

**USO DO BIM COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE COMPARATIVA DO
DESEMPENHO TÉRMICO DE CORTINAS VERDES EM EDIFICAÇÕES
CONSTRUÍDAS****USE OF BIM AS A COMPARATIVE ANALYSIS TOOL OF THE THERMAL
PERFORMANCE OF GREEN CURTAINS IN EXISTING BUILDINGS****USO DE BIM COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS COMPARATIVO DEL
DESEMPEÑO TÉRMICO DE CORTINAS VERDES EN EDIFICACIONES
CONSTRUIDAS**<https://doi.org/10.56238/ERR01v10n7-018>**Gabriela Oliveira Correa**

Graduanda em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal de São Paulo (IFSP) - Campus Votuporanga

E-mail: correa.g@aluno.ifsp.edu.br**Guilherme Shoiti Ueda**

Doutor em Engenharia Urbana

Instituição: Instituto Federal de São Paulo (IFSP) - Campus Votuporanga

E-mail: ueda@ifsp.edu.br**Eduardo de Pieri Prando**

Doutor em Ciências Ambientais

Instituição: Instituto Federal de São Paulo (IFSP) - Campus Votuporanga

E-mail: eduardop@ifsp.edu.br**André Luis Gobbi Primo**

Doutor em Ciências Ambientais

Instituição: Instituto Federal de São Paulo (IFSP) - Campus Votuporanga

E-mail: andre.gobbi@ifsp.edu.br**RESUMO**

Em regiões de clima muito quente como Votuporanga-SP, uma prática comum para garantir o conforto térmico interno é o uso de sistemas de arrefecimento mecânico, o que pode gerar gastos desnecessários e desperdício de recursos. Considerando o volume de edificações já existentes sem preocupação com a melhoria e/ou garantia do conforto térmico para os moradores na fase de projeto, torna-se necessário buscar soluções de baixo custo, executáveis pelos próprios moradores e de viés sustentável visando assegurar o conforto higrotérmico. Nesse contexto, a presente pesquisa teve por objetivo avaliar a eficiência da cortina verde aplicada na fachada oeste do IFSP - campus Votuporanga, bem como verificar a aderência da plataforma BIM às condições reais de simulação do comportamento térmico. Os resultados foram obtidos por meio de dataloggers e sensores instalados in loco e simulações com o software Revit®, considerando as propriedades físicas e condições climáticas no entorno da edificação. Para as simulações, foram realizadas duas modelagens da biblioteca: uma com inserção da cortina

verde como barreira contra a incidência solar direta na fachada oeste da edificação e outra sem. Os resultados demonstram redução da temperatura interna, aumento de umidade, diminuição de carga térmica da zona e proximidade entre valores medidos e simulados. Isso reafirma a eficiência térmica da cortina verde como estratégia passiva de melhoria do desempenho térmico e comprova/demonstra que a utilização da plataforma BIM se mostrou precisa para análises térmicas, evidenciando seu uso como ferramenta de apoio a decisões de projetos sustentáveis.

Palavras-chave: BIM. Cortinas Verdes. Eficiência Térmica. Sustentabilidade.

ABSTRACT

In regions with very hot climates such as Votuporanga-SP, a common practice to ensure indoor thermal comfort is the use of mechanical cooling systems, which may result in unnecessary expenses and resource waste. Considering the number of existing buildings designed without concern for improving and/or ensuring thermal comfort for occupants during the project stage, it becomes necessary to seek low-cost, sustainable solutions that can be implemented by the residents themselves in order to ensure hygrothermal comfort. In this context, the present research aimed to evaluate the efficiency of the green curtain applied to the western façade of IFSP – Votuporanga campus, as well as to verify the adherence of the BIM platform to real conditions of thermal behavior simulation. The results were obtained through dataloggers and sensors installed in situ, and simulations with the Revit® software, considering the physical properties and climatic conditions in the building's surroundings. For the simulations, two models of the library were developed: one including the green curtain as a barrier against direct solar incidence on the western façade, and another without it. The results demonstrate a reduction in indoor temperature, an increase in humidity, a decrease in the thermal load of the zone, and a close correlation between measured and simulated values. This reaffirms the thermal efficiency of the green curtain as a passive strategy for improving thermal performance and demonstrates that the use of the BIM platform proved to be accurate for thermal analyses, highlighting its suitability as a decision-support tool for sustainable design strategies.

Keywords: BIM. Green Curtains. Thermal Efficiency. Sustainability.

RESUMEN

En regiones de clima muy cálido como Votuporanga, una práctica común para garantizar el confort térmico interno es el uso de sistemas de enfriamiento mecánico, lo que puede generar gastos innecesarios y desperdicio de recursos. Considerando la cantidad de edificaciones existentes proyectadas sin preocupación por mejorar y/o garantizar el confort térmico de los habitantes durante la etapa de diseño, se vuelve necesario buscar soluciones de bajo costo, ejecutables por los propios residentes y con enfoque sostenible, con el fin de asegurar el confort higrotérmico. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la cortina verde aplicada en la fachada oeste del IFSP – campus Votuporanga, así como verificar la adherencia de la plataforma BIM a las condiciones reales de simulación del comportamiento térmico. Los resultados fueron obtenidos mediante dataloggers y sensores instalados in situ y simulaciones con el software Revit®, considerando las propiedades físicas y las condiciones climáticas alrededor de la edificación. Para las simulaciones, se desarrollaron dos modelos de la biblioteca: uno con la inserción de la cortina verde como barrera contra la incidencia solar directa en la fachada oeste y otro sin ella. Los resultados muestran reducción de la temperatura interna, aumento de la humedad, disminución de la carga térmica de la zona y proximidad entre los valores medidos y simulados. Esto reafirma la eficiencia térmica de la cortina verde como estrategia pasiva para mejorar el desempeño térmico y demuestra que el uso de la plataforma BIM se mostró preciso para los análisis térmicos, evidenciando su utilidad como herramienta de apoyo para decisiones en proyectos sostenibles.

Palabras clave: BIM. Cortinas Verdes. Eficiencia Térmica. Sostenibilidad.

1 INTRODUÇÃO

O ambiente construído é responsável por abrigar grande parte das atividades humanas como alimentação, moradia, lazer e trabalho. Frota e Schiffer (2009) destacam que as edificações devem responder às necessidades humanas, dentre elas o conforto térmico. Para garanti-lo, é essencial recorrer a estratégias arquitetônicas capazes de proporcionar o conforto térmico dentro dos edifícios, independentemente das condições climáticas externas.

O município de Votuporanga-SP – onde se desenvolve esta pesquisa – apresenta condições climáticas caracterizadas por altas temperaturas ao longo do ano, o que torna comum o uso intensivo de sistemas mecânicos de climatização. Isso resulta em significativo consumo de energia elétrica, portanto, estratégias passivas tornam-se especialmente relevantes. O bom desempenho térmico da construção está diretamente atrelado ao controle solar, e como estratégia é crucial barrar sempre que possível a incidência direta da radiação solar nas paredes, ou pelo menos em parte dela, seja em edificações climatizadas ou não (Corbella e Corner, 2011). Esse princípio reforça a necessidade de adequação da arquitetura ao clima para reduzir a necessidade de sistemas de condicionamento de ar, seja para arrefecer ou aquecer os ambientes (Frota e Schiffer, 2001).

Denominado como higrotermia, o conforto térmico resulta da interação entre múltiplos fatores, dentre eles duas variáveis mensuráveis diretamente: a temperatura do ar e a umidade relativa (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Entretanto, grande parte das construções já existentes sem a devida preocupação com a melhoria e/ou garantia das condições de conforto térmico dos usuários ainda na concepção arquitetônica, evidenciam a necessidade de soluções práticas, de baixo custo e sustentáveis para assegurar a higrotermia em edifícios já construídos.

