificado, no ano de referência, o dia 10/06 como aquele com as menores temperaturas, razão pela qual foi adotado como representativo da estação.

As análises foram conduzidas com foco na comparação das temperaturas operativas obtidas nos quatro cenários simulados: modelo base (configuração original), modelo EPS, fachada com vegetação e uso de segunda pele ventilada. Inicialmente, são discutidos os resultados térmicos das salas 108, 205 e 301, evidenciando as variações de desempenho entre as estratégias. Em seguida, são apresentados os impactos sobre o consumo energético do sistema de climatização (HVAC) e a estimativa de geração mensal de energia elétrica a partir dos painéis fotovoltaicos propostos.

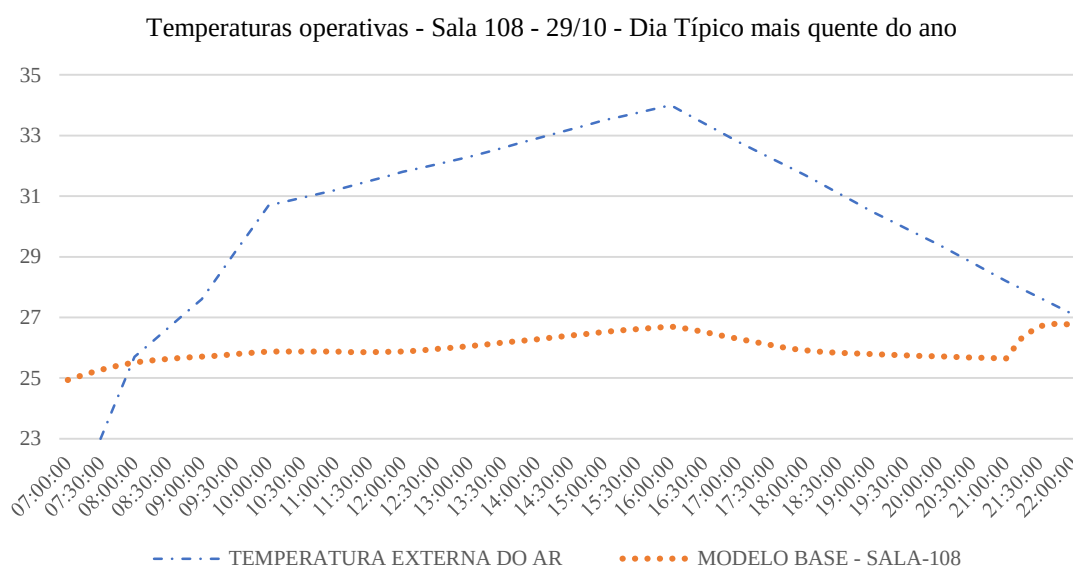
As recomendações de aplicação das estratégias passivas são discutidas à luz do conforto térmico e da eficiência energética, visando indicar a solução mais vantajosa para o edifício analisado. Por fim, são apresentadas considerações críticas que relacionam os resultados às características climáticas e construtivas locais, seguidas de uma síntese com as principais conclusões.

4.1 Dia típico mais quente do ano

As simulações térmicas realizadas para o dia típico mais quente do ano (29/10), considerando o uso de sistema de climatização HVAC e ventilação natural, revelaram que mesmo com controle ativo da temperatura interna, as características construtivas e a orientação solar das salas analisadas impactam no comportamento térmico, especialmente quanto à eficiência das estratégias passivas associadas.

Na sala 108, voltada para a fachada nordeste, o modelo base apresenta a temperatura operativa média de 25,99 °C, mantendo-se praticamente inalterada no modelo EPS, cuja variação foi de apenas +0,2 °C. Durante o horário de pico térmico, a temperatura interna alcançou 26,70 °C, valor considerado dentro da faixa de conforto térmico. Além disso, observou-se um comportamento térmico mais estável ao longo do dia, com menores amplitudes, o que evidencia um desempenho naturalmente mais favorável, em função de sua orientação solar (Figura 32).

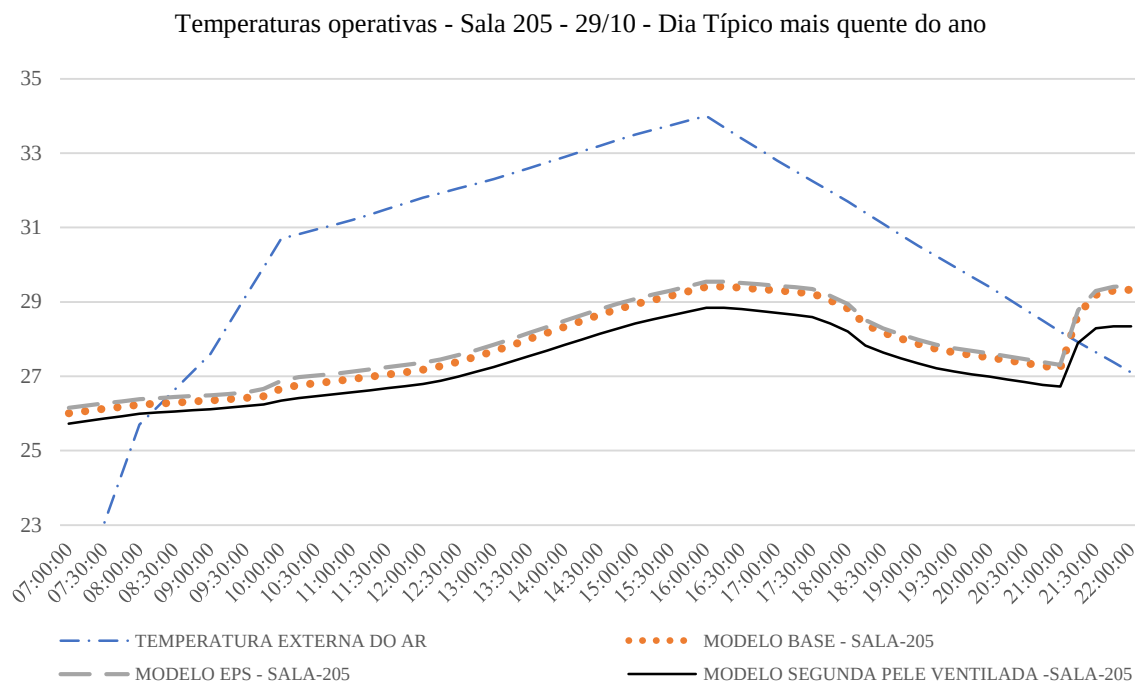
Figura 32 - Gráfico das Temperaturas operativas da Sala 108, no dia mais quente do ano simulado (29/10).



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

A sala 205, situada no pavimento intermediário e também orientada para o poente, apresentou comportamento térmico semelhante ao da sala 301, embora com temperaturas operativas ligeiramente inferiores. As médias registradas foram de 27,67 °C no modelo base, 27,82 °C nos modelos com EPS e fachada vegetada, e 27,24 °C no modelo com segunda pele ventilada. A diferença de temperatura entre o modelo base e o cenário com EPS foi de apenas 0,13 °C às 16h (Figura 33), indicando baixa efetividade dessa estratégia isoladamente para esse ambiente específico.

Figura 33 - Gráfico das Temperaturas operativas da Sala 205, no dia mais quente do ano simulado (29/10).

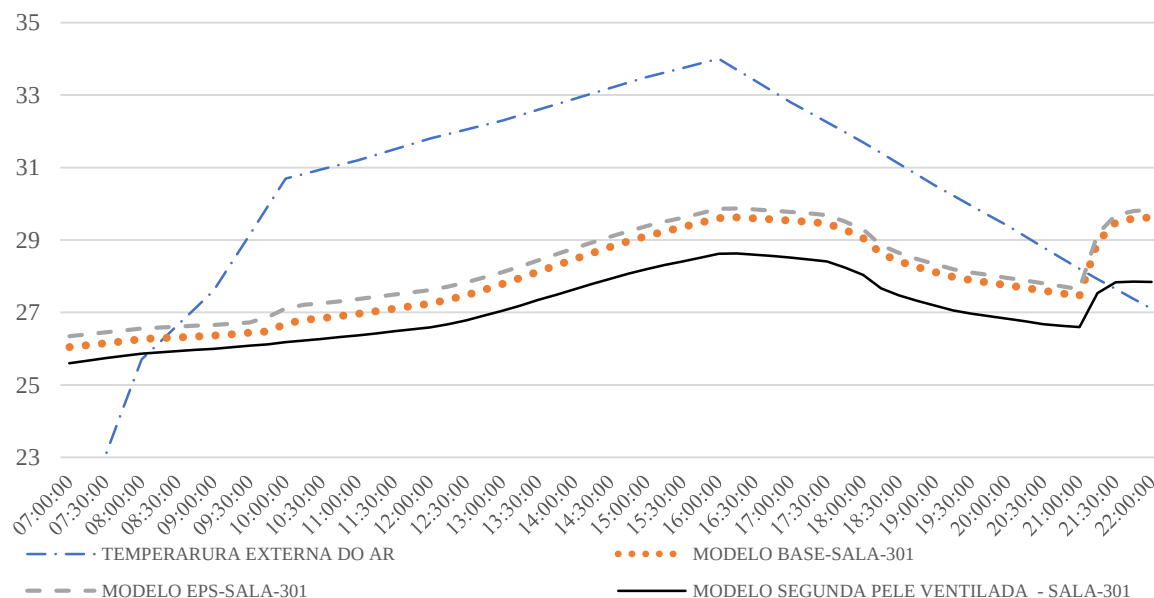


Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Por outro lado, a sala 301 apresentou no modelo base, uma temperatura operativa média de 27,81 °C. Nos modelos com aplicação de EPS e de vegetação na fachada, as médias foram de 28,10 °C e 28,12 °C, respectivamente, evidenciando um aumento nas temperaturas internas, em relação ao modelo base. Observa-se que ambos os cenários apresentaram comportamento térmico semelhante, o que pode ser atribuído à limitação do EnergyPlus em simular os efeitos de umidade e evapotranspiração associados à vegetação. Essa limitação compromete a avaliação da eficiência do resfriamento evaporativo promovido pelas plantas.

Em contraste, o modelo com aplicação da segunda pele ventilada obteve os melhores resultados. Essa estratégia permitiu uma redução de temperatura de até 0,99 °C às 16h, em relação ao modelo base (Figura 34), além de apresentar uma temperatura operativa média de 27,06 °C, demonstrando maior eficácia na mitigação dos ganhos térmicos incidentes na fachada poente.

Figura 34 - Gráfico das Temperaturas operativas da Sala 301, no dia mais quente do ano simulado (29/10).
Temperaturas operativas - Sala 301 - 29/10 - Dia Típico mais quente do ano



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Nota-se um aumento atípico nas temperaturas internas dos ambientes entre 21h e 22h, associado à permanência das cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos) até o encerramento do horário de uso. Como a simulação considerou o funcionamento da edificação até às 22h, essas fontes de calor permaneceram ativas nesse intervalo, enquanto a ventilação natural reduziu significativamente, sobretudo na fachada sudoeste, conforme indicam os dados climáticos de Catalão-GO.

