

Simulação numérica de parede verde em edificação verticalizada para o clima de Belo Horizonte

Numerical simulation of a green wall in a vertical building for the Belo Horizonte climate

Lucas Thadeu da Silva Ramos, MSc; CEFET-MG

lucasramoscivil@gmail.com

Rogério Cabral de Azevedo, Dr; CEFET-MG

rogeriocabral@cefetmg.br

Raquel Diniz Oliveira, Dra; CEFET-MG

raqueldiniz@cefetmg.br

Augusto Cesar da Silva Bezerra, Dr; CEFET-MG

augustobezerra@cefetmg.br

Resumo

Os impactos da ação humana ocasionam resultados climáticos perceptíveis, demandando, portanto, esforços globais para otimização da eficiência energética das edificações. Este trabalho avalia uma proposta de condicionamento térmico passivo com o uso de um Sistema Vegetado Vertical (SVV) simulado computacionalmente pelo método simplificado de *BuildingShadingObject*. Uma edificação verticalizada de uso escolar, localizada em Belo Horizonte foi selecionada como objeto de estudo. As temperaturas operativas dos ambientes sob a influência do SVV na simulação alcançaram reduções de 14%, com redução média de 1°C, corroborando os resultados da literatura, demonstrando a viabilidade de uso do método para este tipo de análise.

Palavras-chave: Sistema Vegetado Vertical (SVV); Condicionamento ambiental; Simulação numérica; Amortecimento térmico.

Abstract

The anthropic actions leading to climate impacts demand global efforts to optimize building energy efficiency. This research evaluates a proposal for a passive cooling strategy using a Vertical Greenery System (VGS) through the simplified numerical simulation method of BuildingShadingObject. The object study was a school building, mostly vertical, located in Belo Horizonte. The results showed a 14% reduction in room temperatures when under the influence of VGS, presenting an average reduction of 1°C, which is supported by the literature and demonstrates the efficiency of this kind of method.

Keywords: Vertical Greenery System (VGS); Cooling strategy; Numerical simulation; Thermal damping

1. Introdução

A expansão urbana apresenta forte correlação com a construção civil, sendo esta uma atividade humana primordial. Portanto, os reflexos das ações humanas em sua expansão pelo planeta têm apresentado resultados cada vez mais perceptíveis em relação às mudanças climáticas, dada a maior demanda de produtos e serviços [1-3]. Dentre esses impactos, o fenômeno das Ilhas de Calor (IC) recorrentemente afetam as cidades, causando impacto na vida de seus cidadãos, sendo que a concentração da população em áreas urbanas os torna mais graves. A existência das IC's pode causar problemas como a degradação da qualidade do ar. A formação de áreas poluídas leva à elevação do stress térmico das edificações, bem como o aumento do risco doenças relacionadas ao calor, como desidratação e arritmia cardíaca [4].

A questão da elevação das temperaturas ambientais tem sido objeto de atenção da engenharia e arquitetura, com a busca de novas tecnologias aplicáveis ao setor da construção, visando a melhoria da eficiência das edificações. Entre as tecnologias detectadas como possíveis alternativas para o enfrentamento da elevação das temperaturas ambientais, observa-se que a recuperação e adaptação de estratégias passivas de aclimatação demonstram benefícios. A reinserção de elementos verdes na infraestrutura urbana por meio de Sistemas Vegetados Verticais (SVV's) é uma delas. A capacidade de redução da temperatura superficial de fachadas, proporcionada por SVV's, pode implicar em redução do consumo energético das edificações, bem como na filtragem de poluentes no ar e a melhoria no potencial de sequestro de carbono das edificações, atenuando efeitos das IC's [5-8].

Uma cidade mais adensada, devido à tendência de migração da população rural para o ambiente urbano [9] tende a ser mais verticalizada, sendo assim mais propícia a sofrer impactos de fenômenos climáticos como as IC's. Nesse contexto, a aplicação de estratégias como SVV's se destaca, dada à grande disponibilidade de área para a implantação deste tipo de solução nestes ambientes, que apresentam características que favorecem sua introdução [10].

Dadas as muitas especificidades construtivas, cuidados e manutenção destas estruturas vivas, o campo de pesquisas experimentais está em desenvolvimento constante, ainda mais quando consideram-se as diferenças de resultados proporcionados por espécies e climas diferentes [11]. Esta barreira tem sido mitigada com a implementação de simulações computacionais de edifícios, uma vez que são ampliadas as possibilidades de desenvolvimento de pesquisa de simulação numérica sobre os SVV's alternativamente à pesquisa prática [12,13]. Contudo, existem entraves no processo da pesquisa por simulação, como a necessidade de simplificação do processo de amortecimento térmico, a ausência de parâmetros que representem a grande variedade de plantas e climas existentes, variações e diversidades de métodos e *softwares* disponíveis para este fim, o que pode dificultar a comparação dos resultados para análise [11,13,15,16]. Ainda que existam tais limitações ao processo de simulação, este método segue sendo utilizado por ser capaz de apresentar modelos e esquemas que podem permitir o direcionamento de pesquisas práticas e o próprio desenvolvimento de empreendimentos, dada a facilidade de sua adaptação, correção e reprodução, o que permite análises prévias ao investimento de recursos no desenvolvimento de projetos e pesquisas.

Este trabalho abordou a eficiência energética de edificações associada à implementação de sistemas vegetados verticais em empreendimentos verticalizados analisados por meio da aplicação de uma metodologia de simulação numérica. Com isso pôde-se investigar o impacto do modelo baseado em sombreamento sobre a temperatura de ambientes construídos e comparar os resultados obtidos com a literatura.