Entre essas soluções passivas, as cortinas verdes têm se destacado por reunirem baixo custo, impacto ambiental positivo e potencial significativo em mitigar o desempenho térmico das edificações. Além contribuir esteticamente, a vegetação ajuda a reduzir a temperatura interna e a diminuir a necessidade de uso de climatização artificial – resultados confirmados por estudos realizados com simulações energéticas em ambiente BIM (Gonçalves; Kaimoti; Spozito, 2021). No IFSP - câmpus Votuporanga, essa relação entre vegetação e clima vem sendo estudada desde 2014, por meio de projetos de Iniciação Científica que investigam o uso de cortinas verdes como alternativa para melhorar o conforto térmico em salas de aula e laboratórios. Os resultados obtidos até aqui são animadores, indicando reduções significativas da temperatura interna. Contudo, grande parte desses estudos foram obtidos a partir de medições feitas por termômetros de bulbo e simulações em modelos confeccionados no SketchUp® (Valdambrini, 2014), o que revela a importância de incorporar tecnologias mais precisas, especialmente no campo das simulações térmicas.

É nesse cenário que se insere a presente pesquisa. Ela dá continuidade aos estudos anteriores, mas propõe uma análise estatística do desempenho térmico da cortina verde aplicada à fachada oeste da biblioteca do IFSP - câmpus Votuporanga. Para isso, realizou-se uma abordagem integrada entre: simulação com o *software* Autodesk Revit® (BIM), considerando as propriedades físicas e condições climáticas no entorno da edificação, e monitoramento *in loco*. Para as simulações, foram realizadas duas modelagens da biblioteca: uma com inserção da cortina verde como barreira contra a incidência solar direta na fachada oeste da edificação e outro sem. Os resultados simulados foram confrontados com os dados obtidos *in loco* por *dataloggers* RC-4HC, utilizados como instrumentos de referência, e por oito protótipos de sensores de temperatura e umidade confeccionados para a pesquisa. Essa abordagem permitiu gerar uma base comparativa entre condições reais e simuladas, reafirmando as vantagens do uso da cortina verde como condicionadora de microclima – regulando a radiação solar, amenizando a temperatura, aumentando a umidade e contribuindo para a melhoria da qualidade do ar – estratégia sustentável, economicamente viável e replicável em diferentes contextos e avaliando a confiabilidade da plataforma BIM como ferramenta de suporte à decisão em estratégias sustentáveis na construção civil.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral:

Avaliar a eficiência da cortina verde aplicada a edifícios construídos, verificando sua influência nas condições de conforto térmico e validando a plataforma BIM como ferramenta de simulação térmica.

1.1.2 Objetivos específicos:

- Monitorar temperatura e umidade internas e externas ao edifício por meio de *dataloggers* e sensores calibrados.
- Realizar simulações no Autodesk Revit® (BIM) considerando dois cenários: sem e com cortina verde.
- Comparar estatisticamente os dados medidos e simulados para avaliar a aderência do modelo BIM às condições reais.
- Verificar a redução da carga térmica e diminuição da dependência de arrefecimento mecânico no cenário com cortina verde.
- Subsidiar a análise do conforto térmico a partir da elaboração de cartas bioclimáticas comparativas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONFORTO TÉRMICO E HIGROTÉRMIA EM EDIFICAÇÕES

O conforto térmico em edificações constitui um requisito fundamental de qualidade ambiental, associado ao bem-estar, ao desempenho cognitivo e à permanência dos ocupantes nos espaços internos. Ele decorre do balanço térmico entre corpo humano e ambiente, influenciado por fatores como temperatura do ar, umidade relativa, movimento do ar e radiação térmica (Frota e Schiffer, 2009).

Este estado de satisfação térmica se denomina conforto higrotérmico e para alcançá-lo são consideradas variáveis ambientais que podem ser medidas diretamente, como a temperatura do ar e a umidade relativa (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Essas variáveis podem ser monitoradas por instrumentos de medição, permitindo avaliação do desempenho térmico de uma edificação. A ISO 7726 (2025) sistematiza as grandezas físicas a serem medidas e os requisitos dos instrumentos, reforçando a importância de se trabalhar com dados confiáveis na avaliação do desempenho térmico de edificações. Assim, o conforto deixa de ser uma percepção puramente subjetiva e passa a ser quantificável, permitindo análises comparativas e diagnósticos técnicos mais precisos.

No campo da arquitetura bioclimática, a literatura demonstra que estratégias passivas de controle ambiental são capazes de mitigar ganhos térmicos e reduzir a dependência de climatização artificial. Estudos apontam que soluções como sombreamento, proteção de superfícies transparentes e uso de vegetação contribuem significativamente para melhorar as condições higrotérmicas internas (Lamberts; Dutra; Pereira, 2016).

Neste contexto, a inserção bioclimática deve considerar as particularidades climáticas regionais. A ABNT NBR 15220, ao tratar das zonas bioclimáticas brasileiras, reforça que o projeto arquitetônico deve considerar, desde a concepção, as características climáticas locais, propondo soluções que privilegiem o conforto térmico e reduzam a dependência de sistemas artificiais de climatização (ABNT, 2005). Trata-se, portanto, de um critério para a qualidade ambiental das edificações.

2.2 CORTINAS VERDES COMO ESTRATÉGIA BIOCLIMÁTICA DE CONTROLE TÉRMICO

A vegetação aplicada às fachadas atua como elemento regulador de microclima ao alterar os fluxos térmicos e a interação entre massa vegetal e radiação solar. Pesquisas reforçam que a presença de espécies vegetais nas fachadas pode modificar os fluxos de calor, atuar como filtro da radiação e influenciar diretamente a temperatura e a umidade do ar ao redor da edificação. A vegetação desempenha papel determinante na formação dos microclimas urbanos, interferindo nos níveis de radiação, na temperatura ambiente, na umidade relativa e na ação dos ventos; ao mesmo tempo, contribui para a redução da poluição e para a qualificação da ambiência urbana (Mascaró e Mascaró,

2009). Tal perspectiva revela que a vegetação não atua apenas como elemento estético ou paisagístico, mas como componente ambiental ativo, capaz de alterar variáveis essenciais ao conforto térmico.

Nesse contexto, as cortinas verdes vêm ganhando espaço como alternativa eficiente e acessível de sombreamento arquitetônico. Estruturalmente, consistem em trepadeiras cultivadas junto às fachadas, criando uma barreira natural que reduz os ganhos térmicos provenientes da radiação solar direta. Estudos no IFSP - campus Votuporanga demonstram que essa solução é capaz de reduzir significativamente as temperaturas internas em ambientes expostos ao sol, sobretudo em fachadas que concentram maiores cargas térmicas ao longo do dia (Magno; Kaimoti; Valdambrini, 2017). A ação combinada de sombreamento e evapotranspiração promove um resfriamento localizado do ar, reduzindo a temperatura na envoltória da edificação.

Além dos benefícios térmicos diretos, as cortinas verdes representam uma alternativa sustentável e de baixo custo, facilmente replicável pelos próprios moradores em edificações existentes. A literatura internacional também apoia essa perspectiva. Informações divulgadas pela Kyocera Group demonstram que as “green curtains” vêm sendo utilizadas em diversos países asiáticos como solução para mitigação de calor urbano e promoção de ambientes internos mais confortáveis, com resultados expressivos na redução das temperaturas superficiais das fachadas e no consumo de energia (Kyocera Group, 201-). Quando consideradas em conjunto com estratégias de arquitetura bioclimática, essas soluções contribuem para cidades mais resilientes e adaptadas às mudanças climáticas.