Além disso, a inércia térmica dos materiais contribui para a retenção do calor acumulado ao longo do dia, que é liberado gradualmente no período noturno. Esse comportamento é intensificado pela baixa renovação de ar, característica comum em edificações com uso prolongado e ventilação cruzada limitada. No entanto, o pico abrupto registrado entre 21h e 22h (e aumento de 1,48 °C entre 21h e 21h15 no modelo base), sugere possíveis instabilidades numéricas ou limitações no modelo computacional. De acordo com Kim *et al.* (2020), transições bruscas em condições de contorno, como a ativação ou desativação de sistemas, podem gerar desvios significativos nos resultados simulados.

Os dados consolidados de temperatura média, máxima e mínima das salas 108, 205 e 301, para os diferentes cenários avaliados, estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resumo de comparação das médias de temperaturas das estratégias simuladas, em 29/10, dia típico mais quente.

Sala	Cenário	Temp. Média (°C)	Máxima (°C)	Mínima (°C)	Δ temperatura máxima em relação ao modelo base
301	Modelo Base	27,81	29,62	26,04	-
	Modelo EPS	28,10	29,87	26,34	0,25
	Modelo Parede Vegetada	28,12	29,90	26,34	0,28
	Modelo Segunda Pele Ventilada	27,06	28,63	25,59	-1,00
108*	Modelo Base	25,99	26,70	24,94	-
	Modelo EPS	26,01	26,72	24,97	0,02
205	Modelo Base	27,67	29,42	26,01	-
	Modelo EPS	27,82	29,55	26,15	0,13
	Modelo Parede Vegetada	27,83	29,55	26,16	0,13
	Modelo Segunda Pele Ventilada	27,24	28,84	25,73	-0,57

Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

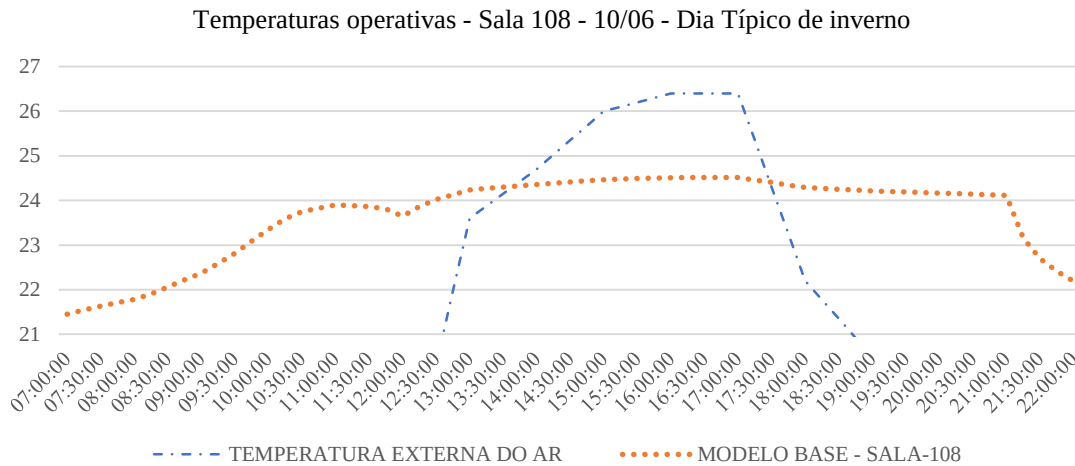
* Os modelos parede vegetada e segunda pele ventilada não foram aplicadas na sala 108.

4.2 Dia típico de inverno

A simulação realizada para o dia típico de inverno (10 de junho), considerando o funcionamento do sistema de climatização (HVAC), revelou diferenças sutis entre os cenários avaliados, o que evidencia a eficácia relativa das estratégias passivas quando associadas ao controle térmico ativo.

A sala 108, por apresentar menor exposição à radiação solar direta, registrou as menores temperaturas operativas médias entre as três salas analisadas. No modelo base, a temperatura variou de 21,45 °C (mínima) a 24,52 °C (máxima), mantendo-se dentro da faixa de conforto térmico. O modelo com aplicação de EPS apresentou comportamento térmico semelhante, com pequenas variações de +0,07 °C na mínima e +0,11 °C na máxima. Em ambos os casos, observou-se um perfil térmico estável ao longo do dia, sem oscilações abruptas de temperatura (Figura 35).

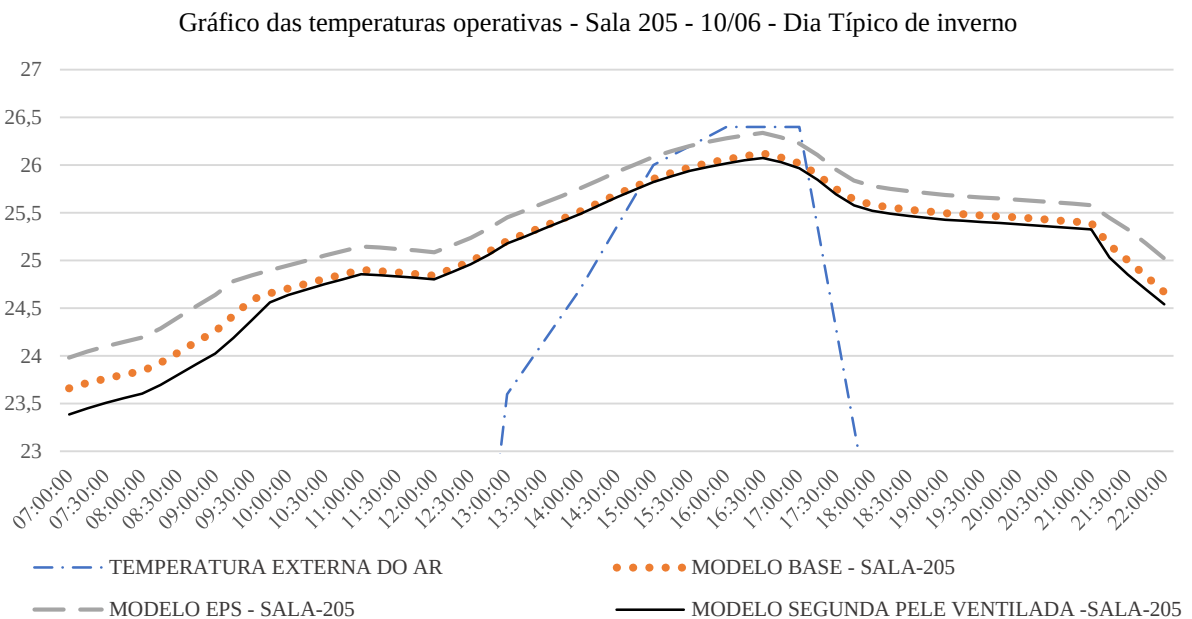
Figura 35 - Gráfico das Temperaturas operativas da Sala 108, no dia típico de inverno (10/06).



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Na sala 205, os resultados também indicaram um desempenho térmico adequado em todos os cenários simulados. O modelo base apresentou temperatura máxima de 26,12 °C e mínima de 23,66 °C. O modelo EPS registrou o maior pico térmico, com máxima de 26,34 °C. Já o modelo com aplicação da segunda pele ventilada apresentou a menor média operativa entre os cenários, de 25,07 °C, e temperatura máxima de 26,08 °C. De modo geral, os valores médios permaneceram próximos, pequenas variações entre os modelos, indicando estabilidade térmica e desempenho satisfatório para o ambiente avaliado (Figura 36).

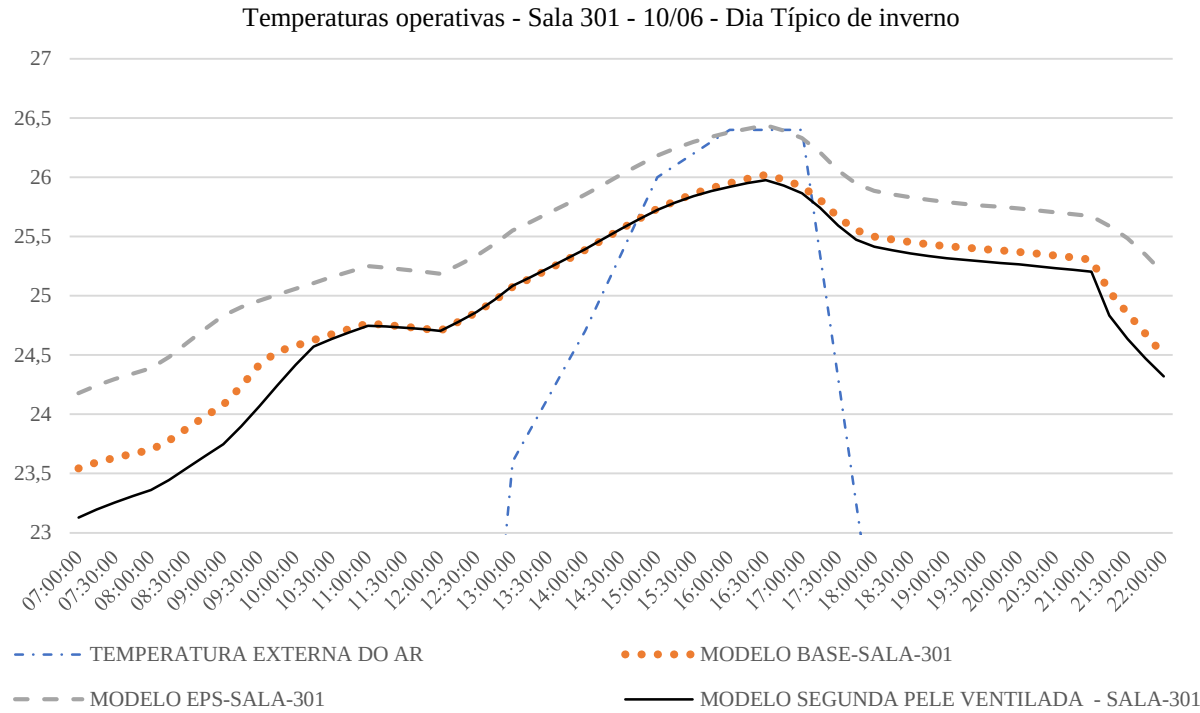
Figura 36 - Gráfico das Temperaturas operativas da Sala 205, no dia típico de inverno (10/06).



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Na sala 301, os cenários com aplicação de parede vegetada e EPS apresentaram as maiores temperaturas operativas médias, de 25,57 °C e 25,52 °C, respectivamente. O modelo base registrou média de 25,04 °C, enquanto o modelo com segunda pele ventilada apresentou uma média operativa de 24,93 °C. Observa-se que todos os cenários simulados permanecem dentro da faixa de conforto térmico, conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37 - Gráfico das Temperaturas operativas da Sala 301, no típico de inverno (29/10).



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Os dados consolidados de temperatura média, máxima e mínima para as salas 108, 205 e 301, nos diferentes cenários, encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Resumo de comparação das médias de temperaturas das estratégias simuladas, em 10/06, dia típico de inverno.

