



Fachadas Verdes no Enfrentamento às Mudanças Climáticas: Desempenho Térmico em Edifício Multifamiliar em Clima Quente e Úmido

Camila Mauro Borges

Pesquisadora, ARQAMB UVV, Brasil

camilamborges@live.com

ORCID iD: 0009-0007-8377-3920

Érica Coelho Pagel

Professora Doutora, ARQAMB UVV, Brasil

erica.pagel@uvv.br

ORCID iD: 0000-0003-4484-1963



Fachadas Verdes no Enfrentamento às Mudanças Climáticas: Desempenho Térmico em Edifício Multifamiliar em Clima Quente e Úmido

RESUMO

Objetivo - Demonstrar o impacto da implementação de fachadas verdes no desempenho térmico e energético de um edifício multifamiliar em Vitória/ES, considerando cenários climáticos futuros.

Metodologia – O estudo utilizou simulação computacional para comparar o desempenho de um caso base (edifício existente) com um caso de intervenção (com fachada verde), analisando dados de conforto térmico, consumo de energia e temperaturas de pico para o cenário atual, 2050 e 2090.

Originalidade/relevância - A pesquisa aborda a necessidade de estratégias de adaptação urbana às mudanças climáticas em climas quentes e úmidos, oferecendo uma análise quantitativa dos benefícios de uma solução baseada na natureza, com relevância acadêmica e social.

Resultados – A fachada verde aumentou significativamente os dias e horas de conforto térmico, reduziu o consumo de energia para climatização em até 703 kWh/ano e mitigou as temperaturas de pico em até 3,3°C, demonstrando sua eficácia como medida de adaptação.

Contribuições teóricas/metodológicas - O estudo fornece um método de análise comparativa do desempenho de fachadas verdes em diferentes cenários climáticos, contribuindo para futuras pesquisas na área.

Contribuições sociais e ambientais – Evidencia o potencial das fachadas verdes para melhorar a qualidade de vida urbana, reduzir a pegada de carbono dos edifícios e promover a resiliência das cidades frente aos desafios climáticos, gerando benefícios diretos para a sociedade e o meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Fachadas Verdes. Mudanças Climáticas. Conforto Térmico. Eficiência Energética. Adaptação Urbana.

Green Facades in Addressing Climate Change: Thermal Performance in a Multifamily Building in Hot and Humid Climate

ABSTRACT

Objective – To demonstrate the impact of implementing green facades on the thermal and energy performance of a multifamily building in Vitória/ES, considering future climate scenarios.

Methodology – The study used computational simulation to compare the performance of a baseline case (existing building) with an intervention case (with green facade), analyzing data on thermal comfort, energy consumption, and peak temperatures for the current scenario, 2050, and 2090.

Originality/Relevance – The research addresses the need for urban adaptation strategies to climate change in hot and humid climates, providing a quantitative analysis of the benefits of a nature-based solution, with academic and social relevance.

Results – The green facade significantly increased the days and hours of thermal comfort, reduced energy consumption for air conditioning by up to 703 kWh/year and mitigated peak temperatures by up to 3.3°C, demonstrating its effectiveness as an adaptation measure.

Theoretical/Methodological Contributions – The study provides a comparative analysis method for the performance of green facades in different climate scenarios, contributing to future research in the field.

Social and Environmental Contributions – It highlights the potential of green facades to improve urban quality of life, reduce the carbon footprint of buildings, and promote city resilience in the face of climate challenges, generating direct benefits for society and the environment.

KEYWORDS: Green Facades. Climate Change. Thermal Comfort. Energy Efficiency. Urban Adaptation.



Fachadas Verdes en el Enfrentamiento a los Cambios Climáticos: Desempeño Térmico en un Edificio Multifamiliar en Clima Cálido y Húmedo

RESUMEN

Objetivo – Demostrar el impacto de la implementación de fachadas verdes en el desempeño térmico y energético de un edificio multifamiliar en Vitória, Espírito Santo, considerando escenarios climáticos futuros.

Metodología – El estudio utilizó simulación computacional para comparar el desempeño de un caso base (edificio existente) con un caso de intervención (con fachada verde), analizando datos de confort térmico, consumo de energía y temperaturas máximas para el escenario actual, 2050 y 2090.