2. Procedimentos Metodológicos

Este trabalho foi desenvolvido como uma pesquisa quantitativa, se valendo do objeto definido para estudo, uma edificação primariamente verticalizada, apresentado no **Item 2.1**, onde obteve-se os dados para o desenvolvimento do estudo de caso, que foram tratados estatisticamente para avaliar a robustez dos resultados obtidos.

O desenvolvimento do trabalho se deu conforme o fluxograma apresentado em **Figura 1**.

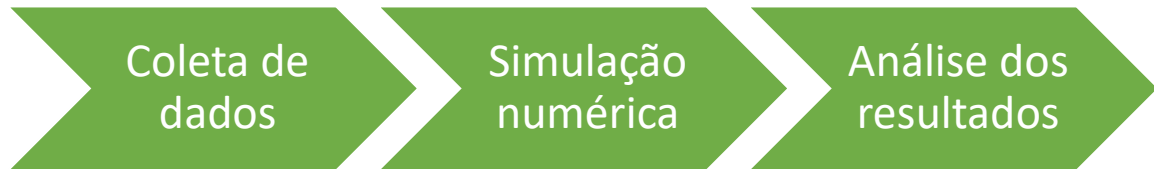


Figura 1: Método de procedimento. Fonte: elaborado pelos autores.

2.1 Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada no Prédio 18 do Campus Nova Gameleira do CEFET-MG (**Figura 2**), sendo este uma edificação verticalizada de uso educacional que apresenta seções inteiras de sua fachada sem abertura na dimensão vertical, com orientação voltada para noroeste, com recebimento de radiação solar direta. O edifício escolhido encontra-se no bairro Nova Gameleira, em Belo Horizonte, MG, cidade classificada conforme Köppen-Geiger como sendo Cwb [18] e localizada na zona bioclimática número 3 (ZB3), conforme NBR 15.220/2 [17], sendo este o método considerado na avaliação, uma vez que a proposta de um novo zoneamento bioclimático seguia em discussão pela ANTAC. Este prédio apresenta uso variado, contendo salas de aula, ambientes de estudo, salas de reunião, gabinetes de professores e laboratórios de análises de materiais. O prédio 18 possui área construída total superior à 1000m² dividida em 4 pavimentos, com fachada principal voltada para noroeste apresentando grandes seções verticais sem abertura. O edifício selecionado encontra-se localizado nas coordenadas 19°56'24" S, 43°59'57" O, com seu primeiro pavimento na elevação de 914m (**Figura 3**).

Para a coleta de dados foram utilizados equipamentos conforme indicados pela literatura [7,19-21] e disponibilidade do grupo de pesquisa, a saber: *data loggers*, do modelo HOBO onset U12-012, estes equipamentos foram testados conjuntamente a um medidor de stress térmico em ambiente controlado. O teste foi feito com um termômetro globo do modelo TGD-300. Este procedimento foi realizado para a aferição da calibração dos 4 dispositivos *data loggers* para a coleta de temperatura, sendo estes instalados em um mesmo ambiente que o termômetro, previamente calibrado por empresa especializada, donde verificou-se que a variação de diferença nas temperaturas observadas entre os *data loggers* e o termômetro globo não foram consideradas estatisticamente relevantes pelos testes de ANOVA e Tukey. Para a obtenção dos valores de absorvância da fachada externa foi utilizado um espectrômetro, modelo Alta II, capaz de medir refletância espectral e 11 comprimentos de onda (de 470nm a 940nm).

O processo de coleta ocorreu entre os dias 18 de novembro de 2020 e 02 de dezembro de 2020, período em que a edificação não se encontrava em uso, dada a restrição de funcionamento da instituição durante a pandemia de SARS-CoV-2. Nesse período de 14 dias foram coletados dados de temperatura e umidade relativa do ar a cada 15 minutos. Quatro aparelhos medidores, *data loggers*, foram instalados no prédio objeto de estudo. Seu posicionamento está apresentado pela **Figura 4**.



Figura 3: Localização do objeto de estudo. Fonte: elaborado pelos autores.



Figura 3: Localização do objeto de estudo. Fonte: Google Earth Pro (2019).