Sala	Cenário	Temp. Média (°C)	Máxima (°C)	Mínima (°C)	Δ temperatura máxima em relação ao modelo base
301	Modelo Base	25,04	26,02	23,54	-
	Modelo EPS	25,52	26,44	24,18	0,42
	Modelo Paredes Vegetadas	25,57	26,48	24,34	0,46
	Modelo Segunda Pele Ventilada	24,93	25,97	23,13	-0,05
108*	Modelo Base	23,68	24,52	21,45	-
	Modelo EPS	23,78	24,61	21,51	0,10

205	Modelo Base	25,16	26,12	23,66	-
	Modelo EPS	25,40	26,34	23,98	0,21
	Modelo Parede Vegetada	25,42	26,35	24,07	0,22
	Modelo Segunda Pele Ventilada	25,07	26,08	23,39	-0,05

Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

* Os modelos parede vegetada e segunda pele ventilada não foram aplicadas na sala 108.

4.3 Comparação entre o desempenho térmico do Modelo Base e Modelo EPS

A partir dos resultados obtidos nas simulações, observa-se que o modelo com núcleo em EPS apresentou temperaturas internas mais elevadas em comparação ao modelo base. Esse comportamento está relacionado à sua baixa capacidade térmica ($103,9 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$) em contraste com a do tijolo cerâmico ($152 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$). Embora o EPS (Poliestireno Expandido) seja amplamente reconhecido como um excelente isolante térmico, devido à sua estrutura celular fechada que aprisiona ar em seu interior e reduz a condutividade térmica, sua baixa massa térmica limita a capacidade de absorver e armazenar calor. Dessa forma, em ambientes com elevada carga interna, tendem a aquecer mais rapidamente e apresentar maior amplitude térmica ao longo do dia. Já o tijolo cerâmico empregado no modelo base, por possuir maior capacidade térmica, contribui para o amortecimento dos picos de calor e promove maior estabilidade térmica, conforme discutido por Givoni (1992).

Ambientes educacionais caracterizam-se por elevada densidade de ocupação, iluminação artificial constante e uso de equipamentos eletrônicos, o que gera uma carga térmica interna considerável. Nesses contextos, a distinção entre isolamento térmico e inércia térmica torna-se essencial: enquanto o isolamento busca reduzir a transferência de calor entre o interior e o exterior, a inércia térmica está ligada à capacidade de armazenar e liberar gradualmente o calor absorvido. O EPS se mostra eficaz como isolante, mas sua baixa inércia térmica se revela desfavorável, pois o material não consegue absorver ou dissipar de forma eficiente o calor acumulado. Como reforça Givoni (1992), materiais com maior massa térmica são fundamentais para equilibrar o balanço térmico em edifícios com alta carga interna.

Além disso, o comportamento do atraso térmico do EPS também é um fator relevante. Embora o material apresente um atraso de aproximadamente 6,8 horas para a transmissão de calor, essa característica, em ambientes internos quentes e pouco ventilados, pode intensificar o acúmulo de calor no interior, especialmente quando não há ventilação noturna eficiente para dissipá-lo. Já o tijolo cerâmico, com atraso térmico de 3,3 horas, permite maior trocabilidade

térmica com o meio externo, favorecendo a liberação do calor durante as fases mais frescas do dia.

A escolha dos materiais da envoltória deve considerar não apenas suas propriedades isolantes, mas também sua capacidade térmica e resposta dinâmica ao longo do ciclo diário, principalmente em edifícios operando sob elevada carga interna (GUÍZAR DENA et al., 2024). Ainda segundo os autores, simulações energéticas conduzidas com materiais de baixa massa térmica revelaram comportamento instável quando expostos a variações rápidas na carga térmica e nas condições climáticas.

Os resultados obtidos nesta pesquisa reforçam essa premissa: nas salas localizadas no último andar e com fachadas voltadas para o poente, o modelo com EPS apresentou diferenças de temperatura superiores a 2 °C em relação ao modelo base, evidenciando um desempenho térmico inferior nessas condições. Por outro lado, em salas térreas e voltadas para o nordeste, com menor exposição solar, o desempenho do modelo com EPS aproximou-se do observado no modelo base, sugerindo que o uso do material pode ser viável quando aplicado estrategicamente em fachadas com menor carga térmica externa.

Portanto, conclui-se que a adoção do EPS como solução isolante em edificações escolares não garante, por si só, melhores condições de conforto térmico. O desempenho deve ser analisado de forma integrada, considerando orientação solar, ventilação natural, carga térmica interna e, principalmente, as propriedades dinâmicas dos materiais. A combinação entre isolamento térmico e estratégias passivas de resfriamento, como o uso de massa térmica, ventilação noturna e sombreamento eficiente, mostra-se fundamental para alcançar melhores resultados.

4.4 Comparação entre o desempenho térmico do Modelo Base e Modelo Parede Vegetada

A estratégia de cobertura vegetal aplicada diretamente sobre a alvenaria, adaptada do modelo proposto por Yoshimi e Altan (2011), revelou-se pouco eficiente do ponto de vista térmico no contexto desta pesquisa. A vegetação atuou como uma camada passiva de baixa condutividade térmica, retardando a dissipação do calor acumulado na alvenaria e favorecendo o aprisionamento de calor na superfície externa da parede, especialmente em períodos de maior carga térmica interna. Esse comportamento foi semelhante ao observado por Wong *et al.* (2010) e Pérez *et al.* (2011), que destacam a importância de considerar os mecanismos ativos, como

sombreamento dinâmico e evapotranspiração, para que a vegetação exerça um efeito positivo no desempenho térmico.

Para obtenção de resultados mais precisos, seria necessário estimar a troca de umidade entre a vegetação e a alvenaria. No entanto, o EnergyPlus, por padrão, não simula processos como resfriamento evaporativo ou a dinâmica da umidade nos materiais. Para isso, é necessário ativar o módulo específico *Heat And Moisture Transfer*¹⁰(HAMT), que não é habilitado automaticamente no software. Esse módulo permite considerar os efeitos acoplados de calor e umidade nos elementos da envoltória, mas exige dados higrotérmicos consolidados, como difusividade de umidade, capacidade de retenção e curvas de equilíbrio higroscópico, informações que, no caso de materiais vegetais, ainda são escassas na literatura.

As simulações realizadas nesta etapa consideraram a vegetação como uma camada passiva, sem variação higrotérmica. Dessa forma, os efeitos benéficos esperados foram, na prática, neutralizados, e o desempenho térmico do modelo com vegetação apresentou resultados inferiores ao do modelo base. Essa constatação diverge de parte da literatura que associa fachadas vegetadas à melhoria do conforto térmico (SCHERER *et al.*, 2020; YOSHIMI; ALTAN, 2011).

Adicionalmente, estudos recentes demonstram que o uso ou não do módulo HAMT pode gerar variações nos resultados. Segundo Zhang *et al.* (2023), ao simular o desempenho térmico de uma edificação residencial em região quente e úmida, a omissão do HAMT levou a uma superestimação de até 1,2 °C na temperatura operativa no verão e subestimação de 1,7 °C no inverno, além de erros na previsão do consumo energético, com subestimativas de até 12,4% na demanda por desumidificação. Esses dados reforçam a importância do módulo HAMT para contextos onde a umidade tem papel relevante, e ao mesmo tempo justificam a cautela em sua aplicação quando os insumos técnicos necessários não estão disponíveis (ZHANG *et al.*, 2023).

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se a aplicação do módulo HAMT em conjunto com dados específicos e validados para espécies vegetais, de forma a avaliar com maior profundidade o potencial das fachadas verdes enquanto estratégia bioclimática.

Assim, conclui-se que, no contexto deste estudo, o modelo simplificado utilizado, embora validado em abordagens reconhecidas, não promoveu benefícios térmicos relevantes. Ao contrário, essa estratégia comprometeu a dissipação de calor da envoltória. Essa evidência indica que sua adoção deve ser cautelosa em edificações com alta carga térmica interna, baixa ventilação cruzada e ocupação intensa, como salas de aula.

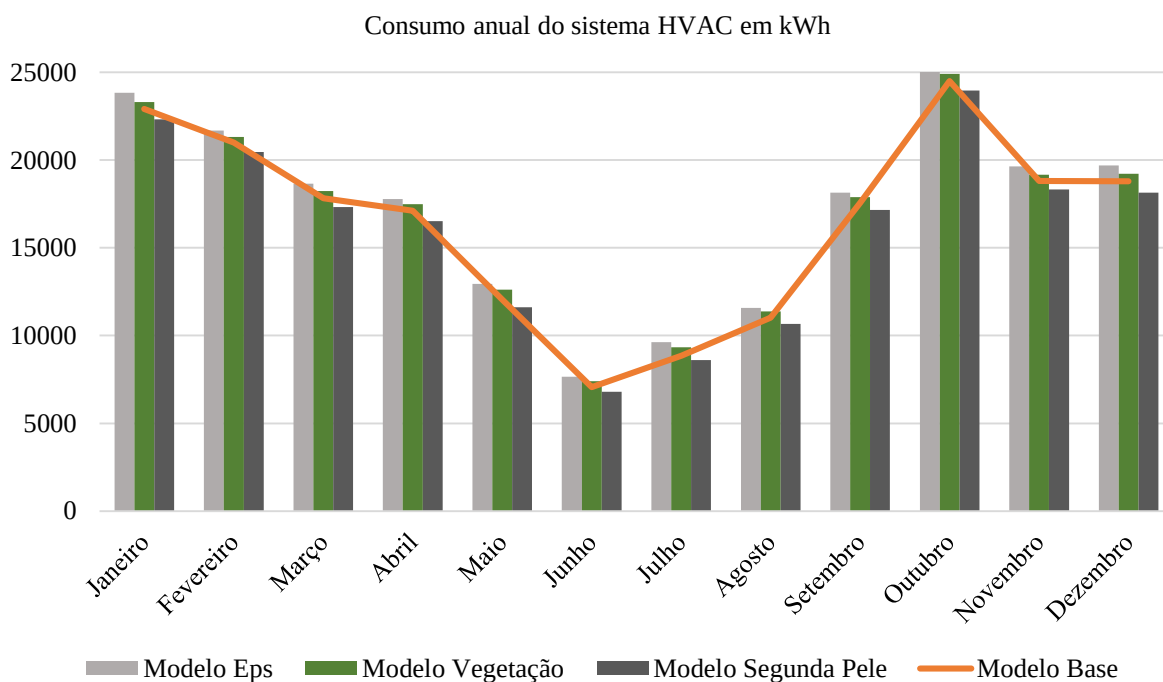
¹⁰ Transferência de calor e umidade

4.5 Consumo de energia elétrica

O consumo de energia elétrica no sistema HVAC está diretamente relacionado às condições climáticas locais, especialmente em regiões de clima tropical, como Catalão. Embora outubro apresente o maior consumo anual, janeiro se destaca por valores próximos, o que demanda uma análise detalhada das variáveis envolvidas (Figura 38).

Janeiro é um mês típico de verão, caracterizado por dias mais longos e elevados níveis de irradiação solar. Segundo o INMET (2023), a região de Goiás apresenta, nesse período, alta incidência de radiação ultravioleta (UV) e infravermelha (IV), o que intensifica a carga térmica interna nas edificações. A exposição solar intensa aumenta significativamente o ganho de calor por meio das envoltórias (paredes, coberturas e aberturas), exigindo maior desempenho dos sistemas de climatização.