Originalidad/Relevancia – La investigación aborda la necesidad de estrategias de adaptación urbana a los cambios climáticos en climas cálidos y húmedos, ofreciendo un análisis cuantitativo de los beneficios de una solución basada en la naturaleza, con relevancia académica y social.

Resultados – La fachada verde aumentó significativamente los días y horas de confort térmico, redujo el consumo de energía para climatización en hasta 703 kWh/año y mitigó las temperaturas máximas en hasta 3.3°C, demostrando su eficacia como medida de adaptación.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas – El estudio proporciona un método de análisis comparativo del desempeño de fachadas verdes en diferentes escenarios climáticos, contribuyendo a futuras investigaciones en el área.

Contribuciones Sociales y Ambientales – Evidencia el potencial de las fachadas verdes para mejorar la calidad de vida urbana, reducir la huella de carbono de los edificios y promover la resiliencia de las ciudades ante los desafíos climáticos, generando beneficios directos para la sociedad y el medio ambiente.

PALABRAS CLAVE: Fachadas Verdes. Cambios Climáticos. Confort Térmico. Eficiencia Energética. Adaptación Urbana.



1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios do século XXI, com impactos profundos e abrangentes em escala global. Embora sejam fenômenos naturais na história do planeta, as atividades humanas desde o período industrial têm intensificado essas alterações, resultando em uma frequência crescente de eventos climáticos extremos, especialmente em ambientes urbanos (National Geographic, 2022). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) tem alertado consistentemente sobre o aquecimento global inequívoco, impulsionado principalmente pelas emissões de gases de efeito estufa. De acordo com o Relatório de Síntese AR6 do IPCC, a temperatura global da superfície atingiu 1,1°C acima dos níveis pré-industriais (1850-1900) entre 2011 e 2020, enquanto as emissões globais de gases de efeito estufa continuam a aumentar (IPCC, 2023).

Esse aquecimento global intensifica diversos riscos, incluindo ondas de calor mais intensas e frequentes, que afetam diretamente o conforto térmico nas edificações e a saúde humana (IPCC, 2023). Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de soluções inovadoras que tornem as construções mais resilientes às mudanças climáticas, permitindo que os ambientes internos mantenham condições de conforto por mais tempo de maneira passiva. O setor de construção é responsável por mais de 20% das emissões globais de gases de efeito estufa e consome mais de um terço da demanda mundial de energia para garantir o conforto térmico em sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC) (Refaat; El-Zoklah, 2022).

Nesse contexto, os Sistemas de Vegetação Vertical (SVV) emergem como uma solução promissora e sustentável ao integrar plantas às edificações, como telhados verdes, paredes verdes e sacadas verdes. Refaat e El-Zoklah (2022) destacam que, embora diversos autores proponham diferentes classificações, ainda não existe um padrão consolidado, e muitas dessas propostas acabam se sobrepondo por compartilharem características semelhantes. Embora todas contribuam para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, as paredes verdes oferecem uma área de atuação da vegetação significativamente maior na envoltória dos edifícios verticais, maximizando seus benefícios (Raji; Tenpierik; Dobbelsteen, 2015).

As paredes verdes podem ser divididas em duas macro categorias: fachadas verdes e paredes vivas. As fachadas verdes caracterizam-se por uma tecnologia sistêmica de baixa complexidade, na qual as plantas se aplicam direta ou indiretamente à parede, podendo ser compostas por poucos elementos e com integração limitada entre as plantas e a estrutura. Já as paredes vivas são consideradas o tipo mais avançado dentro do SVV, podendo ser organizadas em estruturas contínuas ou modulares, compostas por painéis pré-cultivados verticalmente em substrato, hidropônia ou outros meios de crescimento (Urban Greening, 2013; Palermo; Turco, 2020; Refaat; El-Zoklah, 2022; Wright, 2023).

Como apontado por Karimi et al. (2022), o potencial dos sistemas verdes pode desempenhar um papel significativo na redução do consumo de energia, e a ampla envoltória do edifício exerce uma função determinante na busca por soluções sustentáveis. À medida que as cidades se tornam cada vez mais verticalizadas, é necessário buscar um equilíbrio entre paisagem e construção, garantindo que a biosfera dos pavimentos mais altos seja semelhante à



do térreo. Para isso, projetos devem integrar sustentabilidade, respeitando o planejamento avançado e a complexidade do ambiente, inclusive verticalmente (Yeang; Powell, 2007).