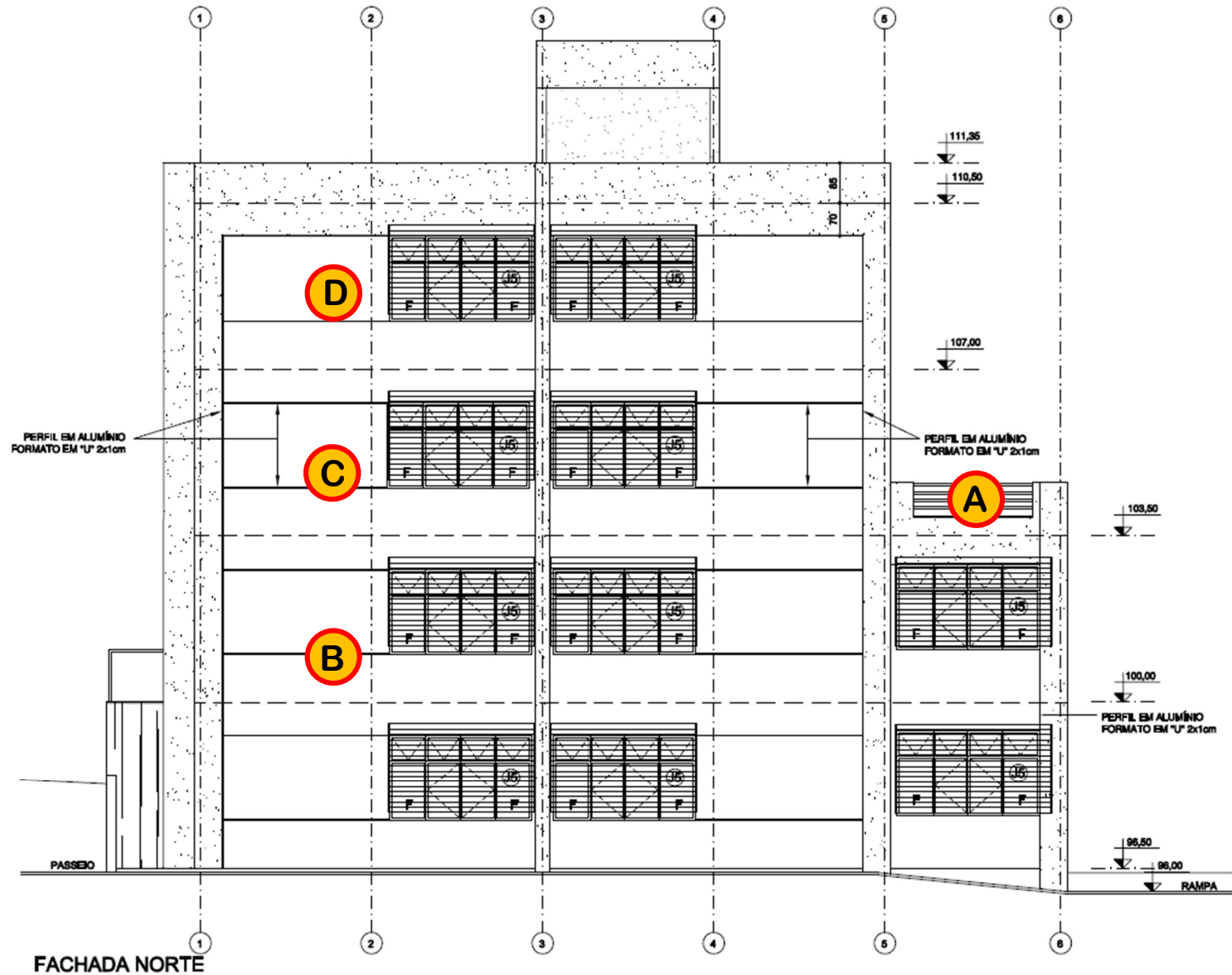


Figura 4: Posicionamento dos *data loggers*. Fonte: elaborado pelos autores.

Devido ao contato com o solo, não foi instalado medidor no pavimento térreo, pois a interação com o solo causaria discrepância com os dados dos outros pavimentos [22,23]. Os *data loggers* B, C e D foram instalados à 1,50m, nos centros dos ambientes que seriam afetados primariamente pela implementação do SVV, devido a posição da fachada cega. O *data logger* A foi posicionado externamente para a obtenção de dados para a criação do arquivo climático de calibração do modelo, sendo instalado à 1,00m de altura em um abrigo externo o qual foi construído conforme comunicado técnico 345 da Embrapa [24].

2.2 Simulação numérica

A simulação numérica representou as trocas energéticas ocorridas no modelo, por meio de suas iterações do processo computacional, realizadas no edifício modelado computacionalmente, visando a geração de resultados, ou ‘saídas’ específicas, relacionadas à análise térmica da situação a ser reproduzida [25,26]. Este processo foi iniciado com a modelagem do objeto a ser simulado. Para o desenvolvimento da modelagem do objeto de estudo foram utilizados os *softwares SketchUp* em sua versão *make* 2017, por ser uma versão gratuita e com boa estabilidade na aplicação conjunta com *softwares* de simulação energética. Esta modelagem foi realizada tridimensionalmente, em conformidade com os parâmetros da edificação original (**Figura 5 a**), bem como do seu entorno (**Figura 5 b**), uma vez que a disposição dos demais elementos ao redor do objeto de estudo implica em variabilidade do resultado pretendido.

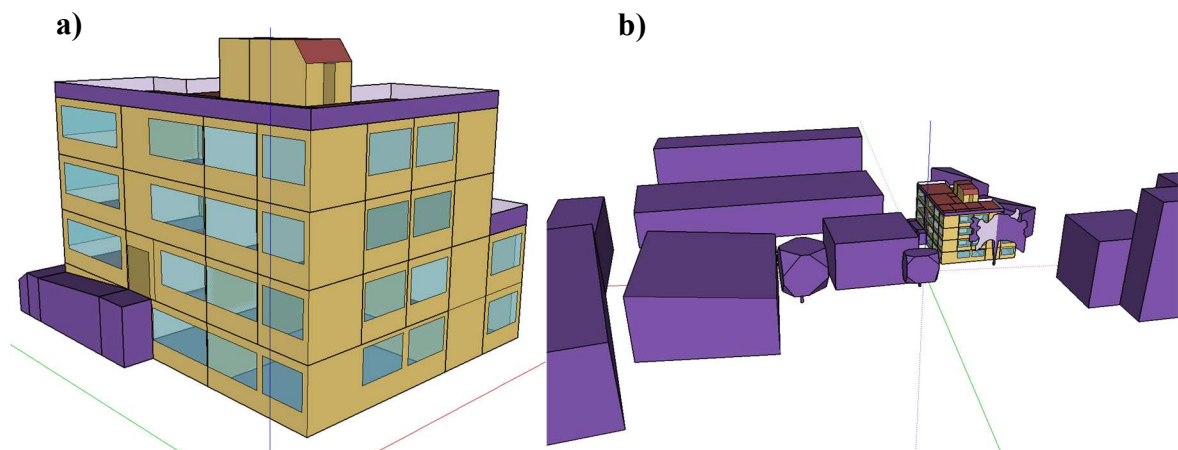


Figura 5: Modelo tridimensional do objeto de estudo (a) e de seu entorno (b). Fonte: elaborado pelos autores.