Figura 38 - Gráfico do consumo mensal do sistema HVAC de cada cenário simulado.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Dados históricos do INMET indicam que o mês de janeiro em Catalão apresenta temperaturas médias externas superiores a 28 °C e umidade relativa do ar frequentemente acima de 70%. Essa combinação de calor e umidade impõe uma carga térmica composta por parcelas sensível e latente, o que compromete a eficiência da troca térmica dos sistemas HVAC. Nesses

casos, o ar-condicionado necessita não apenas resfriar o ambiente, mas também realizar a desumidificação do ar, elevando o consumo energético (ASHRAE, 2022).

Embora o mês de outubro tenha apresentado o maior consumo anual nas simulações, esse comportamento está relacionado ao fim do período seco e ao retorno gradual da umidade relativa, combinados a temperaturas ainda elevadas da primavera. Já em janeiro, a combinação de radiação solar intensa, temperaturas externas máximas e alta umidade relativa justifica um consumo energético quase tão elevado quanto o de outubro, mesmo que ligeiramente inferior.

Constatou-se que em relação ao modelo base, houve um aumento de 4,56% e 2,41% no consumo de energia elétrica do sistema HVAC dos cenários simulados para os modelos EPS e parede vegetada, respectivamente. Já para o modelo segunda pele ventilada, houve uma redução de 2,84%. O resumo do consumo mensal de cada cenário está descrito na Tabela 11.

Tabela 11 - Resumo do consumo mensal do sistema HVAC de cada cenário simulado.

Consumo mensal em kWh do sistema HVAC				
Meses	Modelo Base	Modelo Eps	Modelo Vegetação	Modelo Segunda Pele
Janeiro	22926	23835	23315	22317
Fevereiro	21007	21695	21329	20456
Março	17833	18665	18246	17330
Abril	17117	17790	17485	16522
Mai	12040	12946	12615	11622
Junho	7062	7651	7397	6804
Julho	8858	9623	9338	8599
Agosto	11013	11587	11373	10661
Setembro	17567	18144	17890	17164
Outubro	24507	25267	24918	23975
Novembro	18808	19636	19167	18327
Dezembro	18800	19701	19217	18150
Total	197538	206540	202290	191927

Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

4.6 Estimativa de Geração de Energia dos Painéis Fotovoltaicos

A estimativa de geração de energia elétrica foi realizada com base nos dados técnicos fornecidos pela empresa Solarix, responsável pela especificação do sistema fotovoltaico adotado. O modelo selecionado apresenta uma potência de pico de 135 Wp/m².

De acordo com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB, 2017), a irradiância solar média diária na região de Goiás é superior a 5,5 kWh/m²·dia. Considerando-se um rendimento global do sistema de 85%, que abrange

perdas por temperatura, sujeira, sombreamento, eficiência do inversor e outros fatores operacionais, foi possível estimar a produção mensal de energia com base na área útil instalada.

Na Tabela 12 está apresentada a projeção da geração de energia elétrica em um período de 30 dias, considerando o total de placas previsto no projeto.

Tabela 12 - Estimativa da geração de energia em kWh, para 30 dias.

Placas solares					
Especificação	Quantidade	Área Unitária por placa	Área total das placas m ²	Potência WP/ m ²	kWh 30 dias
Cor Mono Musgo	918	0,49	450	135	8.516,78

Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

A geração anual estimada do sistema fotovoltaico (102.201,36 kWh) representa aproximadamente 53,25% do consumo total da edificação no cenário com a aplicação da segunda pele ventilada (191.927 kWh/ano). Observa-se que, embora o sistema fotovoltaico não seja capaz de suprir integralmente o consumo elétrico anual da edificação, em alguns meses o equilíbrio entre geração e demanda se mostra favorável. Nos meses de menor consumo, a produção mensal estimada de 8.516,78 kWh é suficiente para atender plenamente à demanda de junho e quase totalizar o consumo de julho, reduzindo a necessidade de energia proveniente da rede elétrica.

Ressalta-se que a finalidade da implantação do sistema fotovoltaico não é suprir integralmente a demanda energética, mas compensar parte do consumo e mitigar o impacto das cargas térmicas, podendo inclusive neutralizar o acréscimo gerado pelo uso do sistema de climatização. Essa integração entre estratégias passivas e ativas demonstra a eficácia do conceito de soluções híbridas, nas quais o desempenho térmico da segunda pele ventilada é potencializado pela geração de energia a partir de fontes renováveis.

De forma mais ampla, os resultados obtidos nesta pesquisa sugerem que a combinação entre massa térmica, ventilação de fachada e geração fotovoltaica integrada representa um caminho promissor para a eficiência energética de edificações localizadas em climas quentes e secos, podendo ser aplicada em projetos educacionais, institucionais e de uso público com tipologias construtivas semelhantes. Essa abordagem contribui para a redução da demanda elétrica, melhoria do conforto térmico e avanço em direção a edificações mais sustentáveis.

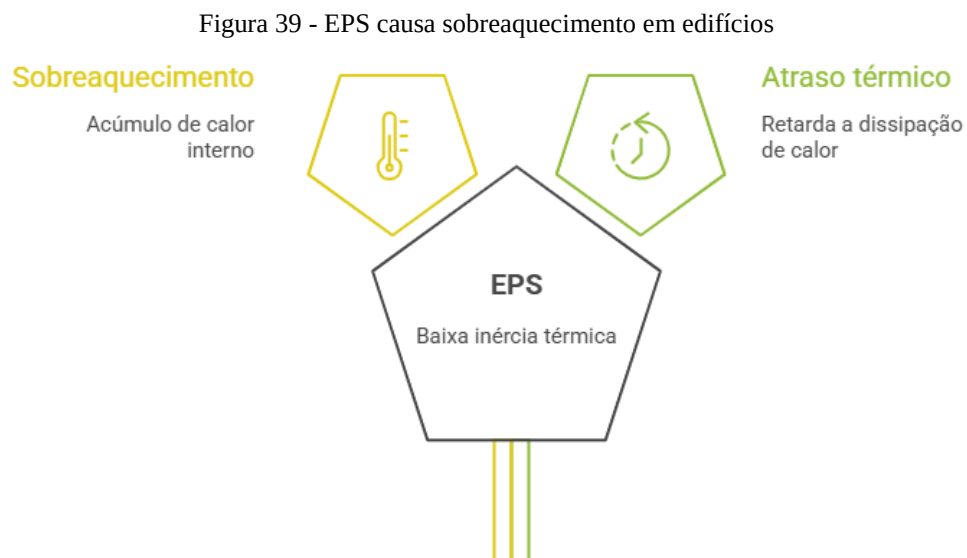
4.7 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos nas simulações termoenergéticas permitem uma análise crítica sobre o desempenho dos cenários, considerando o comportamento térmico dos dois períodos representativos, e o impacto dessas soluções na demanda energética da edificação.

4.7.1 Desempenho comparativo das estratégias passivas

Durante o período mais quente do ano, observou-se que as estratégias de aplicação de EPS e vegetação na fachada não proporcionaram melhoria significativa no desempenho térmico em relação ao modelo base. O EPS contribuiu para o sobreaquecimento dos ambientes, sobretudo nas salas localizadas no último pavimento e voltadas para o poente. Além disso, o material apresentou longo atraso térmico, o que indica que a mesma resistência que dificulta a entrada do calor também retarda sua dissipação para o exterior. Em ambientes internos já aquecidos e com ventilação insuficiente, esse comportamento favorece o acúmulo de calor e compromete a estabilidade térmica, mesmo com a atuação do sistema de climatização (HVAC).

A Figura 39 ilustra graficamente o comportamento térmico observado nas simulações com o uso do EPS, destacando o efeito combinado de sobreaquecimento e atraso térmico resultante de sua baixa capacidade de armazenamento de calor.

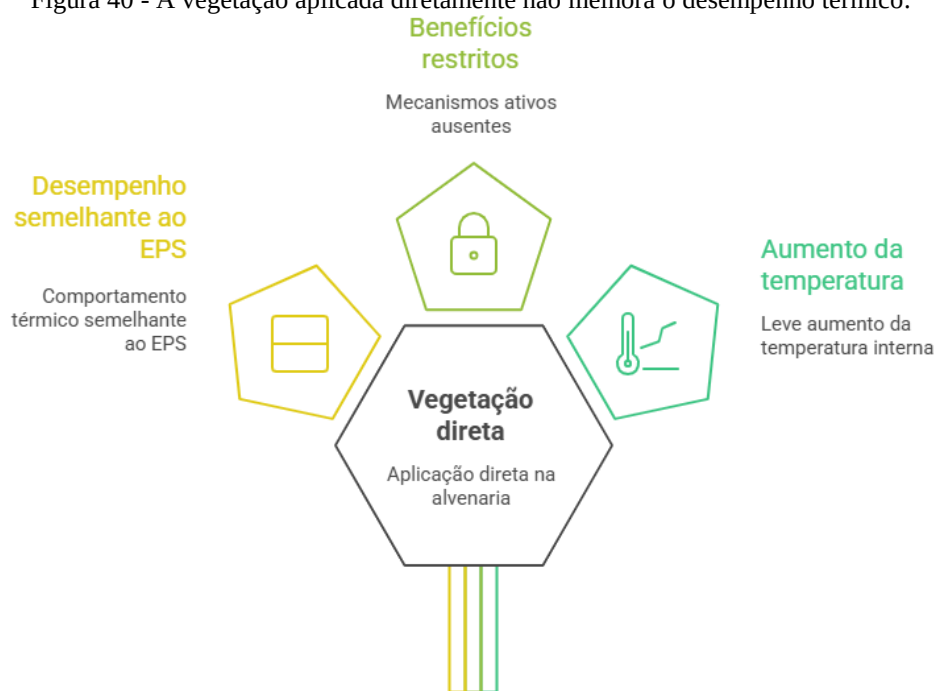


Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

A vegetação aplicada diretamente sobre a alvenaria também não apresentou desempenho satisfatório, apresentando comportamento térmico semelhante ao do EPS. A ausência de mecanismos ativos, evapotranspiração e resfriamento evaporativo, não contemplados no EnergyPlus sem a ativação do módulo HAMT, restringiu os benefícios potenciais dessa estratégia. Em consequência, o modelo vegetado chegou a apresentar leve aumento da temperatura interna, reforçando que essa solução requer modelagens mais avançadas e dados higrotérmicos específicos para uma avaliação mais precisa do seu real potencial.

A Figura 40 sintetiza os principais resultados referentes à estratégia de fachada vegetada, evidenciando seus benefícios restritos e o comportamento térmico semelhante ao observado no modelo com EPS.

Figura 40 - A vegetação aplicada diretamente não melhora o desempenho térmico.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Em contraste, a segunda pele ventilada apresentou os melhores resultados entre as estratégias analisadas, com redução de até 1 °C na temperatura operativa nas salas mais críticas e consumo energético 2,84% inferior ao do modelo base. A eficácia dessa solução está associada à ventilação natural promovida entre as camadas, que dissipa o calor acumulado e reduz a incidência solar direta sobre a fachada. A câmara de ar ventilada atua como colchão térmico, atenuando os picos de calor diurno e promovendo maior estabilidade térmica interna ao longo do dia.

A Figura 41 apresenta uma síntese visual dos benefícios da segunda pele ventilada, ressaltando a redução de temperatura, a economia de energia e a estabilidade térmica proporcionadas pela ventilação natural da fachada.