A atuação do SVV ocorre de maneira passiva por meio de processos como resfriamento evaporativo, sombreamento e isolamento térmico (Ottelé, 2011; Yoshimi; Altan, 2011; Raji; Tenpierik; Dobbelsteen, 2015; Karimi et al., 2022; Wright, 2023). Segundo Karimi et al. (2022), as plantas nas fachadas dissipam o calor absorvido por meio da evaporação e transpiração, fenômenos que, juntos, Raji, Tenpierik e Dobbelsteen (2015) chamam de evapotranspiração, sendo fundamentais para o potencial de resfriamento, transferindo água do solo para a atmosfera e realizando trocas gasosas com uma taxa de evaporação que pode chegar a 15 litros por dia, de acordo com dados da Associação Federal para Edifícios Verdes da Alemanha (BuGG - Bundesverband GebäudeGrün e.V, em alemão). O estudo de Wright (2023) complementa que o vento impulsiona a difusão da água pelas aberturas na epiderme vegetal, aumentando a evapotranspiração e, consequentemente, o efeito de resfriamento.

Em climas quentes e úmidos, como o de Vitória/ES, a evapotranspiração das plantas nos sistemas de vegetação vertical desempenha uma função fundamental. A umidade liberada por esse processo contribui para a troca de calor, ajudando a manter a temperatura interna da edificação mais fresca e confortável por períodos mais longos, reduzindo a necessidade de climatização artificial. Este mecanismo de arrefecimento passivo é de grande valia para o desempenho térmico de edifícios em regiões tropicais, oferecendo isolamento térmico e mitigando o ganho de calor.

À luz dessas considerações, compreender o impacto dos sistemas de parede verde no desempenho energético em edifícios residenciais torna-se indispensável. Ao abraçar designs inovadores e práticas sustentáveis, as cidades podem abrir caminho para um futuro mais verde, melhorando a qualidade de vida de todos os residentes enquanto enfrentam desafios ambientais urgentes. A integração de sistemas verdes na arquitetura urbana não é apenas uma escolha estética, mas um passo necessário para promover um ambiente construído sustentável e resiliente.

Este estudo, portanto, visa explorar os efeitos das paredes verdes como um elemento de envelope construtivo, através de simulações computacionais (BES – *Building Energy Simulation*) incluindo o modelo combinado de transferência de calor e umidade (HAMT –*Combined Heat and Moisture Transfer Model*), buscando compreender seus efeitos sobre o desempenho energético em um edifício residencial em clima tropical úmido, considerando tanto as condições climáticas atuais quanto cenários futuros de aquecimento global.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho térmico de um apartamento de um edifício multifamiliar, localizado em clima quente e úmido, considerando o uso de fachada verde no contexto do aumento das temperaturas globais resultantes das mudanças climáticas.



3 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos foram organizados em três etapas:

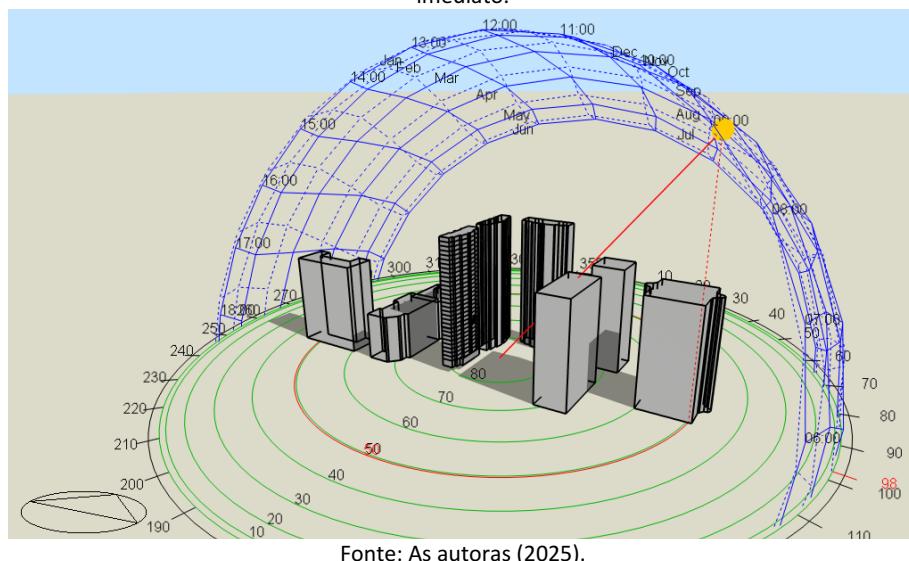
- Experimentos de campo: com medição de temperaturas do ar em apartamento localizado em Vitória/ES, com o objetivo de calibragem e validação do modelo.
- Simulação do desempenho térmico: avaliação do desempenho térmico atual e projetado para o futuro, na sala de estar e na varanda de um apartamento, considerando o edifício da maneira existente e com a adição da fachada verde como solução mais resiliente e adaptada às mudanças climáticas.
- Análise do consumo de energia e estimativa dos custos financeiros associados.