2.3 MODELAGEM DE INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO (BIM) E DESEMPENHO TÉRMICO

A Modelagem da Informação da Construção ou Building Information Modeling (BIM) vem se consolidando como uma aliada estratégica no desenvolvimento de projetos mais integrados, claros e eficientes dentro da construção civil. Além da modelagem tridimensional, a tecnologia possibilita a parametrização digital de elementos construtivos reais, possibilitando análises de desempenho projetual e operacional ao longo do ciclo de vida do edifício (Araujo et al., 2017). Quando aplicado ao campo da sustentabilidade, esse potencial informacional torna-se ainda mais relevante, pois viabiliza a avaliação comparativa entre diferentes soluções construtivas e seus impactos térmicos, contribuindo para a redução do consumo energético e a otimização do conforto térmico dos ocupantes.

A ferramenta BIM tem se consolidado como um recurso essencial na avaliação da eficiência térmica de edificações, permitindo a representação detalhada da edificação e a simulação de seu comportamento térmico em diferentes condições ambientais. Elas possibilitam incorporar dados reais de materiais, esquadrias, transmitâncias térmicas e padrões de ocupação, proporcionando uma análise mais precisa do desempenho energético. Essa abordagem permite comparar com rigor cenários com e sem estratégias bioclimáticas – como as cortinas verdes – evidenciando o impacto direto dessas

soluções na redução da carga térmica e na promoção do conforto ambiental (Gonçalves; Kaimoti; Spozito, 2021).

A integração entre simulação computacional e medições *in loco* fortalece a análise ao permitir calibração do modelo digital com base em dados reais, ajustando propriedades de materiais, densidades foliares, variabilidade de sombreamento e condições ambientais no entorno. Assim, a associação entre BIM e monitoramento físico representa um avanço técnico-científico relevante para a construção de ambientes mais confortáveis e energeticamente responsáveis. No contexto desta pesquisa, a integração entre medições reais e simulações no *software* Autodesk Revit® (BIM) possibilitou validar a adequação do modelo virtual às condições observadas, demonstrando a confiabilidade da plataforma BIM como suporte à tomada de decisões em estratégias sustentáveis.

2.4 CARTA BIOCLIMÁTICA DE GIVONI E FAIXAS DE CONFORTO TÉRMICO

O projeto arquitetônico deve responder simultaneamente as demandas de eficiência energética e ao conforto térmico dos ocupantes. Nesse contexto, a adoção de estratégias passivas reduz a necessidade de sistemas artificiais de climatização, minimizando o consumo de energia ao longo da operação do edifício. Para que essas estratégias sejam aplicadas de forma adequada, é essencial uma correta leitura bioclimática do local, baseada em dados climáticos consistentes e representativos da região (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

A carta psicrométrica de Givoni (Figura 1) utilizada no Brasil constitui importante ferramenta para decisões projetuais. Ela correlaciona temperatura e umidade com zonas de conforto, indicando estratégias de adequação térmica para diferentes regiões climáticas e condições ambientais.

Figura 1. Figura 3-18: Carta Bioclimática adotada para o Brasil.



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira – Eficiência Energética na Arquitetura, 2014.

Ao plotar séries de medições sobre a carta, é possível visualizar se os parâmetros de higrotermia de uma edificação se encontram dentro da zona de conforto ou se demandam estratégias passivas adicionais – como sombreamento, ventilação cruzada, resfriamento evaporativo ou massa térmica. Se

as condições climáticas estiverem contidas na zona de conforto, há uma alta probabilidade de que os ocupantes se sintam em conforto térmico no ambiente anterior (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

Figura 2. Figura 3-19: Zona de conforto.



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira – Eficiência Energética na Arquitetura, 2014.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi estruturada em três processos fundamentais: (1) modelagem 3D da biblioteca e simulação de dois cenários no *software* Autodesk Revit®: um com inserção da cortina verde como barreira contra a incidência solar direta na fachada oeste da edificação e outro sem; (2) coleta de dados higrotérmicos por meio de instrumentos de medição instalados *in loco*, incluindo *dataloggers* e sensores confeccionados para esta pesquisa; e (3) comparação estatística entre dados reais e dados simulados na plataforma BIM, visando a verificar a aderência e confiabilidade dos parâmetros térmico representados no modelo BIM.

3.1 ETAPA 1 – MONITORAMENTO PRELIMINAR, MODELAGEM DA BIBLIOTECA E SIMULAÇÃO BIM

3.1.1 Identificação da biblioteca como objeto de estudo

A biblioteca do IFSP - campus Votuporanga foi selecionada como objeto de estudo por apresentar características arquitetônicas adequadas para a investigação da eficiência térmica da cortina verde. O edifício possui amplas superfícies envidraçadas (Figura 3), característica que intensifica a absorção de radiação solar elevando o ganho térmico interno, aumentando a dependência de climatização mecânica para manutenção do conforto térmico. Sua fachada oeste – área de maior incidência solar direta – já dispunha a implantação da espécie *Thunbergia grandiflora* (Tumbéria azul) aplicada como uma cortina verde em parte de sua extensão (Figura 4), o que permitiu um cenário real e consolidado para avaliar seu impacto como estratégia passiva. Essas características, somadas ao uso contínuo do espaço, justificam a escolha da biblioteca como ambiente representativo para

mensurar, de forma comparativa, o potencial da vegetação vertical em mitigar ganhos térmicos e favorecer condições de conforto.

Figura 3. Fachada oeste da biblioteca do IFSP - campus Votuporanga.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Figura 4. *Thunbergia grandiflora* como cortina verde na biblioteca.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3.1.2 Equipamentos utilizados para coleta de dados

A avaliação da eficiência térmica foi baseada no monitoramento de variáveis hidrotérmicas, especificamente a temperatura do ar e a umidade relativa. Apesar da disponibilidade de dados provenientes de estações meteorológicas automáticas, a estação mais próxima está localizada a 9,98km da edificação, o que poderia invalidar ou ocasionar diferenças significativas entre as condições microclimáticas reais e os valores utilizados para comparação com a simulação.

Diante disso, optou-se pelo monitoramento direto no ambiente de estudo com o uso de dois *dataloggers* modelo RC-4HC instalados no interior da biblioteca, junto à fachada oeste – zona diretamente influenciada pela radiação solar incidente e pela presença da cortina verde. Esses aparelhos

realizaram registros automáticos de temperatura (°C) e umidade relativa do ar (%UR) a cada 15 minutos, durante o período de 05 de abril a 05 de junho de 2024, gerando uma base contínua e estatisticamente representativa das condições reais do ambiente construído.

Figura 5. Aparelho *datalogger* posicionado no interior da biblioteca do IFSP - campus Votuporanga.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Ambos os *dataloggers* foram calibrados por meio do seu próprio *software* ElitechLogWin, garantindo conformidade com os requisitos de precisão estabelecidos pela ISO 7726:2025, a qual trata sobre ergonomia do ambiente térmico e estabelece características recomendadas para instrumentos de medição de grandezas físicas. Os dados coletados foram exportados automaticamente em planilhas eletrônicas, estruturando a base de dados utilizada na análise comparativa com as simulações.

3.1.3 Modelagem 3D na plataforma BIM

A modelagem tridimensional da biblioteca foi desenvolvida no *software* Autodesk Revit®, ferramenta da plataforma BIM que permite a caracterização paramétrica criteriosa dos elementos construtivos e a atribuição de propriedades físicas, térmicas, estéticas e estruturais relevantes ao desempenho térmico. Para a reprodução da edificação, foram coletadas medidas *in loco* com trena e registros fotográficos, permitindo a representação precisa de elementos como estrutura metálica, esquadrias, vidraças, portas, janelas e cobertura.

Figura 6. Biblioteca IFSP-VTP, fotografada (a), e modelada no Revit® (b).



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Figura 7. Tumbérgia azul como cortina na biblioteca, fotografada (a), e modelada no Revit® (b).