Com o modelo tridimensional pronto, foi feita sua exportação para o *software* de simulação energética onde foram inseridos os dados referentes aos componentes construtivos, rotina de uso, iluminação, consumo energético e ventilação. Para esta etapa foi utilizado o *software EnergyPlus* em sua versão 8.7, o qual é um programa de simulação numérica desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, de licença livre. Os valores dos dados dos sistemas construtivos têm origem na NBR 15.220/2? [17], conforme **Quadro 1**. A definição dos materiais expressos no **Quadro 1** foi obtida de memoriais descritivos do objeto de estudo, avaliação dos projetos arquitetônicos e investigação *in loco*.

Quadro 1: Dados dos componentes construtivos.

Materiais	Propriedades				
	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m ³]	Calor Específico (J/(kg.K))	Resistência Térmica [m ² .K/W]
Argamassa comum	0,030	1,150	2000,000	1000,000	0,026
Cerâmica	VARIÁVEL	1,000	1138,380	920,000	VARIÁVEL
Concreto	VARIÁVEL	1,750	2400,000	1000,000	VARIÁVEL
Gesso (placa)	0,020	0,350	900,000	840,000	0,057
Madeira	0,030	0,150	600,000	1340,000	0,200
Manta asfáltica	0,007	0,230	1000,000	1460,000	0,030
Poliestireno expandido	0,025	0,040	15,000	1420,000	0,625
Poliestireno extrudado	0,002	0,035	25,000	1420,000	0,057
Vidro	0,004	1,000	2500,000	0,840	0,004
Ar	VARIÁVEL	0,026	-	-	0,170 ou 0,210

Fonte: Autores.

Após a caracterização do modelo no software de simulação numérica, o modelo foi calibrado visando assegurar a conformidade dos dados aplicados às predições de modelagem matemática. Foi selecionado um período de dados de temperatura e realizou-se a comparação entre as temperaturas registradas na coleta e aquelas que forma resultados do teste para a calibração. A análise de similaridade dos dados comparados foi realizada pelo teste de T-Student, após a verificação da normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk. Confirmada a variação entre os dois tipos de dados de temperatura, simulada e medida, seguiu-se com a adequação dos parâmetros dos elementos constituintes do modelo a ser simulado, sendo eles: densidade, absorvância solar, espessura, condutividade, calor específico, rugosidade, absorvância visível e absorvância térmica. Estes parâmetros foram adequados iterativamente, conforme **Tabela 1**, em avaliações sucessivas de: valor de diferença média, coeficiente de variação da raiz quadrada do erro quadrático médio, erro absoluto médio e coeficiente de correlação de Pearson.

Tabela 1: Registros dos parâmetros na calibração.

Parâmetro	Alteração	Diferença média	MBE	CV RMSE	Pearson	Mantido
Modelo inicial	-	1,33°C	4,42%	5,86%	0,8529520	-
Densidade	+ 10%	1,29°C	4,47%	5,73%	0,8420547	Sim
	- 10%	1,36°C	4,32%	5,99%	0,8639895	Não
Absorvância solar	+ 0,1	1,17°C	3,44%	5,17%	0,8399250	Sim
	- 0,1	1,46°C	5,54%	6,46%	0,8440897	Não
Espessura	+ 10%	0,98°C	3,09%	4,42%	0,8083566	Sim
	- 10%	1,37°C	3,73%	6,01%	0,8783991	Não
Condutividade	+ 10%	1,02°C	3,31%	4,61%	0,8057520	Não
	- 10%	1,40°C	5,37%	6,05%	0,8017545	Não
Calor específico	+ 10%	0,92°C	3,06%	4,23%	0,7987840	Sim
	- 10%	1,03°C	3,09%	4,63%	0,8199254	Não
Rugosidade	Aumento	0,92°C	3,07%	4,24%	0,7987736	Não
	Redução	0,82°C	2,23%	3,76%	0,7928480	Sim
Absorvância visível	+ 0,1	0,82°C	2,23%	3,76%	0,7928480	Não
	- 0,1	0,82°C	2,23%	3,76%	0,7928480	Não
Absorvância térmica	+ 0,1	1,10°C	2,91%	5,62%	0,7931625	Não
	- 0,1	0,75°C	1,51%	3,44%	0,7934771	Sim

Fonte: Autores.

Com o atingimento de uma diferença média de 0,75°C, erro absoluto médio de 1,51%, coeficiente de variação da raiz quadrada do erro quadrático médio de 3,44% e coeficiente de relação linear de Pearson de 0,79, o modelo foi considerado calibrado. Em seguida o mesmo foi validado por meio de uma conjunção do método de validade de evento e a validação multi-estágio conforme descrito por Sargent [27]. Analisaram-se 14 variações, considerando os diferentes ambientes de medição de temperatura e diferentes períodos.