3.1 Simulação Computacional

Para a realização da simulação computacional, foi empregado o software DesignBuilder (versão 7.2), que está integrado ao EnergyPlus (versão 9.4), o qual é responsável por realizar os cálculos termoenergéticos necessários. A simulação utilizou como referência o arquivo climático TMY (Typical Meteorological Year) correspondente ao período de 2009 a 2023, obtido através da plataforma OneClimate Building (2024), no formato EPW (EnergyPlus Weather), apresentando as médias mensais das condições meteorológicas para o intervalo sob análise. A metodologia aplicada neste trabalho segue a mesma aplicada em Borges e Pagel (2025) na avaliação de desempenho térmico com cenários futuros em clima quente e úmido.

Nas projeções climáticas futuras, foi selecionado o cenário RCP8.5, desenvolvido por Bracht et al. (2024), que representa o panorama mais crítico quanto às emissões de gases estufa. O processo de simulação integrou o modelo de circulação geral HadGEM2 com o modelo regional RegCM, aplicando downscaling dinâmico para aprimorar a resolução espacial das projeções globais, oferecendo assim uma caracterização mais precisa das condições climáticas locais.

Figura 1 – Perspectiva isométrica do edifício modelado no software DesignBuilder com coordenadas reais e entorno imediato.



O modelo foi ajustado conforme as dimensões do projeto original, considerando os materiais de construção e as propriedades físicas e térmicas do ambiente. As situações simuladas incluíram dois cenários: o edifício residencial existente (caso base) e o mesmo edifício com a adição de vegetação à camada externa (caso com intervenção), seguindo metodologia semelhante à utilizada por Sousa (2020).

Além de adicionar a vegetação à envoltória da construção, a simulação também inclui o componente HAMT e suas propriedades higroscópicas. Este componente permite prever tanto o desempenho energético, prognosticando como os materiais e estruturas se comportam em termos de eficiência energética, quanto o conforto interno, permitindo simular como a umidade e a temperatura afetam o conforto dos ocupantes nos ambientes internos.

Os parâmetros considerados são o número de usuários, o tipo de atividade realizada no espaço, o tempo de uso ou permanência, entre outros (Tabela 1). Quanto à configuração da entrada e saída de ar por meio das aberturas, os cenários foram simulados utilizando a condição de ventilação natural calculada disponível no programa de simulação.



Tabela 1 — Parâmetros gerais para configurações das simulações.

Envoltória						
Material	Espessura	Condutividade Térmica (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Absortância Térmica	Absortância Solar
Reboco	0,02	1,15	1800	1000	0,3	0,3
Bloco Cerâmico	0,09	0,7	1000	920	0,3	0,3
Piso Cerâmico	0,0127	0,9	1600	920	0,3	0,3
Laje Concreto	0,1	1,75	2200	1000	0,6	0,6
Vegetação	0,001	0,002	0,4	2800	0,2	0,2
Propriedades	Material	Vidro Verde Comum				
Espessura (m)		0,003				
Transmitância solar total (SHGC)		0,722				
Transmitância solar direta		0,635				
Transmitância visível		0,822				
Condutividade Térmica (W/m.K)		5,894				
Ambiente e Usuário						
Área de sala de estar + área de varanda		35m ² + 12,9m ²				
Total de ocupantes		2 pessoas				
Rotina de ocupação das 7h às 22h		100%				
Rotina de ocupação das 22h às 7h		0%				
Vestimenta		Inverno: 1,00 clo; Verão: 0,50 clo				
Taxa metabólica - comendo/bebendo		0,9				
Iluminação artificial		W/m - acionadas das 16h00 às 22h00				

Fonte: As

autoras (2025).