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

As propriedades térmicas dos materiais que compõem a modelagem foram atribuídas com base nos valores recomendados pela NBR 15220 e no Anexo Geral V da PORTARIA INMETRO N° 50/2013 – que tratam das dimensões e das propriedades térmicas e físicas dos substratos e camadas aplicadas em elementos estruturais – além das informações técnicas do Memorial Descritivo do projeto da Fase I do campus, Votuporanga. Dessa forma, criou-se um conjunto de dados abrangendo as informações sobre os materiais e revestimentos das paredes, os tipos de vidros e metais usados nas esquadrias, elementos importantes para o estudo térmico do ambiente pois possuem um impacto significativo no desempenho térmico do edifício.

Embora a cortina verde tenha sido criada no modelo tridimensional conforme ilustra a Figura 7.b, o Revit® não dispõe de elemento nativo com propriedades termo físicas vegetais. Portanto, sua representação foi realizada por meio da aplicação de paredes caracterizadas com base em dados específicos sobre a cortina verde, fundamentados em artigos e pesquisas que buscaram aproximar ao máximo o elemento criado no software ao de uma cortina verde real (Tavares, 2017).

Tabela 1. Espessura dos elementos construtivos.

ELEMENTO	ESPESSURA (cm)
Cobertura metálica	0,5
Estruturas metálicas	[variado]
Mureta (bloco)	14
Parede (bloco)	19
Reboco	1,5
Chapisco	0,5
Vidro	0,4
Cortina verde	10

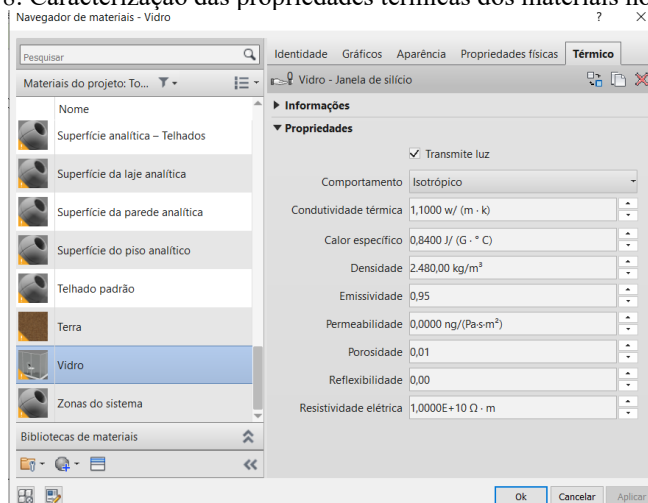
Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Tabela 2. Propriedades térmicas dos elementos construtivos.

ELEMENTO	Condutibilidade térmica (w/[m·k])	Calor específico (j/[g·°c])	Densidade (kg/m³)	Emissividade
Estruturas metálicas	15,9	0,49	8000	0,15
Bloco de concreto / Concreto	1,75	1,00	2300	-
Reboco	1,15	1,00	1800	-
Chapisco	0,7	0,84	1200	-
Vidro	1,1	0,84	2480	0,95
Cortina verde	0,03	4,00	1100	0,96

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Figura 8. Caracterização das propriedades térmicas dos materiais no Revit®.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

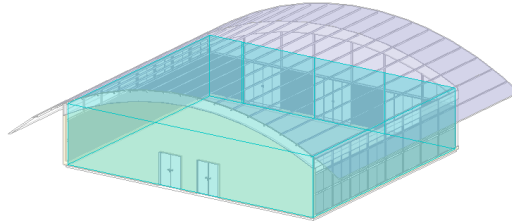
Após a fase de modelagem e caracterização dos elementos, foram realizadas as parametrizações para análise energética. Nesse ambiente foram definidos, conforme as especificidades do ambiente de estudo, componentes essenciais como: tipologia estrutural, percentual de vidraça do alvo, horários de funcionamento da edificação, modelo do sistema de arrefecimento, entre outros.

3.1.4 Simulação

Com todas as informações definidas e atribuídas, o Revit® gerou um modelo analítico incorporando todos esses parâmetros. A simulação foi executada em dois cenários: (i) modelo sem a presença de cortina verde e (ii) modelo considerando a vegetação, variando apenas esse parâmetro.

Para cada cenário o *software* processou a leitura, gerando um modelo analítico (Figura 9) e um relatório de análise.

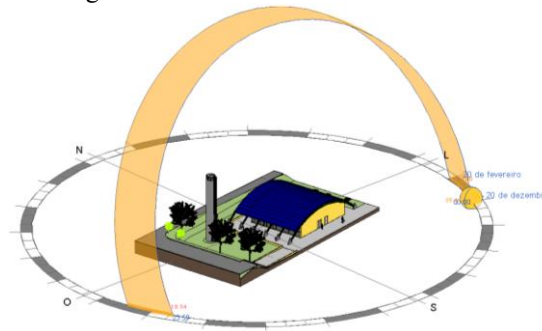
Figura 9. Modelo analítico no Revit® indicando ambiente analisado.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Além disso, a localização geográfica exata da edificação foi inserida, permitindo que a análise considerasse a latitude, longitude e orientação solar específica de onde se encontra a edificação. Esse procedimento possibilitou simular fielmente a trajetória solar e sua interação com as superfícies envidraçadas, contribuindo para a avaliação do comportamento térmico do edifício nos dois cenários comparados.

Figura 10. Incidência solar na biblioteca.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

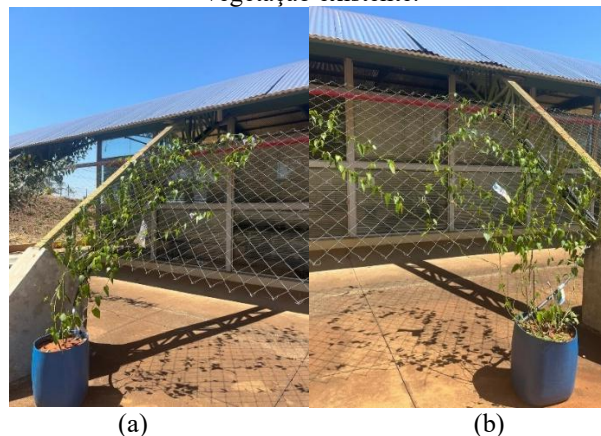
3.2 ETAPA 2 – MONITORAMENTO AMPLIADO, SIMULAÇÃO BIM E ANÁLISE ESTATÍSTICA

A Etapa 2 utilizou a mesma modelagem BIM desenvolvida na Etapa 1, diferenciando-se pela implementação de um novo arranjo de instrumentação destinados à coleta de temperatura e umidade relativa. Essa expansão permitiu ampliar a qualidade e quantidade dos dados monitorados, elevando a precisão e a representatividade dos dados monitorados no ambiente real. A finalidade desse monitoramento ampliado foi aprimorar a avaliação do desempenho térmico associado a cortina verde, subsidiando a análise paralela com os resultados das simulações no Revit® e permitir uma comparação estatisticamente entre medições reais e valores simulados.

3.2.1 Implantação de novas mudas de cortina verde

Com o objetivo de potencializar o sombreamento da fachada oeste da biblioteca, foram adicionadas duas novas mudas da *Thunbergia grandiflora* ao alambrado já existente, que funciona como suporte da vegetação. Atualmente, a fachada conta com apenas uma muda em estágio avançado de desenvolvimento, porém ainda insuficiente para sombrear integralmente a área de interesse – fato que motiva também a utilização de simulações no *software* Autodesk Revit®, de modo a prever o comportamento térmico do edifício em um cenário de cortina verde completamente desenvolvida. Para ampliar a eficiência do sombreamento, uma muda foi posicionada na região central da fachada (Figura 11.a), enquanto a outra foi posicionada na extremidade oposta à vegetação existente (Figura 11.b), favorecendo a distribuição homogênea ao longo de toda superfície.