2.3 Modelagem do SVV

Após a validação do modelo calibrado, seguiu-se com a modelagem do SVV via *SketchUp + EnergyPlus*, utilizando-se o método *BuildingShadingObject* (BSO) conforme proposto por Larsen et al. [28]. Os elementos de SVVs foram adicionados ao modelo como elementos de sombreamento com valores de refletância solar e visível conforme proposto pela literatura para paredes verdes, sendo $\rho_{solar} = 0,3$ e $\rho_{vis} = 0,05$, respectivamente [29]. Além disso, foram adequados parâmetros relativos à recepção da radiação pela superfície [28] e foi inserido um cronograma de fechamento do elemento para atuar conforme a alternância das estações, implicando em maior ou menor taxa de sombreamento conforme período do ano.

O método BSO utilizado apresenta, como estrutura de conversão do SVV em um elemento do modelo computacional, a Inserção de um elemento externo ao fechamento vertical da envoltória da edificação, alvo da aplicação do SVV. Este elemento externo operará como uma barreira para a radiação solar, simulando um elemento de sombra. O elemento recebe características térmicas que repliquem a ação de um SVV real, como sua refletância solar e visível, bem como sua transmitância solar no fator de faceamento externo e o desenvolvimento de um cronograma (**Tabela 2**) para atuar como percentual de fechamento do SVV dadas as alterações da folhagem ao longo das estações do ano, causando impacto na taxa de sombreamento.

Tabela 2: Dados aplicados ao *software* para simulação do ciclo da folhagem nas estações.

Período	Through: 03/20	Through: 06/20	Through: 09/20	Through: 12/20	Through: 12/31
Dias	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Limite	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00
Espaçamento ¹	0	0.2	0.3	0.1	0

Fonte: Autores.

3. Resultados

A etapa de simulações teve início com a conclusão da implementação do SVV no modelo calibrado. Os cenários simulados baseiam-se em um modelo representativo da situação do edifício quando da coleta dos dados, ou seja, sem uso e ocupação, devido à pandemia mundial de Sars-CoV-2. Estes cenários foram simulados com e sem a implementação do SVV com a utilização de um arquivo climático ajustado para pesquisa, considerada as atualizações necessárias nos dados disponíveis pelo INMET. O arquivo utilizado é do tipo *Solar and Wind Energy Resource Assessment - SWERA*, atualizado no ano de 2018 pelo LabEEE. O ajuste do arquivo climático, apresentado na **Tabela 3**, se deu com o uso de dados provenientes de uma estação do INMET próxima à localização do objeto de estudo.

¹ A taxa de espaçamento funciona como um valor percentual de abertura em uma superfície. Um valor de 0 implica em uma superfície completamente opaca e um valor de 1 implica em uma superfície completamente transparente.

Tabela 3: Dados aplicados ao *software* para simulação do ciclo da folhagem nas estações.

Parâmetro alterado	Origem dos novos dados
Temperatura de bulbo seco [°C]	Estação meteorológica automática F501
Pressão atmosférica [kPa]	Estação meteorológica automática F501
Umidade relativa [%]	Estação meteorológica automática F501
Radiação solar global [Wh/m ²]	Estação meteorológica automática F501
Radiação solar direta [Wh/m ²]	Calculado pelo algoritmo do <i>EnergyPlus</i>
Radiação solar difusa [Wh/m ²]	Calculado pelo algoritmo do <i>EnergyPlus</i>
Velocidade do vento [m/s]	Estação meteorológica automática F501

Fonte: Autores.

Visando replicar a situação do prédio em um primeiro cenário, foram eliminadas as trocas de ar com o meio externo, durante a simulação do mesmo, por meio da alteração do método de fluxo de ar. Também não foram inseridos quaisquer dados de uso de equipamentos, iluminação e circulação de usuários, fazendo com que a simulação não realizasse cálculos relativos a estes impactos na temperatura do edifício. Estas decisões foram feitas com base na situação real do objeto de estudo quando da coleta de dados *in loco*. Portanto refletem este momento de avaliação. Contudo é importante destacar que em uma situação de simulação do uso regular da edificação, os impactos da existência de trocas de ar, uso de equipamentos e iluminação e circulação de usuários, pode gerar impactos que diverjam dos resultados obtidos quando da exclusão desses parâmetros.

No cenário com a introdução do SVV foram observadas taxas de redução de temperatura entre 9% e 14% para os diferentes ambientes. Estas reduções estão resumidas na **Tabela 4**.

Tabela 4: Relações entre temperaturas operativas com e sem presença do SVV.

Ambiente	Diferença média	Redução mínima	Redução máxima
B	0,96°C	0,36°C	1,66°C
C	0,94°C	0,40°C	1,61°C
D	0,81°C	0,29°C	1,46°C

Fonte: Autores.

A instalação do SVV apresentou impacto nos resultados de temperatura para todos os andares avaliados na simulação ao longo do período proposto para a simulação, conforme apresentado na **Figura 6**.