Para a calibração considerou-se a parede real composta por alvenaria rebocada, preenchimento de concreto e revestimento cerâmico externo. As simulações contemplaram paredes de alvenaria rebocada e revestimento cerâmico externo ao caso base. Já no caso com intervenção foi adicionada uma camada de vegetação no lado externo do edifício como possível solução adaptativa às mudanças climáticas (figura 2).

Figura 2 – Representação da alvenaria no caso base à esquerda e com intervenção à direita.



Fonte: As autoras (2025).

3.2 Experimento de campo e calibração do modelo

O processo de calibração exige a comparação dos dados do resultados simulados com os resultados medidos. Nele adotou-se a metodologia de calibração aplicada em Borges e Pagel (2025). O estudo ocorre na Enseada do Suá, Vitória/ES (Latitude 20°19'06" Sul e Longitude 40°17'50" Leste), área com clima tropical úmido, temperatura média anual de 29,1°C, umidade relativa de 82,3% e evapotranspiração potencial de 1874,8 mm (INMET, 2022). Segundo o ProjetEEE (2024), a região apresenta desconforto térmico por calor em 61% do ano. Com base na planta de elevação do edifício residencial, o apartamento onde o estudo foi conduzido se encontra a 29,4m de altura do nível da rua.

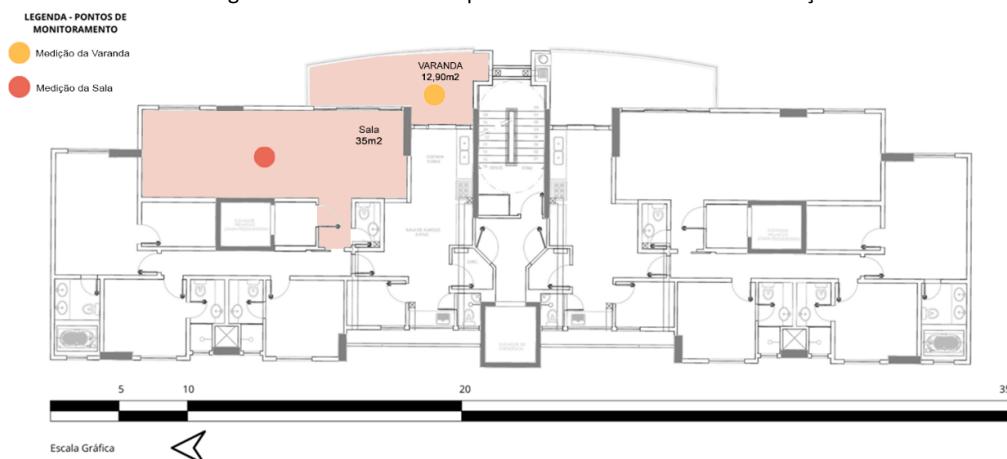
Figura 3 – a) Localização do edifício e o entorno imediato; b) Localização do apartamento na torre; c) Vitória/Espírito Santo, Brasil.



Fonte: a) Google Earth (2024); b) As autoras (2025); c) Adaptado do IBGE (2025).

O apartamento em análise está localizado em uma condomínio residencial composto por três edifícios (figura 3A), cada um com 30 andares e duas unidades por pavimento tipo. O monitoramento das temperaturas foi na varanda (figura 5A) e na sala (figura 5C) do apartamento no 10º andar (figura 3B). O hotel vizinho ao condomínio (figura 3A, à direita) influencia no microclima local ao sombreá-lo durante o inverno e parte da primavera.

Figura 4 – Planta baixa do pavimento exibindo locais de medição



Fonte: As autoras (2025).