Figura 11. Mudanças recém-plantadas da Tumbérgia azul posicionadas no centro do alambrado (a) e na extremidade oposta à vegetação existente.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3.2.2 Equipamentos utilizados e coleta de dados

Foram confeccionados oito protótipos de *datalogger* baseados na plataforma de prototipagem Arduino, utilizando como unidade sensora o BME280 acoplado à placa ESP32-DevKitC V4. O BME280 foi selecionado por sua capacidade de registro simultâneo de temperatura e umidade relativa, apresentando preciso compatível com as recomendações da ISO 7726:2025 para instrumentos aplicados em ergonomia térmica. A placa ESP32, permite transmissão de dados via *Wi-Fi*, possibilitando o envio contínuo das leituras para uma planilha online. Os dispositivos foram montados pelo orientador e um colaborador técnico, utilizando a infraestrutura disponível no laboratório de prototipagem do campus.

Os sensores registraram as duas variáveis pelo mesmo método adotado na Etapa 1, com medições realizadas a cada 15 minutos no período de 01 de agosto a 01 de outubro de 2025, totalizando dois meses de acompanhamento contínuo. Esses dados foram registrados automaticamente em

planilhas eletrônicas, discriminando nome de cada sensor, dia e horário da coleta. Esse procedimento assegurou a rastreabilidade das medições e consistência entre os diferentes pontos de monitoramento.

3.2.3 Calibração e testes preliminares

Antes do posicionamento definitivo dos sensores na biblioteca, os oitos dispositivos foram programados e verificados no laboratório da instituição, sendo submetidos a um processo de calibração e testes preliminares conduzidos ao longo de cinco dias. Nesse período, todos os sensores permaneceram numa sala dispostos próximos uns aos outros, garantindo condições homogêneas de temperatura e umidade durante o procedimento.

O desempenho dos sensores foi verificado conforme as diretrizes da ISO 7726:2025, a qual estabelece que instrumentos utilizados para medições higrotérmicas devem operar com erro máximo de $\pm 5\%$ UR e $\pm 0,5^\circ\text{C}$ para estudos de conforto térmico. Embora a norma não apresente um procedimento operacional detalhado de calibração, ela recomenda que cada variável seja comparada a um instrumento de referência com precisão superior (ISO, 2025). Atendendo a essa recomendação, os sensores BME280 foram confrontados com um *datalogger* RC-4HC, utilizados na Etapa 1 da pesquisa, o qual possui certificado de calibração de fábrica. Esse dispositivo foi adotado como padrão de referência, assegurando maior confiabilidade meteorológica às comparações realizadas.

O tratamento estatístico dos dados, incluindo o cálculo da média, erro absoluto, erro percentual, MAE e coeficiente de correlação de Pearson, foi conduzido com base nos fundamentos de estatística descritiva aplicados em pesquisas quantitativas conforme Bussab e Morettin (2017), assegurando robustez e reprodutibilidade na análise. Assim, para cada sensor e para cada um dos cinco dias monitorados, as leituras de umidade e temperatura registradas a cada 15 minutos foram consolidadas em um único valor médio diário, conforme a Equação (1).

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (1)$$

Onde:

\bar{X} = valor médio da grandeza analisada

\bar{X}_n = i-ésima leitura registrada

n = número total de leituras no período de calibração

Em seguida, calculou-se o erro absoluto, que se trata da diferença média entre sensor e *datalogger*, conforme Equação 2:

$$EA = |\bar{X}_{sensor} - \bar{X}_{ref}| \quad (2)$$

Onde:

EA = erro absoluto

\bar{X}_{sensor} =valor médio medido pelo sensor

\bar{X}_{ref} =valor médio medido pelo datalogger

Posteriormente, calculou-se o erro percentual, conforme Equação 3:

$$EP = \frac{|\bar{X}_{sensor} - \bar{X}_{ref}|}{\bar{X}_{ref}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

EP = erro percentual em relação ao valor real

\bar{X}_{sensor} =valor lido pelo sensor

\bar{X}_{ref} =valor lido pelo datalogger

Logo após, calculou-se a média dos erros absolutos (MAE - Mean Absolute Error), conforme Equação 4:

$$MAE = \frac{\sum |\bar{X}_{sensor} - \bar{X}_{ref}|}{n} \quad (4)$$

Onde:

MAE = média dos erros absolutos ao longo do período de calibração

n =número de medições

E, por fim, calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r), utilizada para verificar se o sensor segue a tendência do *datalogger*, conforme Equação 5:

$$r = \frac{\sum (X_{sensor} - \bar{X}_{sensor})(X_{ref} - \bar{X}_{ref})}{\sqrt{\sum (X_{sensor} - \bar{X}_{sensor})^2 \sum (X_{ref} - \bar{X}_{ref})^2}} \quad (5)$$

Onde:

r = grau de correlação (-1 a +1)

X_{sensor} =valores do sensor

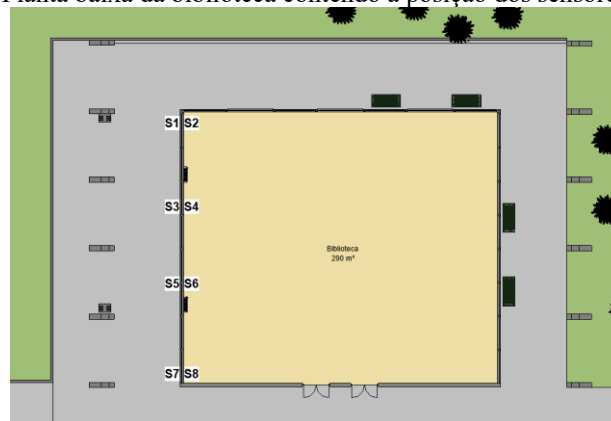
X_{ref} =valores de referência

$\bar{X}_{sensor}, \bar{X}_{ref}$ =médias das amostras

3.2.4 Posicionamento dos sensores no ambiente de estudo e coleta de dados

Os oito dispositivos foram instalados em pontos estrategicamente selecionados na fachada oeste da biblioteca, visando capturar variações térmicas decorrentes tanto da exposição solar quanto da atenuação promovida pela cortina verde. Assim, os sensores ímpares (S1, S3, S5 e S7) foram posicionados na parte externa da edificação, enquanto os sensores pares (S2, S4, S6 e S8) foram posicionados no ambiente interno da edificação, conforme ilustra a Figura 12, permitindo a avaliação de efeito térmico resultante da barreira vegetal.

Figura 12. Planta baixa da biblioteca contendo a posição dos sensores instalados.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Os sensores S1 e S2 foram posicionados nas proximidades da cortina verde, possibilitando mensurar sua influência direta sobre o microclima adjacente. Em contraposição, os sensores S7 e S8 foram posicionados na extremidade oposta – zona sem sombreamento da cortina verde – permitindo estabelecer contraste entre as áreas. Esse posicionamento instrumental permite coletar uma base comparativa essencial para analisar a mitigação térmica proporcionada pela cortina verde e o comportamento hidrotérmico do ambiente interno em função da proteção vegetal externa.

Figura 13. Sensor BME280 alocado em suporte instalado.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Figura 14. Placa ESP32-DevKitC V4 instalado.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3.2.5 Tratamento dos dados

Antes da análise estatística, foi realizado um tratamento de dados visando garantir a consistência física e confiabilidade dos valores de temperatura e umidade. Esse procedimento segue as recomendações da ISO 7726:2025 e diretrizes operacionais descritas em publicações técnicas da ASHRAE (2017), as quais orientam a remoção de registros que ultrapassem limites físicos ou indiquem falha de medição. Assim, aplicaram-se os seguintes critérios:

- Se $UR > 100\%$, o valor foi desconsiderado por violar o limite físico de saturação do ar;
- Se $T < -10^{\circ}\text{C}$ ou $T > 60^{\circ}\text{C}$, o valor foi excluído por ultrapassar os limites plausíveis de variação ambiental em edifícios ocupados;
- Se $|\text{valor}_i - \text{valor}_{i-1}| > 10$ unidades em intervalo de 15 min, foi caracterizado como "*spike*" de leitura e removido.