Figura 41 - A segunda pele ventilada melhora o desempenho do edifício.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Durante o período de inverno, os modelos com EPS e vegetação apresentaram temperaturas médias ligeiramente superiores às do modelo base, resultado da restrição às trocas térmicas com o ambiente externo, o que dificulta a dissipação do calor gerado internamente. Já o modelo com segunda pele ventilada apresentou comportamento térmico semelhante ao do modelo base, com pequenas variações, demonstrando que essa estratégia não compromete o conforto térmico em estações mais amenas. Por atuar também como barreira física, a segunda pele pode reduzir a ação dos ventos frios sobre a envoltória, oferecendo efeito neutro ou levemente protetor durante os períodos de menor temperatura.

De forma mais ampla, os resultados indicam que estratégias de sombreamento ventilado e fachadas duplas apresentam maior aplicabilidade em edificações de uso contínuo e alta carga interna, especialmente em regiões de clima quente e seco, onde a ventilação da envoltória desempenha papel essencial na dissipação do calor acumulado. Essa constatação está em consonância com estudos de Attia e Al-Hinky (2019) e Guízar Dena et al. (2024), que apontam a relevância das soluções híbridas passivo-ativas como alternativa eficaz para reduzir a carga térmica e o consumo energético em edificações localizadas em zonas de clima semelhante ao do estudo.

4.7.2 Tendências térmicas observadas nas salas simuladas

Ao longo das simulações, independentemente da estratégia de envoltória adotada, observou-se um padrão térmico recorrente nas salas analisadas: as temperaturas internas aumentam entre 7h e 16h, período coincidente com as horas de maior incidência solar direta, e reduzem gradualmente após esse intervalo, acompanhando o declínio da radiação incidente. Esse comportamento evidencia a forte correlação entre a variação da radiação solar e o aquecimento interno dos ambientes, especialmente em edificações com alta exposição de fachadas.

A Figura 42 apresenta uma síntese visual desse comportamento diário de variação térmica, evidenciando o aumento de temperatura durante o período de maior insolação e a subsequente redução após o pôr do sol.

Figura 42 - Compreendendo as mudanças de temperatura interna ao longo do dia.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

A posição da sala no edifício mostrou-se um fator determinante no comportamento térmico. As salas localizadas em pavimentos inferiores, mais próximas ao solo, apresentaram temperaturas operativas médias mais baixas, possivelmente em razão do efeito de resfriamento proporcionado pela inércia térmica do solo e da menor exposição à radiação solar direta. Por outro lado, as salas situadas nos pavimentos superiores, sujeitas à incidência solar acumulada sobre a cobertura e às fachadas mais expostas, apresentaram temperaturas internas mais elevadas, confirmando a influência da altura e da orientação solar na distribuição térmica vertical do edifício.

A Figura 43 ilustra graficamente essa relação entre altura e temperatura, demonstrando que salas mais elevadas sofrem maior aquecimento, enquanto as localizadas próximas ao solo tendem a apresentar temperaturas mais estáveis.

Figura 43 - Influência da altura e da exposição solar na temperatura interna.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

As três salas selecionadas para análise detalhada, representam adequadamente os diferentes pavimentos e orientações da edificação, permitindo compreender as tendências térmicas gerais. A sala 301, localizada no último pavimento e voltada para o poente, foi consistentemente a mais crítica, devido à alta incidência solar vespertina e à menor proteção da cobertura, resultando em picos térmicos pronunciados nas horas da tarde. A sala 108, situada no térreo e voltada para o nordeste, apresentou comportamento termicamente mais equilibrado, beneficiando-se da menor exposição direta nas horas de maior carga solar e da proximidade com o solo, que contribui para a atenuação das variações de temperatura. A sala 205, posicionada em um pavimento intermediário, exibiu valores térmicos intermediários, reafirmando a coerência das tendências observadas entre os diferentes níveis.

A Figura 44 apresenta uma síntese comparativa das três salas analisadas, destacando graficamente os diferentes comportamentos térmicos conforme a localização e orientação solar.

Figura 44 - Comportamento térmico das salas baseado na exposição solar e localização.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

Esses resultados destacam a importância de considerar orientação, altura e incidência solar desde as etapas iniciais de projeto arquitetônico. Estratégias passivas, como sombreamento adequado, ventilação natural cruzada e uso de materiais de maior inércia térmica, podem reduzir a amplitude térmica diária e melhorar o conforto dos ocupantes.

De forma mais ampla, a análise comparativa das salas simuladas reforça que o comportamento térmico vertical das edificações educacionais é fortemente condicionado por fatores de orientação e exposição solar, especialmente em climas quentes e secos. Assim, os padrões identificados neste estudo podem ser extrapolados para outras edificações de tipologia semelhante, oferecendo subsídios para o desenvolvimento de projetos mais eficientes e adaptados às condições climáticas regionais.

4.7.3 Recomendações de aplicação

Com base nos dados simulados, conclui-se que a segunda pele ventilada foi a estratégia passiva mais eficaz para o contexto estudado. Além da redução térmica efetiva, essa solução contribui para a economia de energia do sistema de climatização e melhora o conforto térmico interno mesmo em salas com alta exposição solar. Sua adoção é recomendada especialmente para fachadas voltadas para o oeste ou noroeste em zonas bioclimáticas similares, tanto em projetos novos quanto em retrofit de edificações.

A vegetação, embora esteticamente interessante, deve ser aplicada com cautela, preferencialmente associada a estratégias de ventilação natural e com parâmetros higrotérmicos

bem definidos para simulações precisas. Já o uso do EPS, apesar de reconhecido como excelente material isolante devido à sua baixa condutividade térmica, apresentou limitações quando aplicado de forma exclusiva sob condições de elevada carga interna, pois sua baixa capacidade térmica resultou em menor estabilidade térmica ao longo do dia. Dessa forma, sua aplicação pode ser mais eficaz quando combinada a estratégias que favoreçam a dissipação do calor acumulado.

A Figura 45 apresenta uma síntese visual da eficácia e aplicabilidade das estratégias passivas analisadas, destacando o desempenho relativo de cada solução e suas possibilidades de aplicação em diferentes contextos de projeto.

Figura 45 - Eficácia e aplicabilidade das estratégias passivas simuladas.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2025).

CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho térmico e energético de um edifício educacional localizado em Catalão-GO, por meio de simulações computacionais em quatro diferentes cenários de envoltória: modelo base (alvenaria cerâmica tradicional), aplicação de EPS, fachada com vegetação e segunda pele ventilada. As análises foram conduzidas a partir de dois dias representativos, um típico mais quente do ano e outro de inverno, permitindo verificar o comportamento térmico de salas em diferentes pavimentos e orientações sob condições climáticas extremas.

Os resultados demonstraram que, entre as estratégias analisadas, a segunda pele ventilada apresentou o melhor desempenho térmico e energético. No dia mais quente do ano simulado (29/10), a sala 301, localizada no último pavimento e voltada para o poente, apresentou redução de 0,99 °C na temperatura operativa às 16h, e média operativa 0,75 °C inferior ao longo do dia, em relação ao modelo base. Apesar de numericamente modestas, essas diferenças são significativas em ambientes escolares de alta densidade de ocupação, nos quais pequenas variações térmicas podem influenciar diretamente no conforto dos usuários.

Já os modelos com EPS e fachada vegetada não apresentaram ganhos de desempenho nas condições estudadas. O modelo com EPS, embora conte com propriedades isolantes, resultou em temperaturas internas mais elevadas, atribuídas à sua baixa inércia e capacidade térmica, e consequente tendência ao confinamento de calor em ambientes de ventilação limitada. Esse comportamento é corroborado por Terrados et al. (2015) e Attia e Al-Hinky (2019), que apontam desempenho insatisfatório de sistemas leves e isolantes em climas quentes e secos, especialmente em edificações com alta carga interna.

De forma semelhante, o modelo de fachada vegetada apresentou aumento de temperatura interna, resultado associado à ausência de simulação de fenômenos como evapotranspiração e resfriamento evaporativo no software utilizado. Esse ponto reforça a necessidade de estudos empíricos complementares e aperfeiçoamento dos modelos de simulação, a fim de representar com maior precisão o comportamento higrotérmico das superfícies vegetadas (PÉREZ et al., 2011; SCHMIDT et al., 2020).

No que se refere ao consumo de energia do sistema HVAC, os cenários com EPS e vegetação apresentaram aumento de 4,56% e 2,41%, respectivamente, em relação ao modelo base. Em contrapartida, o cenário com segunda pele ventilada proporcionou uma redução de 2,84% no consumo anual. Considerando o consumo total anual de 191.927 kWh para o modelo

mais eficiente, observa-se que a segunda pele contribui simultaneamente para o conforto térmico e a economia energética, reduzindo o esforço do sistema de climatização.

Complementarmente, foi estimada a geração de energia elétrica proveniente dos painéis fotovoltaicos integrados à segunda pele, com produção anual de 102.201,36 kWh, o equivalente a 53,25% do consumo total simulado da edificação. Tal resultado demonstra o potencial da integração entre estratégias passivas e ativas, reforçando o conceito de fachadas multifuncionais, amplamente discutido por autores como Guízar Dena et al. (2024) e Kolokotsa et al. (2013).

Com base nos resultados, conclui-se que a segunda pele ventilada é a estratégia tecnicamente mais eficiente entre as avaliadas, sendo especialmente recomendada para fachadas voltadas ao oeste em edificações localizadas em zonas bioclimáticas quentes e secas. Além de melhorar o conforto térmico interno, a solução contribui para reduzir a demanda energética e pode ser aplicada tanto em projetos novos quanto em retrofit de edificações existentes.

Os resultados obtidos também nos levam a inferir que edificações de tipologia e uso semelhantes, como escolas, universidades e escritórios públicos, em regiões de clima quente e seco podem apresentar comportamento térmico análogo, beneficiando-se de soluções que combinem ventilação de fachada, sombreamento e geração fotovoltaica integrada. Estudos realizados em contextos climáticos equivalentes, como em Juazeiro (BA), Teresina (PI) e Brasília (DF), também apontam reduções na temperatura operativa superiores a 1 °C em ambientes equipados com sombreamento ventilado e superfícies de alta refletância, o que reforça a validade da estratégia em diferentes localidades (SILVA et al., 2021; AMORIM et al., 2020).

Dessa forma, o presente estudo contribui não apenas para o entendimento do comportamento térmico de edificações escolares no contexto de Catalão-GO, mas também amplia o repertório técnico de soluções aplicáveis a edificações em climas de elevada temperatura e baixa umidade. Os resultados obtidos sugerem que, em regiões de características climáticas semelhantes na América Latina e no interior do Brasil, estruturas de fachada ventilada com materiais de alto desempenho e integração fotovoltaica podem representar uma alternativa promissora para a melhoria do conforto térmico e a eficiência energética.

Por fim, reforça-se que estratégias passivas devem ser analisadas de forma integrada, considerando orientação solar, carga térmica interna, ventilação natural e propriedades térmicas dos materiais. A presente pesquisa evidencia que a combinação equilibrada entre inércia

térmica, sombreamento e ventilação pode potencializar o desempenho de edificações em climas quentes e secos, contribuindo para o avanço de projetos arquitetônicos sustentáveis voltados ao conforto térmico e à eficiência energética no setor educacional e em outros tipos de edificações de uso coletivo.