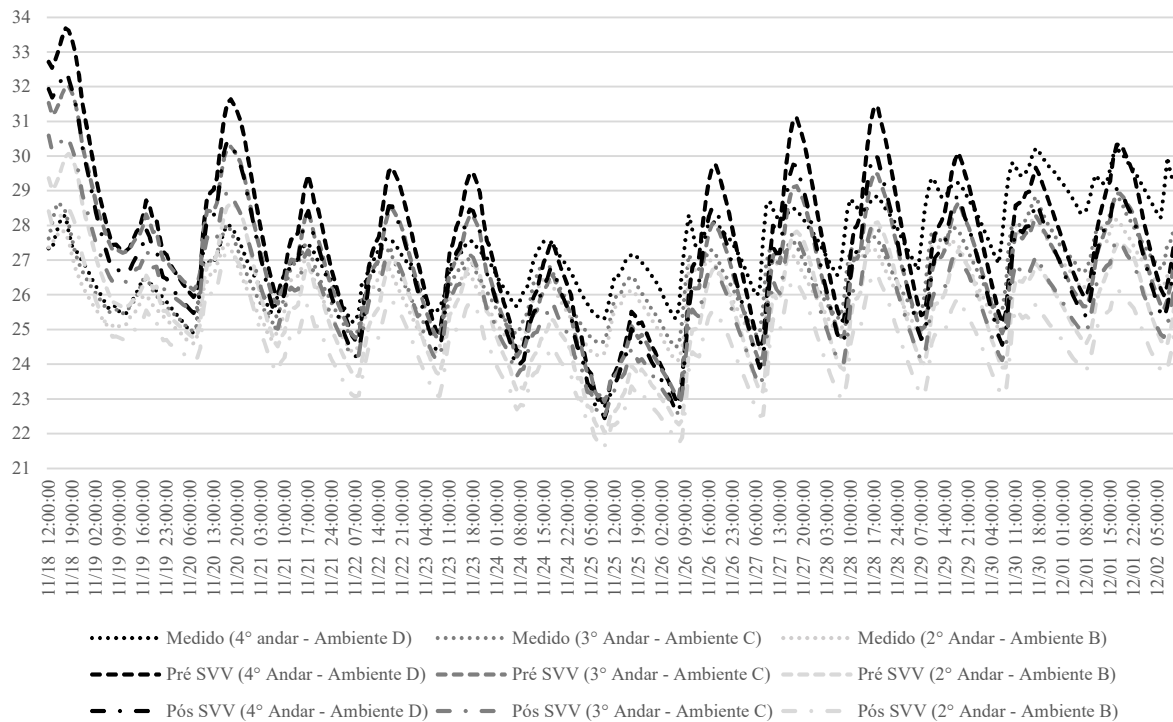


Figura 6: Temperaturas operativas medidas e simuladas. Fonte: elaborado pelos autores.

Uma avaliação dos resultados de temperatura foi performada no *software* R para verificação de suas médias, conforme **Figura 7**. Nota-se que a aplicação do SVV implicou em redução na média de temperatura em todos os ambientes simulados. Estas reduções foram verificadas pela comparação dos dados de quartis, mediana e valores mínimos e máximos.

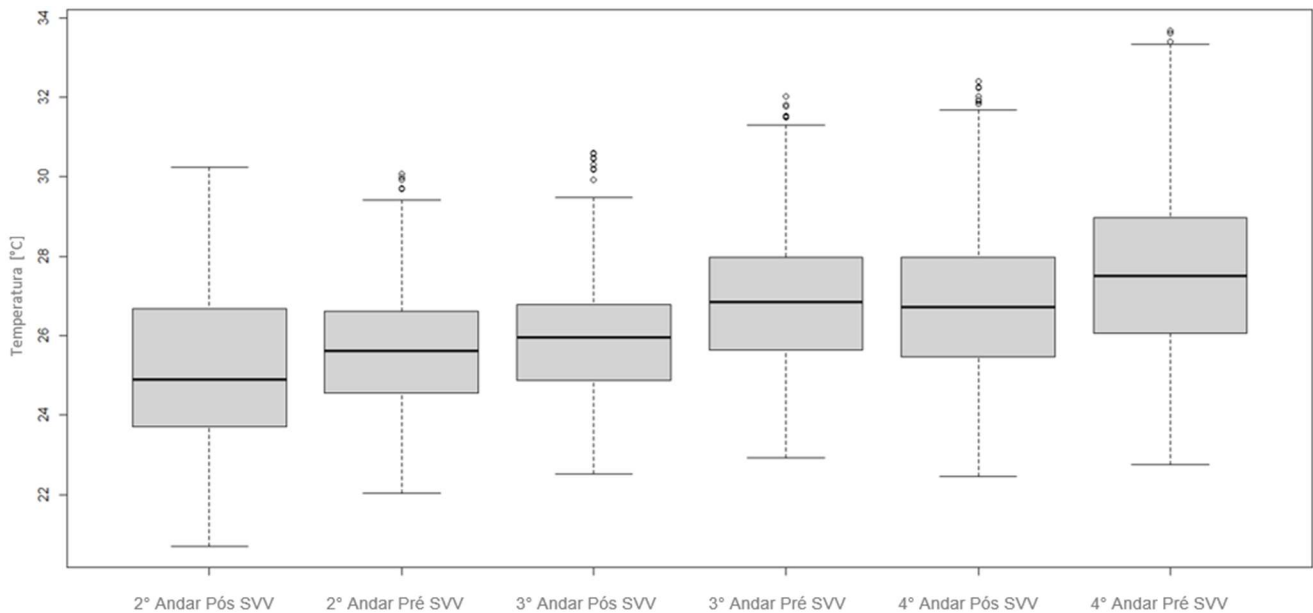


Figura 7: Box-plot, via *R software*, dos resultados de temperatura simulados. Fonte: elaborado pelos autores.

4. Análises dos Resultados

A simulação demonstrou que a introdução do SVV produziu a uma redução nos valores de temperatura dos ambientes, sendo que todas as médias de temperatura foram reduzidas para o período avaliado. Percebeu-se que o 4° pavimento, onde localizou-se o ambiente D, sofreu com maiores variações durante as simulações devido ao fato de que a cobertura externa da edificação, existente no mesmo pavimento, sofre muita influência da radiação solar. Por este motivo, na avaliação do amortecimento térmico dos ambientes, apresentado na **Tabela 5**, o seu coeficiente de amortecimento não foi calculado e a própria taxa de amortecimento do ar é significativamente menor do que a dos demais ambientes, resultado da influência da radiação solar sobre a cobertura. O que reduz a eficácia do SVV para esta situação, como percebido pelos resultados na **Tabela 5**.