Esses procedimentos asseguraram que somente valores consistentes e representativos do ambiente real construído fossem utilizados na avaliação estatística.

3.2.6 Análise comparativa

A fim de avaliar a eficiência térmica da cortina verde e a aderência do comportamento simulado no BIM às condições reais de medição, foram feitas análises usando estatística descritiva. Primeiramente, foram calculadas as médias de temperatura e umidade de cada sensor e dos valores simulados, utilizando a Equação 1. Com base nesses valores médios, formou-se quatro grupos de comparações para análises estatísticas e objetivas:

3.2.6.1 Comparação ambiente externo vs. interno

Esta análise permite quantificar o diferencial térmico entre o ambiente externo e o ambiente interno da edificação, permitindo identificar o nível de dependência de sistemas mecânicos de climatização.

Para cada grupo (pares internos vs. ímpares externos), foram calculadas as médias de temperatura e umidade utilizando Equação (1). Em seguida, foi obtido a diferença dos grupos conforme Equação 6.

$$\Delta X = \bar{X}_{externo} - \bar{X}_{interno} \quad (6)$$

Onde:

ΔX = diferença de valor da grandeza analisada

$\bar{X}_{externo}, \bar{X}_{interno}$ =valor médio pela Equação 1

3.2.6.2 Comparação focal: eficiência da cortina verde

Foram comparadas as médias de temperatura e umidade dos sensores próximos à cortina (S1/S2) com a extremidade oposta (S7/S8), identificando o impacto direto da barreira vegetal.

3.2.6.3 Validação da plataforma BIM

A comparação foi realizada entre temperatura média simulada no Revit® e a temperatura média medida pelos sensores internos, permitindo avaliar o grau de aderência entre simulação e condições reais.

3.2.6.4 Comparação entre cenários simulados: sem e com a cortina verde

Foram comparadas as médias de temperatura simuladas e as cargas de resfriamento da zona obtidas na simulação, nos dois cenários.

3.2.7 Simulação B

A simulação foi realizada através do *software* Autodesk Revit®, utilizando a mesma modelagem da Etapa 1, diferenciando-se apenas pela atualização da data inicial e final da simulação inserida no programa. Nesta etapa, o modelo passou a considerar especificamente o período corresponde a coleta de dados realizada, assegurando que as condições simuladas refletissem com maior fidelidade o contexto do monitoramento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, será discutido os resultados da simulação da Etapa 1. Em seguida, será apresentado a discussão da Etapa 2, incluindo calibração dos sensores, validação do modelo simulado, avaliação da eficiência da cortina verde e elaboração das cartas bioclimáticas, evidenciando o impacto da vegetação sobre o conforto térmico e confiabilidade da plataforma BIM.

4.1 ETAPA 1

A execução das simulações nas duas situações – sem e com a presença da cortina verde – proporcionou valores de umidade média do ambiente e carga de resfriamento da zona, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados simulação A.		
SIMULAÇÃO	UMIDADE MÉDIA (%)	CARGA DE RESFRIAMENTO DA ZONA (W)
Sem cortina	55,08	7994,08
Com cortina	55,18	7974,30

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Os resultados indicam que a cortina verde proporcionou uma redução de 19,78 W na carga de resfriamento da zona, associada a um aumento de 0,10% na umidade interna do ambiente. Essa redução evidencia a capacidade da cortina verde de reduzir a temperatura interna, exigindo menos energia para manter o conforto térmico, especialmente em períodos de maiores insolação. Os resultados ressaltam a correlação entre a densidade da vegetação, a orientação da fachada e os ganhos de conforto percebidos pelos usuários da edificação.

A comparação entre os resultados de umidade obtidos pelo *datalogger* e os dados da simulação sem cortina revelou uma proximidade significativa, com pequenas diferenças que podem ser atribuídas

a limitações do modelo, que não contempla todas as variáveis reais, como calor gerado por lâmpadas e equipamentos eletrônicos.

Tabela 4. Comparativo de umidade média.

ELEMENTO DE ANÁLISE	UMIDADE MÉDIA (%)
<i>Datalogger</i>	59,20
Simulação sem cortina	55,18

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

4.2 ETAPA 2

A simulação realizada na Etapa 1 indicou o potencial de redução térmica associada à cortina verde. Entretanto, o monitoramento foi ampliado para obtenção de dados estatísticos mais vigorosos, permitindo validar o uso da plataforma BIM com dados mais próximos das condições reais dos usuários da biblioteca.

4.2.1 Calibração e testes preliminares

Os resultados da calibração apresentados na Tabela 5 demonstram que todos os sensores apresentaram erro absoluto médio (EA) inferior a $\pm 0,1$ °C para temperatura e inferior a $\pm 1\%$ para umidade relativa, valores amplamente dentro dos limites definidos pela ISO 7726:2025, que estabelece tolerância máxima de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ para temperatura e $\pm 5\%$ para umidade relativa em medições ambientais. Além disso, os coeficientes de correlação (*r*) entre os sensores e o *datalogger* variaram entre 0,80 e 1,00 para temperatura e entre 0,95 e 1,00 para umidade, indicando forte correlação e aderência de comportamento entre os instrumentos. Dessa forma, os resultados comprovam que os sensores confeccionados atendem aos critérios de confiabilidade e podem ser utilizados como instrumentos válidos para a coleta de dados higrotérmicos na Etapa 2.

Tabela 5. Resultados da análise estatística da calibração dos sensores.

SENSOR	EA TEMP (°C)	EP TEMP (%)	MAE TEMP (°C)	r TEMP	EA UR (%UR)	EP UR (%)	MAE UR	r UR
S1	0,05	0,19	0,05	0,80	0,31	0,54	0,31	0,95
S2	0,05	0,20	0,05	0,88	0,62	1,06	0,62	0,98
S3	0,01	0,05	0,01	1,00	0,10	0,18	0,10	0,99
S4	0,06	0,25	0,06	0,84	0,36	0,62	0,36	1,00
S5	0,03	0,11	0,03	1,00	0,30	0,50	0,30	1,00
S6	0,02	0,07	0,02	1,00	0,15	0,26	0,15	1,00
S7	0,04	0,17	0,04	1,00	0,58	0,99	0,58	0,98
S8	0,03	0,14	0,03	1,00	0,45	0,78	0,45	0,99

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

4.2.2 Tratamento estatístico e comparações

A Tabela 6 apresenta os valores médios de temperatura e umidade registrados por cada um dos oito sensores durante o período de dois meses de monitoramento contínuo. Esses valores representam

o comportamento térmico consolidado dos pontos medidos, permitindo análise estatística comparativa de desempenho entre sensores internos e externos, bem como entre as regiões sombreadas pela cortina verde e aquelas desprovidas de vegetação. A partir dessa base de dados, foram realizadas as comparações descritas nas subseções seguintes, com o objetivo de quantificar a influência da cortina verde sobre as condições térmicas do edifício e verificar a aderência entre os resultados da medição real e da simulação BIM.

Tabela 6. Média de cada grandeza analisada por sensor.

SENSOR	TEMP MÉDIA (°C)	UR MÉDIA (%)
S1	30,22	53,92
S2	27,95	63,55
S3	31,05	52,81
S4	28,42	60,19
S5	31,48	51,95
S6	28,60	59,15
S7	32,13	50,88
S8	28,74	58,02

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

4.2.2.1 Comparação ambiente externo vs. interno

Para compreender o comportamento térmico do edifício, foi obtida a média consolidada das temperaturas e umidades registradas pelos sensores externos e internos, conforme Tabela 7. Considerando que o ambiente interno é climatizado por sistema de ar-condicionado e o externo permanece em condição natural, essa comparação permite analisar o nível de dependência de arrefecimento mecânico.