REFERÊNCIAS

- ABANDA, F. H.; BYERS, L. Building information modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation risks and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 1046-1053, 2017.
- ADIANE BORGES, D.; ROSA PAIVA, E. C.; PANAZZOLO SARMENTO, A.; ALVES DE RESENDE, A. Análise de condições térmicas nos blocos didáticos da Universidade Federal De Goiás - Regional Catalão. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 11, n. 3, 2016. DOI: 10.5216/reec.v11i3.38144. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/38144>.
- AL HERR, Yousef et al. Thermal Comfort in Buildings: Scientometric Analysis and Systematic Review. **Journal of Architecture Engineering**, v. 29, n. 2, June 2023. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JAEIED.AEENG-1490>.
- ALVIM, L. G. Avaliação do desempenho e do conforto térmico de uma edificação ventilada naturalmente segundo as normas brasileiras de desempenho térmico e a ASHRAE 55. Dissertação de mestrado. Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- AMARA, F.; AGBOSSOU, K.; CARDENAS, A.; DUBÉ, Y. Comparison and simulation of building thermal models for effective energy management. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 6, n. 4, p. 1-8, 2015. Disponível em: https://www.scirp.org/html/5-6401384_56069.htm. Acesso em: 20 jul. 2024.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 140**: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. 2020.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 90.1**: —Energy Standard for Sites and Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. 2022.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 2017.
- ANDRÉ, M. E. I. Análise de eficiência energética de uma edificação residencial com o uso de ferramentas BIM. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
- ARAÚJO, Mayna Lais Tenório de. Avaliação de Desempenho Térmico em Creche do Programa Proinfância nas Zonas Bioclimáticas Brasileiras. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- ARCHDAILY. Escola Secundária Lycée Schorge / Kéré Architecture. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/886981/escola-secundaria-lycee-schorge-kere-architecture?ad_medium=gallery. Acesso em: 25 jul. 2024.
- ARENAS, F. N.; SHAFIQUE, M. Recent progress on BIM-based sustainable buildings: State of the art review. **Developments in the Built Environment**, v. 15, n. 100176, 2023. DOI: 10.1016/j.dibe.2023.100176
- ASDRUBALI, F.; MANZO, M.; GRAZIESCHI, G. Interoperability between BIM and building energy modelling – a case study. In: international building performance simulation association conference, 17., 2021, Bruges. **Proceedings of the 17th IBPSA Conference**. Bruges: IBPSA, 2021. p. 2063-2068. DOI: 10.26868/25222708.2021.30849
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO/CIE 8995-1:2013 – Iluminação de ambientes de trabalho – Parte 1: Interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASHRAE. **Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2014.

ASHRAE. Handbook - HVAC Systems and Equipment. EUA, 2022.

ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2021.

ATTIA, S.; AL-HINKY, H. Thermal behavior of lightweight insulated buildings in hot-dry climates: A critical review. **Building and Environment**, v. 148, p. 398-416, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.010>

Autodesk. (2024). "Guia do usuário do Insight 360". Autodesk, Inc.

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

BAAMER, A. S.; BRUTON, K.; O'SULLIVAN, D. A comparative analysis of energy simulation tools for architectural research: a case study of a typical house in Saudi Arabia. Cork: University College Cork, 2020.

BAKÓ-BIRÓ, Z., et al. (2012). Ventilation rates in schools and pupils' performance. **Building and Environment**, v. 48, p. 215-223, 2012.

BALO, F.; ULUTA, S, A. Energy-Performance Evaluation with Revit Analysis of Mathematical-Model- Based Optimal Insulation Thickness. **Buildings**, v. 13, n. 408, 2023.
<https://doi.org/10.3390/buildings13020408>

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Portaria nº 309, de 22 de junho de 2022. Estabelece critérios para avaliação de desempenho energético em edificações públicas. Brasília: MME, 2022.

BERNARDI, N.; KOWALTOWSKI, D. Conforto ambiental em edifícios escolares: Um estudo de caso de conscientização e participação dos usuários. **Environment and Behavior**, v. 38, n. 2, p. 155-172, 2006.

BEAZLEY, S.; HEFFERNAN, E.; MCCARTHY, T. J. Enhancing energy efficiency in residential buildings through the use of BIM: The case for embedding parameters during design. **Energy Procedia**, v. 121, p. 57-64, 2017.

BERNARDO, H. R.; GARCIA, G. R.; PAVÓN, E. C. Thermal comfort evaluation in energy-efficient building projects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 584-593, 2017.

BONOMOLO, M.; MAURO, G. M.; GAGLIANO, A.; NOCERA, F. A comprehensive review on building thermal simulation programs under uncertainty. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, 2021.

BRAGER, G.; De DEAR, R. J. Climate, comfort and natural ventilation: a new adaptive comfort standard for ASHRAE Standard 55. **Proceedings: Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century**. Oxford Brookes University, Windsor, UK 2001.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. PROJETEEE – Programa de Eficiência Energética em Edificações. Brasília: MME, 2024. Disponível em: <https://projeteee.mme.gov.br/>

BRIT, A. C. P. de; BRITO, C. M. B. de; BORTOLOTO, V. M.; SILVA, C. F.; AMORIM, C. N. D. O processo de projeto de edifício escolar: barreiras e perspectivas para o conforto e a

eficiência energética. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2019, Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2019. p. 2417-2426.

BURATTI, C.; RICCIARDI, P. (2009). Análise adaptativa do conforto térmico em salas de aula universitárias: Correlação entre dados experimentais e modelos matemáticos. **Building and Environment**, 44(4), 674-687.

BURKE, B.; KEELER, M. Fundamentos de edificações sustentáveis. Porto Alegre: Editora Bookman, 2010.

BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION CONFERENCE, 17., 2021, Bruges. Proceedings of the 17th IBPSA Conference. Bruges: IBPSA, 2021. p. 2063-2068. Disponível em: https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2021/papers/bs2021_30849.pdf.

BURKE, B.; KEELER, M. (2010). Fundamentos de edificações sustentáveis. Porto Alegre: Editora Bookman.

CARVALHO, R. S.; GASPAR, A. R.; QUINTELA, D. A. Comparison of different simulation methods for building energy performance analysis. **Energy and Buildings**, v. 215, p. 109898, 2022.

CASTALDO, V. L.; PISELLO, A. L. Uses of dynamic simulation to predict thermal-energy performance of buildings and districts: a review. Wiley Interdisciplinary Reviews: **Energy and Environment**, v. 7, n. 3, p. 1-20, 2018. Disponível em: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wene.269>

CICOZZI, F.; ROSSI, C.; LUCCHI, M. Multi-objective optimization of thermal performance in building design: Review and assessment of current approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 124735, 2021.

CLARKE, J. A. Energy Simulation in Building Design. 2nd ed. London: **Routledge**, 2001.

COELHO, A. de C.C. A utilização do BIM na análise da eficiência energética de edifícios: ferramentas e interoperabilidade. 2020. Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães, 2020.

COSTA, A.; KEANE, M. M.; TORRENS, J. I.; CORRY, E. Building operation and energy performance: Monitoring, analysis and optimisation toolkit. **Applied Energy**, v. 101, p. 310-316, 2013.

CRAWLEY, D. B.; HAND, J. W.; KUMMERT, M.; GRIFFITH, B. T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 661-673, 2008. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.10.027.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; WINKELMANN, F. C.; BUHL, W. F.; HUANG, Y. J.; PEDERSEN, C. O.; GLAZER, J. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 4, p. 319-331, 2001. DOI: 10.1016/S0378-7788(00)00114-6.

CRESSEB. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2. ed. revista e ampliada. Rio de Janeiro: CEPTEL, 2017

CUSTÓDIO, A. D.; GHISI, E.; RUPP, R. F.; BILÉSIMO, T. L. The influence of socioeconomic context on the thermal comfort of university students in a humid subtropical climate. **Energy and Buildings**. v. 319, 15 Sept. 2024, p. 114556. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114556>

DANTAS, A. L. de F. Análise da Eficiência Energética Preliminar dos Edifícios com Auxílio de Metodologias BIM. Dissertação (Mestrado em Projeto Integrado na Construção de Edifícios) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2022. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/144946/3/589670.1.pdf>>.

de DEAR, R.; BRAGER, G. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. **ASHRAE Transactions**, v. 104, n. 1, p. 145, 1998.

de WILDE, P.; TIAN, W. Identificação de fatores-chave para incerteza na previsão do desempenho térmico de um edifício de escritórios sob mudanças climáticas. **Building Simulation**, v. 2, p. 157-174, 2009. DOI: 10.1007/s12273-009-9116-1.

DHALLUIN, A.; LIMAM, K. (2014). Comparação de estratégias de ventilação natural e híbrida usadas em salas de aula em termos de qualidade ambiental interna, conforto e economia de energia. **Indoor and Built Environment**, v. 23, n. 6, p. 775-785, 2014.

DIAS, D. dos S.; PASSOS JUNIOR, F. E. dos; OLIVEIRA, D. C.; MACIEL, J. T. S.; OLIVEIRA, J. L. P.; FREITAS, L. T. de; SARMENTO, T. R. Conscientização para a sustentabilidade ambiental considerando o conforto ambiental e o uso de tecnologias BIM em escola pública (Cajazeiras – PB). **Revista Práxis: saberes da extensão**, João Pessoa, v. 10, n. 20, p. 66-83, jan./abr. 2022.

DUARTE, J. G. C. de L. M.; ZEMERO, B. R.; SOUZA, A. C. D. B. de; TOSTES, M. E. de L.; BEZERRA, U. H. Building Information Modeling approach to optimize energy efficiency in educational buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 102411, 2021. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102411.

DURDYEV, S.; DEHDASHT, G.; OHANDES, S. R.; EDWARDS, D. J. Review of the Building Information Modelling (BIM) Implementation in the Context of Building Energy Assessment. *Energies*, v. 14, n. 24, p. 8487, 2021; <https://doi.org/10.3390/en14248487>

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. 2ª Edição. **Hoboken: John Wiley & Sons Inc.**, 2011.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. (2021). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021. Brasília: EPE. Disponível em: : <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15265**: Energy performance of buildings – Calculation of energy needs for space heating and cooling using dynamic methods – General criteria and validation procedures. 2007.

FANGER, P. O. Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering. **Copenhagen: Danish Technical Press**, 1970.

FITRIANI, H.; RIFKI, M.; FORALISA, M.; MUHTAROM, A. Investigation of Energy Saving Using Building Information Modeling for Building Energy Performance in Office Building. **Civil Engineering and Architecture**, v. 10, n. 4, p. 1280-1292, 2022. DOI: 10.13189/cea.2022.100404.

FREITAS, L. F. de; OLIVEIRA, R. D.; LIMA, F. R. S. Análise das condições de conforto térmico dos usuários em ambientes naturalmente ventilados: simulação aplicada à edificação escolar pública. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2019, Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2019. p. 950-952.

GHAFFARIANHOSEINI, A.; BERARDI, U.; TOO, E.; HUNG, Y. R.; ARMEE, A. Building Information Modeling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 1046-1053, 2017.