Tabela 5: Resultados de amortecimento térmico.

Ambiente	Coeficiente de amortecimento μ		Amortecimento médio do ar	
	Pré SVV	Pós SVV	Pré SVV	Pós SVV
B	0,22	0,46	35%	44%
C	0,15	0,38	26%	34%
D	-	-	11%	19%

Fonte: Autores.

Dentre os ambientes simulados, o Ambiente B (2° pavimento) apresentou elevado ganho de eficiência para o amortecimento médio do ar. Isto pode ser devido à fatores como a proximidade com o solo, maior taxa de sombreamento proporcionado pelo entorno à pavimentos inferiores, contudo, mesmo esses fatores sendo preponderantes, a influência da ação do SVV pode ser percebida dado o aumento percebido no amortecimento médio, entre 25% e 70% para os ambientes investigados. Ainda pode-se considerar que o processo de circulação interna do ar em processo de convecção fará com que massas de ar quentes se desloquem para cima, forçando esta tendência e ainda pela maior proximidade com o pavimento térreo, dada a capacidade de regulação de temperatura do solo.

Observou-se que os resultados obtidos na simulação do objeto de estudo com a implementação do SVV foram comparáveis aos resultados de experimentos práticos da literatura [30-33], onde se apresentam reduções de temperatura na ordem de 1°C a 2°C, conforme **Tabela 6**. Assim demonstrando que o método de simulação de SVV's, via *software Energyplus* com o uso do método de simplificação do tipo *BuildingShadingObject* proposto por Larsen et al. [28], apresenta-se como uma alternativa viável para a simulação térmica de SVV's. Esta aproximação é corroborada pela coerência entre características climáticas gerais da maioria das localidades dos experimentos da literatura e desta pesquisa.

Tabela 6: Influencia do uso de SVV na temperatura.

Referência	Ano	Redução de temperatura do ar [°C]	Localidade	Tipo de trabalho
[30]	2014	1,00	Puigverd de Lleida / Espanha	Experimental
[31]	2023	1,00	Singapura	Experimental
[32]	2017	2,10	Genova / Itália	Experimental
[33]	2017	1,40	Rio de Janeiro / Brasil	Experimental

Fonte: Autores.

5. Conclusão

Este trabalho objetivou avaliar o amortecimento térmico de um edifício por meio de um método de simulação numérica. Para tal foram coletados dados, conforme recomendado pela literatura e selecionou-se um método para a modelagem, calibração, validação e simulação do objeto de estudo deste trabalho, uma edificação de quatro pavimentos, com formato primordialmente paralelepípedo. A simulação apresentou temperaturas menores nos ambientes mais próximos ao solo, o que reforça a capacidade da inércia térmica do solo para o controle de temperatura das edificações, especialmente as de preponderância horizontal. Em edificações de predomínio vertical, esta propriedade do solo terá menor influência devido a alteração geométrica que levará a grande preponderância de áreas de fachada impactadas pela radiação solar, o que leva à necessidade da aplicação de outras estratégias de arrefecimento. Neste caso vê-se a vantagem na utilização de estratégias como a dos SVVs, uma vez que houve corroboração dos dados da literatura pelos resultados da simulação.

Os resultados observados pela simulação neste trabalho, contando com reduções de temperatura do ambiente entre 1°C e 2°C, são corroborados por resultados experimentais de localidades diversas, conforme observado na literatura. Sendo assim, percebe-se que é possível que se utilizem métodos de simulação computacional, como o apresentado neste trabalho, como ferramenta de avaliação de impactos de eficiência energética de edificações para a avaliação do impacto da implementação de SVV's em edifícios.

Os resultados apresentados para esta pesquisa são referentes apenas à simulação de SVV's e consideram apenas os aspectos de redução de temperatura em ambientes internos do objeto de estudo. Recomenda-se que sejam feitos estudos comparativos com métodos de sombreamento inorgânico, como brises, para a comparação dos ganhos proporcionados. Contudo a implementação de SVV's apresentam ganhos de aclimatação de ambientes externos, melhoria de umidade e fluxo de ar, purificação atmosférica e bem-estar, que não foram avaliados neste trabalho, mas são apresentados nas literaturas utilizadas nesta pesquisa. Sendo assim, há uma rede complexa de 'vantajosidade' que se faz necessária ao comparar um sistema vivo, mas oneroso, com um sistema estéril, especialmente considerando os impactos causados pelos ambientes urbanos dentro da sustentabilidade da vida humana no planeta.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) por seu apoio com infraestrutura de e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo de produtividade em pesquisa [Convênio: PQ316846/2023-6], bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