Tabela 7. Diferença entre sensores externos e internos.

SENSORES	S1, S3, S5 e S7 (externos)	S2, S4, S6 e S8 (internos)	DIFERENÇA
TEMP MÉDIA (°C)	31,21	28,43	2,79
UR MÉDIA (%)	52,38	60,23	7,85

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A comparação entre os sensores externos e internos evidenciou uma diferença média de 2,79 °C na temperatura e 7,85% na umidade, indicando que o ambiente interno se manteve mais fresco e úmido ao longo do monitoramento. Os resultados demonstraram que na ausência de barreiras vegetais e sombreamento adequado, a biblioteca se comporta como um ambiente termicamente vulnerável, exigindo uso excessivo de arrefecimento mecânico para atingir condições de conforto, o que reforça a justificativa da cortina verde como alternativa de viés econômico e sustentável.

4.2.2.2 Comparação focal: eficiência da cortina verde

Observando a Tabela 8, a comparação entre os sensores localizados na área influenciada pela cortina verde (S1 externo e S2 interno) e aqueles posicionados na extremidade oposta da fachada (S7 externo e S8 interno), evidencia o efeito localizado da vegetação sobre o microclima da envoltória. Verificou-se que o sensor externo junto à cortina (S1) registrou temperatura média inferior à registrada no ponto descoberto (S7), indicando redução do aquecimento superficial induzido pela radiação solar direta.

No ambiente interno, a região sombreada pela vegetação (S2) apresentou temperaturas inferiores em relação ao ponto interno oposto (S8), sugerindo que a barreira vegetal atuou como elemento mitigador da transferência de calor através da envoltória. Ao mesmo tempo, as leituras de umidade relativa apresentaram aumento próximo à cortina, tanto no exterior quanto no interior, indicando maior retenção de umidade e formação de microclima mais favorável ao conforto térmico.

Tabela 8. Diferença entre cada grandeza analisada por sensor.

SENSOR	Δ TEMP (°C)	Δ UR (%)
S1 – S7	- 2,22	+ 3,92
S2 – S8	- 0,77	+ 3,65

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Esses resultados evidenciam que a presença da cortina verde exerce influência direta no alcance do conforto térmico, reduzindo o ganho térmico por radiação solar e atenuando a amplitude térmica na superfície externa do edifício. Esse comportamento reflete diretamente no ambiente interno, que se mostra menos dependente de ar-condicionado para manutenção de conforto térmico. Assim, confirma-se a efetividade da cortina verde como estratégia passiva de mitigação térmica em fachadas expostas ao sol.

4.2.2.3 Validação da plataforma BIM

Como a simulação BIM fornece condições internas do ambiente, a média dos dados de temperatura e umidade foram comparados com a média dos sensores internos (S2, S4, S6 e S8).

Tabela 9. Comparação entre dados medidos *in loco* e dados simulados no Revit®.

VARIÁVEL ANALISADA	MÉDIA MEDIDA PELOS SENSORES INTERNOS	MÉDIA SIMULADA NO REVIT (SEM CORTINA)	DIFERENÇA ABSOLUTA	DIFERENÇA PERCENTUAL (%)
Temperatura (°C)	28,43	28,35	0,08	0,28
Umidade relativa (%)	60,23	59,8	0,43	0,71

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Ao observar a Tabela 9, nota-se que as diferenças entre os valores medidos e simulados permaneceram abaixo de 1% tanto para temperatura quanto para umidade. Essa proximidade dos resultados indica que as simulações reproduzem com fidelidade as condições reais, validando o uso da plataforma BIM como ferramenta para realização de simulações termoeenergéticas e suporte à tomada de decisões estratégicas de vies sustentável.

4.2.2.4 Comparação entre cenários simulados: sem e com cortina verde

Para identificar o impacto térmico atribuído à cortina verde no ambiente construído, foram analisados os resultados de simulação BIM para os dois cenários modelados no Revit®: sem e com a presença da cortina verde. Foram obtidos valores de temperatura interna média, umidade média interna e carga de resfriamento da zona.

Tabela 10. Resultados por simulação.

SIMULAÇÃO	TEMP MÉDIA (°C)	UR MÉDIA (%)	CARGA DE RESFRIAMENTO DA ZONA (W)
SEM CORTINA	28,35	59,80	7989,01
COM CORTINA	26,14	61,35	7968,42

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Os resultados da Tabela 10 indicam que a cortina verde contribuiu com uma redução de 2,21 °C dentro do ambiente. Isso está associado ao sombreamento proporcionado pela vegetação, que reduz ganho de calor por radiação solar direta. Além disso houve redução de 20,59W na carga de resfriamento da zona, proporcionando um aumento de 1,55% na umidade interna do ambiente. Pela redução do valor da carga de resfriamento, entende-se que a cortina reduziu a temperatura do ambiente pois a simulação com cortina verde indica que o ambiente necessita de menos carga de resfriamento para garantir o conforto térmico. A implementação da cortina verde acarreta uma melhoria nos índices de conforto térmico, especialmente nos períodos de maior insolação. A discussão aborda a correlação entre a densidade da vegetação, a orientação das fachadas e os níveis de aumento do conforto térmico do usuário do ambiente.

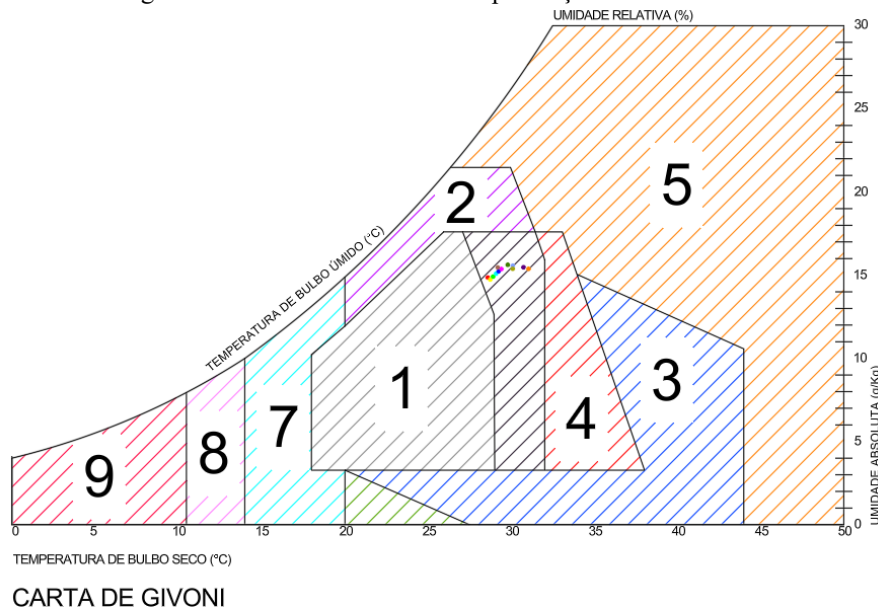
4.2.2.5 Cartas bioclimáticas para avaliação do conforto térmico

A Carta Bioclimática foi elaborada utilizando o *software* Autodesk AutoCAD®, permitindo correlacionar temperatura e umidade relativa para identificar as condições de conforto térmico. Cada ponto plotado na carta representa a intersecção entre a temperatura média e a umidade média de cada mês analisado, totalizando doze pontos na carta. Nela é possível ver as nove principais zonas bioclimáticas propostas por Givoni, as quais orientam a seleção de estratégia com base na condição hidrotérmica predominante, sendo elas: 1- zona de conforto, 2- zona de ventilação, 3- zona de

resfriamento evaporativo, 4- zona de massa térmica para resfriamento, 5- zona de ar-condicionado, 6- zona de umidificação, 7- zona de massa térmica para aquecimento, 8- zona de aquecimento solar passivo e 9- zona de aquecimento solar artificial.