GAN, G.; RIFFAT, S.; SHAO, L. Simulation of airflow and heat transfer in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 108, p. 1235-1248, 2019.

GIVONI, B. Man, Climate and Architecture. 2. ed. New York: **Van Nostrand Reinhold**, 1992.

GIVONI, B. Climate Considerations in Building and Urban Design. **Van Nostrand Reinhold**, 1998.

GOMES, L. D. Análise comparativa de etiquetas de eficiência energética de edificações residenciais modernas de Joinville-SC através da simulação computacional e método prescritivo. 2021. 151 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Programa de Pós-

graduação em Engenharia Civil, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2021

GONZÁLEZ, A.; SANGIOVANNI, A.; RIVAROLO, M.; GATTI, M.; GORINI, F.; TRAVERSO, A. A review on the integration of simulation tools for the analysis of indoor environmental quality in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 160, 2022.

GROAT, Linda; WANG, David. Architectural research methods. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. 480 p.

GU, N.; LONDON, K. Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. **Automation in Construction**, v. 19, n. 8, p. 988-999, 2010. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.09.002.

GUGLIELMETTI, R.; MACUMBER, D.; LONG, N. (2011). OpenStudio: An Open Source Integrated Analysis Platform; Preprint. Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association.

GUILHERME, L. L. F.; MACIEL, A. C. F. Integração BIM-BES para análise de eficiência energética: um estudo de caso em uma edificação escolar no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 29, n. 3, 2023. DOI: 10.47168/rbe.v29i3.811

GUIZAR DENA, A. J. et al. Optimization testing for the modeling and characterization of three-dimensional elements to enhance interoperability from BIM to BEM. **Energy & Buildings**, v. 317, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114394>

HENSCHER, L. S. Simulação do Desempenho Energético com Base na Metodologia BIM: Caso de Estudo do Edifício da ESSLei. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Leiria, 2018

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. Building Performance Simulation for Design and Operation. Taylor & Francis, 2019.

HOLANDA, A. Roteiro para construir no Nordeste. Universidade Federal de Pernambuco, 1978.

HOBBS, P. V. Introduction to Atmospheric Chemistry. Cambridge University Press, 2020.

HATTIE, J. Visible Learning: A Synthesis of Over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement. Routledge, 2009.

HIRSCH, J. J.; LBNL. eQuest: Quick Energy Simulation Tool. Retrieved from DOE2, 1999.

INMET. Normas Climatológicas do Brasil, 2023. Disponível em: www.inmet.gov.br.

INMETRO. Portaria nº 309, de 4 de junho de 2022. Aprova a Instrução Normativa para o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C). Brasília: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13790:2008**: Thermal performance of buildings — Calculation of energy use for space heating. Genebra, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7726**: Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 8996:2004** Ergonomics of the thermal environment — Determination of metabolic rate. International Organization for Standardization, 2004

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7730:2005** Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Organization for Standardization, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 7730:2005/Amd 1:2012. International Organization for Standardization, 2012

IOANNOU, A.; ITARD, L. C.M. Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy. **Energy and Buildings**, v. 92, p. 216-233, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.055>.

JAYAKEERTI, M.; NAKKEERAN, G.; ARAVINDH, MD et al. Prevendo a intensidade do uso de energia e o custo de edifícios residenciais com eficiência energética usando vários parâmetros: análise ANN. **Asian J Civ Eng** 24 , 3345–3361 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00717-y>

Jl, Y.; MENG, Q.; ZHANG, X.; WEI, J.; DING, J. The role of simulation in building energy conservation and comfort. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 151, 2022.

JOVEM PAN. Após 10 anos em negociação, prefeitura aprova projeto de restauro da fachada do Edifício Copan. São Paulo: Jovem Pan, 2022. Disponível em: <https://jovempan.com.br/programas/jornal-da-manha/apos-10-anos-em-negociacao-prefeitura-aprova-projeto-de-restauro-da-fachada-do-edificio-copan.html>

KAMARUDIN, S. A.; USMAN, F.; ROSLAN, R.; SAN, H. W. Evaluation of Energy Consumption by using Building Information Modelling (BIM). **International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)**, v. 9, n. 1, p. 3531-3534, out. 2019. ISSN 2249-8958. DOI: 10.35940/ijeat.A2681.109119.

KATAFYGIOTOU, MC; SERGHIDES, DK. Conforto térmico de um edifício escolar secundário típico em Chipre. **Sustainable Cities and Society**, v. 13, p. 303-312, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670714000250>

KIM, Seungjae; KIM, Hyunsoo; PARK, Cheol-Soo. Impact of Time-Step Size on the Accuracy of Building Energy Simulation. **Building Simulation**, v. 13, p. 725-737, 2020. DOI: 10.1007/s12273-020-0617-2.

KNOW, S.; CHUN, C. Thermal comfort: critical values for education facilities in different climates. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 10, p. 1063-1075, 2003.

KWOK, A.G; CHUN, C. Thermal comfort in Japanese schools. **Solar Energy**, v. 74, n. 3, p. 245-252, 2003. DOI: 10.1016/S0038-092X(03)00147-6

KOLOKOTSA, D.; ROVAS, D.; KOSMATOPOULOS, E.; KALAITZAKIS, K. "A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings". **Solar Energy**, v. 85, n. 12, p. 3067-3084, 2009.

KRAUSE, J. Software Domus-Procel Edifica: Eficácia na simulação energética de edificações comerciais públicas. Eletrobras, 2024. Disponível em: <https://domus.pucpr.br/>. Acesso em: 14 set. 2024.

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

LAMBERTS, R; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, J. O. Casa eficiente: bioclimatologia e desempenho térmico. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, LabEEE, 2010.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A. P.; GOULART, S. **Conforto e Stress Térmico**, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. 2011.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PAPST, A. L; CARLO, J. C.; BATISTA, J. O.; MARINOSKI, D. L.; NARANJO, A.; DUARTE, V. C. P. **Desempenho térmico de edificações**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L. P. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª Edição. EletrobrasProcel, 2014.

LEE, E. S.; DIBARTOLOMEO, D. L.; SELKOWITZ, S. E. "The energy-savings potential of electrochromic windows in a full-scale office building". **Energy and Buildings**, v. 34, n. 4, p. 405-415, 2002.

LEVINSON, R.; AKBARI, H.; BERDAHL, P. "A novel technique for the production of cool colored concrete tile and asphalt shingle roofing products". **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 89, n. 1, p. 133-148, 2005.

LIMA, M. C; PAIVA, E. C. de R. Análise da viabilidade econômica de edificações da regional catalão, considerando o desempenho térmico e o consumo de energia elétrica. Universidade Federal de Catalão. Catalão, 2020.

LIMA, M. C; PAIVA, E. C. de R. Desempenho térmico do restaurante universitário da regional catalão, UFCAT em implantação, e sua relação com o consumo de energia elétrica. Universidade Federal de Catalão. Catalão, 2021.

LIU, S., HODGSON, M., & WOLKOFF, P. Indoor Air Quality: A Comprehensive Reference Book. **Wiley-Blackwell**, 2011

LONG, N., et al. "OpenStudio: An Open Source Integrated Analysis Platform". **National Renewable Energy Laboratory**, 2010.

LOPES, A. F. O.; SILVA, C. F. e; AMORIM, C. N. D.; BATISTA, J. O. Avaliação do desempenho térmico de ambiente escolar padronizado, em contexto climático brasileiro, por meio de simulação termoeenergética. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, p. e023030, 2023. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v14i00.8670652>

MACEDO, S. C. K. A metodologia BIM aplicada ao conforto ambiental nas edificações: um estudo descritivo. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Sustentabilidade no Ambiente Construído) – Instituto Federal do Espírito Santo, Colatina, 2021

MAGLAD, A.M.; HOUDA, M.; ALROWAIS, R.; KHAN, A. M.; JAMEEL, M.; REHMAN, S. K. U.; KHAN, H.; JAVED, M. F.; REHMAN, M. F. Bim-based energy analysis and optimization using insight 360 (case study). **Case Studies in Construction Materials**, [S.l.], v. 18, e01755, p. 1-23, 12 dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01755>.

MAHAARAJA, G.S.; RENUKA, S.M. (2024). Integrating BIM with Energy Analysis and Green Building Certification System to Design Sustainable Building. In: Gencel, O., Balasubramanian, M., Palanisamy, T. (eds) Sustainable Innovations in Construction Management. ICC IDEA 2023. **Lecture Notes in Civil Engineering**, v. 388. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6233-4_28

MARTINEZ-MOLINA, Antonio et al. Post-occupancy evaluation of a historic primary school in Spain: Comparing PMV, TSV and PD for teachers' and pupils' thermal comfort. **Building and Environment**, v. 117, p. 248–259, 15 maio 2017. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.03.010

MELO, C. D. F. Eficiência energética em edifícios de ensino superior: um estudo de caso. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2021.

METRO ARQUITETOS. Edifício Renata Sampaio Ferreira. São Paulo: Metro Arquitetos, 2022. Disponível em: <https://metroarquitetos.com.br/projeto/renata-sampaio-2022/>

MUTA, L. F.; GARLET, L.; MELO, A. P. BIM application in the Brazilian Building Labeling Program: a review. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 15, p. e024005, 2024. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v15i00.8674178>

MONTAZAMI, A., GATERELL, M., NICOL, F., LUMLEY, M. AND THOUA, C., 2017. Impact of social background and behaviour on children's thermal comfort. **Building and Environment**, 122, pp.422-434

MYTAFIDES, L.; GEORGIU, G.; KARTERIS, M. M. Energy performance of a modernized university building through building envelope retrofit. **Energy Reports**, v. 3, p. 119-128, 2017.

NAJJAR, M. K.; DE ARAUJO, L. O. C.; OLADIMEJI, O.; KHALAS, M.; FIGUEIREDO, K. V.; BOER, D.; SOARES, C. A. P.; HADDAD, A. Influence of Ventilation Openings on the Energy Efficiency of Metal Frame Modular Constructions in Brazil Using BIM. **Eng, Basel**, v. 4, n. 2, p. 1635-1654, 2023.

NAM, Insick et al. A study on the thermal comfort and clothing insulation characteristics of preschool children in Korea. **Building and Environment**, v. 92, p. 724–733, out. 2015. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.05.041

NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES. (2007). National Building Information Modeling Standard Project Committee.

NASCIMENTO, R. F.; DIAS, L. S.; BEZERRA, D. P.; PERÔNICA, D. S.; SOUZA, K. S. F.; BESERRA, L. G.; BESERRA, A. V. S.; NEGREIROS, A. M. S.; SILVA NETO, J. A.. A modelagem da informação da construção no desempenho térmico das edificações. *Natural Resources*, v.13, n.2, p.69-82, 2023. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2023.002.0008>

NICOL, F.; HUMPHREYS, M.; ROAF, S. Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice. Routledge, 2012.

NICOL, J.; HUMPHREYS, M. Conforto térmico adaptativo e padrões térmicos sustentáveis para edifícios. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 563-572, 2002.

OCHOA, J. H.; ARAÚJO, D. L.; SATTTLER, M. A. Análise do conforto ambiental em salas de aula: comparação entre dados técnicos e a percepção do usuário. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 91-114, jan./mar. 2012

OLGYAY, V. "Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism". **Princeton University Press**, 1963.