- [1] GUPTA, R.; GREGG, M. Using UK climate change projections to adapt existing English homes for a warming climate. *Building and Environment*, v. 55, p. 20–42, 2012.
- [2] F. POMPONI et al., “A Novel Method for Estimating Emissions Reductions Caused by the Restriction of Mobility: The Case of the COVID-19 Pandemic,” *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 1, pp. 46–52, 2021
- [3] YU, R.; ZHAI, P.; CHEN, Y. Facing climate change-related extreme events in megacities of China in the context of 1.5°C global warming. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 30, p. 75–81, 2018.
- [4] MOHAJERANI, A.; BAKARIC, J.; JEFFREY-BAILEY, T. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, v. 197, p. 522–538, 2017.
- [5] BEVACQUA, M. et al. Passive Cooling Techniques for Less Energy Consumption in Buildings a Comparative Study on Green Surfaces. In: Department of Civil Environmental Architectural Engineering and Mathematics (DICATAM), University of Brescia, Brescia, Italy. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Anais. 2018.
- [6] MEIFANG SU; PENGYU JIE; PEIXIAN LI; FENG YANG; ZISHUO HUANG; XING SHI. A review on the mechanisms behind thermal effect of building vertical greenery systems (VGS): methodology, performance and impact factors. *Energy and Buildings*, v. 303, 2024.
- [7] OLIVIERI, F.; OLIVIERI, L.; NEILA, J. Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal façade under summer conditions in a continental mediterranean climate. *Building and Environment*, v. 77, p. 61–76, 2014.
- [8] ZAID, S. M. et al. Vertical Greenery System in urban tropical climate and its carbon sequestration potential: A review. *Ecological Indicators*, v. 91, p. 57–70, ago. 2018.
- [9] UNITED NATIONS, D. of E. and S. A. World Urbanization Prospects: The 2022 Revision (ST/ESA/SER.A/420) Demographic Research. [s.l: s.n.].
- [10] MORAKINYO, T. E. et al. Thermal benefits of vertical greening in a high-density city: Case study of Hong Kong. *Urban Forestry and Urban Greening*, v. 37, p. 42–55, jan. 2019.
- [11] SAFIKHANI, T. et al. A review of energy characteristic of vertical greenery systems *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, dez. 2014.
- [12] DAHANAYAKE, K. W. D. K. C.; CHOW, C. L. Studying the potential of energy saving through vertical greenery systems: Using EnergyPlus simulation program. *Energy and Buildings*, v. 138, p. 47–59, mar. 2017.
- [13] MAURIZIO DETOMMASO; VINCENZO COSTANZO; FRANCESCO NOCERA; GIANPIERO EVOLA. Evaluation of the cooling potential of a vertical greenery system coupled to a building through an experimentally validated transient model. *Building and Environment*, v. 244, 2023.
- [14] CRAWLEY, D. B. et al. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *IBPSA 2005 - International Building Performance Simulation Association 2005*, v. 43, n. 4, p. 231–238, 2005.
- [15] RAMOS, L.; OLIVEIRA, R.; AZEVEDO, R. Revisão Bibliométrica Aplicada ao Uso de Sistemas Vegetados Verticais em Simulações de Desempenho Térmico de Edificações. In: XI ELACAC, João Pessoa - PB. Anais... João Pessoa - PB: 2019.

- [16] WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis. Ninth International IBPSA Conference, p. 1331–1338, 2005.
- [17] ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- [18] ABNT. NBR 15220/2 - Desempenho Térmico de Edificações Parte 2: Método de Cálculo da Transmitância Térmica, da Capacidade Térmica, do Atraso Térmico e do Fator Solar de Elementos e Componentes de Edificações. 2008.
- [19] SERRA, V. et al. A novel vertical greenery module system for building envelopes: The results and outcomes of a multidisciplinary research project. Energy and Buildings, v. 146, p. 333–352, jul. 2017.
- [20] VOX, G. et al. Evaluation of Wall Surface Temperatures in Green Facades. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability, v. 170, n. 6, p. 334–344, 2017.
- [21] YIN, H. et al. Cooling effect of direct green façades during hot summer days: An observational study in Nanjing, China using TIR and 3DPC data. Building and Environment, v. 116, p. 195–206, 2017.
- [22] LAMBERTS, R. et al. Casa Eficiente: Simulação Computacional do Desempenho Termo-Energético. 4. ed. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010.
- [23] LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. 3a ed. [s.l.] LabEEE, 2014.
- [24] JÚNIOR, C. R. et al. Comunicado Técnico 345 - Protetor de Radiação Solar Simples para Termômetros Digitais Eletrônicos. [s.l.: s.n.].
- [25] CHWIF, L.; MEDINA, A. C. Modelagem e Simulação de Eventos Discretos. 3. ed. [s.l.] Elsevier, 2013.
- [26] FORRESTER, J. Industrial Dynamics. Cambridge: Productivity Press, 1961.
- [27] SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models are discussed in this paper. Journal of Simulation, v. 7, p. 12–24, 2013.
- [28] LARSEN, S. F.; FILIPPÍN, C.; LESINO, G. Thermal Simulation of a Double Skin Façade with Plants. Energy Procedia, v. 57, p. 1763–1772, 2014.
- [29] OKE, T. R. Boundary Layer Climates. 2. ed. [s.l.] ROUTLEDGE JOURNALS, TAYLOR & FRANCIS LTD, 1987.
- [30] COMA, J. et al. New green facades as passive systems for energy savings on Buildings. In: Energy Procedia, Anais...2014.
- [31] IQBAL SHAH; SIU-KIT LAU; VEERA SEKARAN; ALI GHAHRAMANI. Porous plant form-induced amplification of evapotranspiration for enhanced cooling in vertical greenery systems. Building and Environment, v. 245, 2023.
- [32] OTTELÉ, M.; PERINI, K. Comparative experimental approach to investigate the thermal behaviour of vertical greened façades of buildings. Ecological Engineering, v. 108, p. 152–161, 2017.
- [33] WILKINSON, S. et al. Evaluating the Thermal Performance of Retrofitted Lightweight Green Roofs and Walls in Sydney and Rio de Janeiro. Procedia Engineering, v. 180, p. 231–240, 2017.