A análise mostrou que, no cenário sem presença de cortina verde, diversos pontos situaram-se fora da zona de conforto, indicando tendência de superaquecimento do ambiente e baixa umidade relativa em determinados meses. Essas condições sugerem maior necessidade de arrefecimento mecânico para que o edifício alcance condições internas satisfatórias ao usuário (Figura 15).

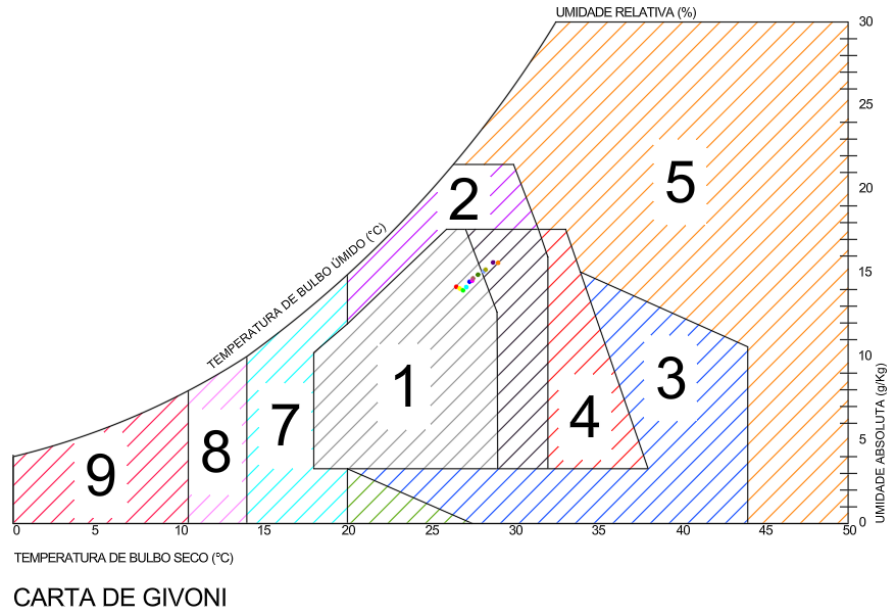
Figura 15. Carta Bioclimática sem presença de cortina verde.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Já no cenário com cortina, observou-se deslocamento dos pontos simulados em direção à zona de conforto, principalmente em meses de maior insolação, evidenciando o efeito mitigador da vegetação sobre o microclima (Figura 16).

Figura 16. Carta Bioclimática com a presença de cortina verde.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Essa análise permite identificar de maneira clara quais intervenções são mais eficazes para promover o conforto térmico, destacando a relevância de estratégias passivas, como ventilação cruzada, massa térmica e evapotranspiração vegetal, para ambientes construídos sujeitos a temperaturas elevadas.

Esses resultados estão alinhados com a classificação de Votuporanga-SP na Zona Bioclimática 6, conforme a NBR 15220 (ABNT, 2005), a qual recomenda o emprego de estratégias passivas como sombreamento de fachadas, massa térmica resfriada e resfriamento evaporativo, sendo todas compatíveis com o mecanismo do funcionamento da cortina.

Figura 17. Estratégias de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 1.

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

Fonte: ABNT NBR 15220, 2005.

Assim, a sobreposição das cartas bioclimáticas com o enquadramento normativo da ZB6 permite afirmar que a cortina verde atua como solução adequada, reduzindo o superaquecimento e melhorando as condições térmicas internas com menor dependência de climatização artificial em ambientes construídos.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos ao longo da pesquisa, verifica-se inicialmente que os sensores confeccionados apresentaram desempenho compatível com os *dataloggers* certificados, mantendo erros médios dentro dos limites propostos pela ISO 7726:2025 e ASHRAE (2017). Isso comprova a confiabilidade da instrumentação utilizada e valida o uso dos sensores para monitoramento térmico e de umidade na etapa ampliada de medição.

Em relação ao desempenho térmico da edificação, os resultados obtidos evidenciam que a cortina verde instalada e edifícios se configura como estratégia passiva eficiente para mitigação térmica. As medições *in loco* evidenciaram redução consistente de temperatura e elevação da umidade relativa do ar nas áreas sombreadas pela vegetação, comprovando seu efeito regulador sobre o microclima da envoltória. Esses comportamentos foram igualmente identificados nas simulações realizadas no Autodesk Revit®, que apresentaram valores próximos aos medidos por instrumentos reais, validando a confiabilidade da plataforma BIM como ferramenta de análise térmica aplicada em edifícios construídos.

A comparação entre cenários simulados demonstrou diminuição da carga térmica e das temperaturas internas quando a vegetação foi considerada, reduzindo a dependência de arrefecimento mecânico como meio de alcance do conforto térmico. As análises realizadas por meio das cartas bioclimáticas evidenciaram que, no cenário com cortina verde presente, um maior número de pontos se desloca para dentro ou próximo da zona de conforto, reforçando o potencial da vegetação enquanto elemento de resfriamento passivo.

Dessa forma, conclui-se que a cortina verde se mostra uma alternativa sustentável, de baixo custo, replicável em diferentes tipologias construtivas e climáticas, e que a modelagem BIM, quando devidamente parametrizada, se demonstra uma ferramenta precisa para avaliação térmica, podendo subsidiar tomadas de decisão sustentáveis com menor custo operacional e maior eficácia ambiental.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Prof. Dr. Guilherme Shoiti Ueda. e Prof. Dr. Eduardo De Pieri Prando pelo apoio científico, acompanhamento e contribuição fundamental para o amadurecimento dessa pesquisa; ao Prof. Dr. André Luis Gobbi Primo pela colaboração na criação dos sensores e à Profa. Dra. Naiara Luchini de Assis Kaimoti que me apresentou a pesquisa sobre sustentabilidade.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Campus Votuporanga pelo estímulo e apoio ao PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica) do órgão CNPq e ao PIBIFSP (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica) do programa

do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), os quais viabilizaram a realização dessa pesquisa com apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, A. M. F.; CRIPPA, J.; UEHARA, L. K. S.; LOPES, T. V.; SCHEE, S. Interoperabilidade de ferramentas BIM e avaliação do ciclo de vida de edificações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 1. e 10., 2017, Fortaleza, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-3: desempenho térmico de edificações parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASHRAE. ASHRAE Handbook: fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. Estatística básica. 8. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.
- CORBELLA, O.; CORNER, V. Manual de arquitetura bioclimática tropical. Rio de Janeiro: Revan, 2011.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. Manual de conforto térmico. 8. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2009.
- GONÇALVES, L. Utilização de plataforma BIM como instrumento comparativo na eficiência energética com cortina verde aplicada em edifício construído. REGRASP, São Paulo, v. 6, n. 4, dez. 2021.
- ISO 7726: ergonomics of the thermal environment — instruments for measuring physical quantities. Geneva: International Organization for Standardization, 2025.
- KYOCERA GROUP. What is a green curtain? [S.l.]: Kyocera, [201-].
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência energética na arquitetura. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.
- MAGNO, C. P. M.; KAIMOTI, N. L. A.; VALDAMBRINI, A. C. O conforto térmico da cortina verde. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO IFSP – CONICT, 8., 2017, Cubatão. Anais [...]. Cubatão: IFSP, 2017.
- MASCARÓ, L.; MASCARÓ, J. Energia na construção. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2009.
- TAVARES, A.; LEÔNCIO, D. T. C. Estudo e avaliação das propriedades térmicas de coberturas verdes utilizando o gênero Commelina. Nova Friburgo: [s.n.], 2017.
- VALDAMBRINI, A. C. Cortina verde: uso de vegetação como fator de conforto térmico em edificações do IFSP-Votuporanga. 2014. Relatório de Iniciação Científica Institucional (Técnico em Edificações). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Votuporanga, 2014.