OLIVEIRA, V., JESUS, L., & CONDE, K. Análise de eficiência energética utilizando softwares bim: : uso de ferramentas de modelagem energética do edifício (BEM) da Autodesk. **Simpósio brasileiro de qualidade de projeto do ambiente construído**, v. 6, n. 1, p. 943–954, 2023. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbqp/article/view/3198>

PAN X.; KHAN, A. M.; ELDIN, S. M.; ASLAM, F. REHMAN, S. K. U.; JAMEEL, M. BIM adoption in sustainability, energy modelling and implementing using ISO 19650: A review. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 15, Issue 1, p. 102252, 2024. DOI: 10.1016/j.asej.2023.102252

PARSONS, K. C. Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance. **CRC Press**, 2002.

PEREIRA, F. O. R.; BARROS, I. C.; SILVA, M. G. The influence of building energy simulations on the optimization of passive energy efficiency measures in the early stages of building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 109, p. 75-92, 2019.

PÉREZ, G. et al. Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. **Applied Energy**, v. 88, n. 12, p. 4854-4859, 2011. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.06.032.

PEREIRA, V.; SANTOS, J.; LEITE, F.; ESCÓRCIO, P. Using BIM to improve building energy efficiency – A scientometric and systematic review. **Energy and Buildings**, v. 250, n. 1, p. 111292, 2021.

PERILLO, P. J. L.; CAMPOS, M. A. S.; ABREU-HARBICH, L. V. Conforto térmico em salas de aula: revisão sistemática da literatura. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v. 8, n. 4, p. 236-248, dez. 2017. DOI: 10.20396/parc.v8i4.8650268

PIMENTEL, A. C.; SANTOS, C.; LIMA, E. A. Análise crítica do uso do Green Building Studio para simulações de desempenho térmico no Brasil. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 13, n. 2, p. 123-132, 2020.

PIMENTEL, B. P.; BARBOSA, A. T. R.; SOUZA, M. D. DE. Análise de métodos de integração entre bim e simulação termo energética de edificações militares. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 125, 2020. DOI: 10.19177/rgsa.v9e02020125-146

PINHEIRO, W. F. Avaliação das condições térmicas em escolas públicas no semiárido paraibano segundo os princípios da arquitetura bioclimática. 2023. 150f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

PILAR, F. R. A modelagem computacional para a avaliação do desempenho térmico de edificações. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

PORTAL VITRUVIUS. Hospital da Restauração, Recife, 1951. *Arquitextos*, ano 13, n. 147.03, 2012. Disponível em: <https://vitruvius.com.br/index.php/revistas/read/arquitextos/13.147/4466>

PRETTI, A. L. M. Interoperabilidade BIM e BEM: avaliação de eficiência do sistema na análise energética de edifícios. 2018. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2018.

PROCEL EDIFICA (Brasil). Nota Técnica nº 02/2024 – Recomendações para simulações computacionais de desempenho energético. Brasília: Eletrobras, 2024.

QUEIRÓZ, Gabriel Ramos de; SCHIMANIAC, Naiara Karin; SANTOS, Joaquim Cesar Pizzutti dos; GRIGOLETTI, Giane de Campos. Autodesk Revit® como ferramenta BIM aplicada à simulação térmica de edificações. **Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, v. 4, n. 2, p. 33-41, jul./dez. 2015. DOI: 10.18256/2318-1109/arqimed.v4n2p33-41

QUINTANILHA, B.; ALMASRI, A.; AMARIO, M.; QUALHARINI, E. L.; NAJJAR, M. Avaliação do Desempenho Térmico de Fachadas Verdes para Edifícios Energeticamente Eficientes Usando BIM. Rio de Janeiro, 2023.

REIS, F. J. do C. Processo de projeto BIM integrado: uma análise da interoperabilidade BIM e BPS. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

REIS, F. J. do C. Os impactos da urbanização em áreas de preservação permanente: estudo de caso na cidade de São Paulo. 2024. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-19042024-111018/publico/ME_FABIAJANNEFERDOCARMOREIS_rev.pdf.

REVISTA CONTINENTE. A partitura moderna de Acácio Gil Borsoi. Edição 119, 2011. Disponível em: <https://revistacontinente.com.br/edicoes/119/a-partitura-moderna-de-acacio-gil-borsoi>

RICCIARDI, P.; BURATTI, C. Conforto ambiental de salas de aula universitárias: Avaliação subjetiva e objetiva das condições de conforto térmico, acústico e de iluminação. **Building and Environment**, v. 127, p. 23-36, 2018.

RIVERO, Roberto. Acondicionamento térmico natural: arquitetura e clima. Porto Alegre: Ed. da Universidade; Luzzatto Ed., 1986. 249 p.

ROCHA, A. P. de A.; MENDES, N.; OLIVEIRA, R. C. L. F. Domus method for predicting sunlit areas on interior surfaces. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 83-95, jul./set. 2018. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. DOI:10.1590/s1678-86212018000300269

RODRIGUES, F.; ISAYEVA, A., RODRIGUES, H. et al. Avaliação de eficiência energética de um edifício público com recurso a um modelo BIM. **Innov. Infrastruct. Solut.**, v. 5, p. 41, 2020. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00291-1>

RODRÍGUEZ, C; CORONADO, M; MEDINA, J. Conforto térmico em edifícios educacionais: O método Classroom-Comfort-Data aplicado a escolas em Bogotá, Colômbia.

Building and Environment, v. 193, p. 107-145, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321000937>

SANTOS, J. F. R.; ALCÂNTARA, B. O. S.; SOUZA, W. C.; SALGADO, M. S. Utilização do BIM como apoio à simulação para análise do desempenho das edificações: uma revisão sistemática da literatura. In: Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído, 19., 2022, Canela. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2022.

SARTORI, G.; SILVA, F. L. C. P. da; TORRES, M. C. A. Análise do método de avaliação térmica dos projetos de pré-escolas do programa Proinfância. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 12, p. e021020, 2021. DOI: 10.20396/parc.v12i00.8661249

SCHERER, P.; GRIGOLETTI, G. de C. Avaliação de estratégias de ventilação natural para salas de aula em clima subtropical úmido. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 23, n. 1, p. 23-57, jan./mar. 2023. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000100648>

SCHNEIDER, M. Do School Facilities Affect Academic Outcomes? National Clearinghouse for Educational Facilities, 2002.

SCHERER, M. J. et al. Fachadas vegetadas: simulação do impacto no comportamento térmico de um ambiente residencial na zona bioclimática 2. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2020.

SHULTZ, J. S. A Framework for Modeling Complex Integrated Building Systems at Whole-Building Scale With Co-Simulation: Applied to a Coupled Simulation Between a Facade System Model and a Whole Building Energy Model, 2018. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Instituto Politécnico Rensselaer, Troy, 2018.

SILVEIRA, G. W. P. da; SPAGNUOLO, A. Y. N.; ZANELLA, H. F. Z.; FARIA, J. R. G.; FONTES, M. S. G. C. Conforto térmico em salas de aula: estado da arte das pesquisas nacionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 1038-1046.

SINGH, M.; OOKA, R.; RIJAL, H.; KUMAR, S.; KUMAR, A. Progresso em estudos de conforto térmico em salas de aula nos últimos 50 anos e caminho a seguir. **Energy and Buildings**, v. 202, p. 109441, 2019.

SORGATO, M. J.; COSTA, A. L. H.; LUTZ, A. T. **Relatório Técnico da Base de Simulações para o RTQ-R**. Brasília: Ministério de Minas e Energia; Eletrobras/Procel, 2011.

SORGATO, M. J.; VITTORINO, F.; LAMBERTS, R. Temperature of the ground and its influence on building thermal performance. *Energy and Buildings*, v. 43, n. 12, p. 3628–3635, 2011.

SOUZA, J. F. de; BRASILEIRO, M. C.; NODA, L.; LEDER, S. M. Estudo de conforto térmico em salas de aula ventiladas naturalmente no clima quente e úmido. In: encontro nacional de conforto no ambiente construído, 15., 2019. Anais [...]. [S. l.], 2019. p. 1241–1250. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/4055>. Acesso em: 23 jul. 2024.

SOUZA, L. R. de; SOUZA, H. A.; GOMES, A. P. Influência de paredes verdes no desempenho térmico de habitações sociais. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 11, p. e020029, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v11i0.8658167>.

SOUZA, M. C. B. de. Estudos de conforto térmico em ambientes ventilados naturalmente em Campina Grande - PB. 2022. 250 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in Construction**, v. 18, n. 3, p. 357-375, 2009.

TAHA, F.F.; HATEM, W.A.; JASIM, N.A. Effectivity of BIM technology in using green energy strategies for construction projects. **Asian J Civ Eng.**, v. 21, p. 995–1003, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00256-w>

TERRADOS, J.; ALMONACID, G.; AGUILERA, J.; VALENZUELA, L. Influence of internal gains and ventilation on thermal comfort of insulated buildings in hot climates. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 123-133, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.027>

TORCELLINI, P., et al. "EnergyPlus and OpenStudio: Tools for Building Energy Simulation and Analysis". National Renewable Energy Laboratory, 2011.

TURNER, C.; FRANKEL, M. Energy performance of LEED for new construction buildings. **New Buildings Institute**, 2008.

WALKER, J. A. J.; CAMPION, P. The Use of Electrolytic Hygrometers for the Determination of Water and Hydrogen. **Analyst**, Londres, v. 90, n. 1069, p. 199-208, 1965. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/an9659000199>.

WARGOCKI, P.; WYON, D. P.; SUNDELL, J.; CLAUSEN, G.; FANGER, P. O. "The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms, and Productivity". **Indoor Air**, v. 12, n. 2, p. 98-108, 2002.

WILDE, P.; VAN DER VOORDEN, M. Providing computational support for the selection of energy saving building components. **Building and Environment**, v. 39, n. 6, p. 601-612, 2004. DOI:10.1016/j.buildenv.2003.12.005

WONG, N. H. et al. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. **Building and Environment**, v. 45, n. 3, p. 663-672, 2010. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.08.005.

YANG, D.; MAK, C. Relações entre qualidade ambiental interna e fatores ambientais em salas de aula universitárias. **Building and Environment**, v. 177, p. 106927, 2020.

YOSHIMI, J.; ALTAN, H. Thermal simulations on the effects of vegetated walls on indoor building environments. In: 12th Conference of IBPSA, Sydney, 2011. Proceedings [...]. Sydney: IBPSA, 2011.

ZARZUELA, E. M.G. de la L.; DÍAZ, J. A.; GARCÍA, D. H. Estudio comparativo-tecnologías BIM en Edificación: Arquitectura Sostenible. **Anales de Edificación**, v. 5, n. 3, p. 8-14, 2019. DOI: 10.20868/ade.2019.4362.

ZHANG, Dawei; ZHONG, Zhengnan; HUANG, Yu; ZOU, Yukai; LOU, Siwei; ZHAN, Qiaosheng; GUO, Jialiang; YANG, Jiahao; GUO, Tongye. Impact of coupled heat and moisture transfer on indoor comfort and energy demand for residential buildings in hot-humid regions. **Energy and Buildings**, v. 288, p. 113029, 2023. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113029