Para o monitoramento foi utilizado o data logger HOBO (figura 4B), modelo U12-013, protegido conforme a ISO 7726:2018 (International Organization for Standardization, 2018), com temperatura de operação na faixa 0°C a 50°C e desvio de 0,1°C/ano (Sigma Sensors, 2025). O abrigo utilizado durante o experimento para o HOBO posicionado na varanda teve como objetivo proteger o aparelho da radiação solar direta, que poderia afetar as medições. Para posicionar e ajustar a altura do conjunto (HOBO + abrigo), foi empregado um tripé com altura ajustável. A Figura 4 ilustra o conjunto montado e o HOBO utilizado neste experimento.

Figura 4 – a) Conjunto (Hobo + abrigo) da varanda; b) Data logger HOBO, modelo U12-013; c) Hobo em tripé na sala.



Fonte: a) As autoras (2025); b) TEMPCON, c) As autoras (2025).

Com o auxílio de tripé, cada aparelho foi ajustado a uma altura de 1,50 m acima do piso e com medições de temperatura e umidade relativa do ar registradas simultaneamente, a cada minuto, durante 24 horas pelo Data Logger. É relevante mencionar que o fechamento de vidros móveis da varanda, a janela e as portas que dão acesso aos ambientes permaneceram fechadas durante o experimento, entre 19 e 26 de janeiro de 2025.



A calibração tem como objetivo desenvolver um modelo que represente o objeto de estudo da maneira mais precisa possível, minimizando a chance de que os dados gerados sejam inconsistentes com a realidade. Essa abordagem é amplamente utilizada em pesquisas científicas envolvendo simulações computacionais. Um exemplo é o trabalho de Pisello *et al.* (2012), que relatam ter realizado três ajustes no modelo para reduzir o índice de incerteza a níveis aceitáveis. Com base nessa pesquisa sobre calibração, decidiu-se que a metodologia a ser utilizada seguiria diretrizes de estudos semelhantes que alcançaram resultados positivos, como o artigo de Saleh (2015).

O processo de calibração do modelo iniciou-se com a comparação entre os resultados obtidos na simulação computacional, realizada no software DesignBuilder versão 7.2 (Designbuilder, 2023) e os dados coletados. O arquivo configurado foi modificado no programa para assegurar que a orientação da fachada principal do edifício e as condições de uso das portas e janelas correspondessem às do experimento. Após essas configurações as simulações foram realizadas gerando dados para os mesmos dias em que ocorreu o experimento.

Para a análise comparativa, foram consideradas as medições da varanda e da sala. Utilizaram-se os métodos *Normalized Mean Bias Error* (NMBE) e o Coeficiente de Variação do *Root-Mean Square Error* (CVRMSE), que avaliam a incerteza dos resultados (Saleh, 2015). O NMBE normaliza o erro médio de polarização (MBE), refletindo a média dos erros em um conjunto de dados, enquanto o CVRMSE mede a variação dos erros entre dados medidos e simulados (Ruiz; Bandera, 2017). Esses índices são calculados por equações que relacionam os dados simulados e os coletados in loco, conforme as Equações 1 e 2.

$$\text{Equação 1} \quad NMBE = \frac{1}{\bar{m}} \times \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n-p} \times 100(%)$$

$$\text{Equação 2} \quad CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{m}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n-p}} \times 100(%)$$

Onde:

\bar{m} = média dos valores medidos;

p = quantidade de parâmetros ajustáveis do modelo (para fins de calibração $p = 0$);

m_i = valores medidos in loco;

s_i = valores simulados; e

n = número de dados a serem comparados.

De acordo com Haberl, Culp e Claridge (2005), é importante que o NMBE e o CVRMSE sejam avaliados em conjunto para garantir uma verificação adequada do modelo, evitando que erros presentes no NMBE, como os de cancelamento, sejam negligenciados. Para que o modelo seja considerado calibrado, os resultados obtidos através das Equações 1 e 2 devem estar dentro da faixa de incerteza especificada na Tabela 2.



Tabela 2 — Faixa de incerteza associada com o NMBe e CVRMSE.

Critério de calibração	Indicador	ASHRAE 14:2002	IPMVP	FEMP
Critério mensal %	NMBe	±5	±20	±5
	CVRMSE	15	-	15
Critério horário %	NMBe	±10	±5	±10
	CVRMSE	30	20	30

Fonte: Adaptado de Ruiz e Bandera (2017).

Este estudo utilizou três métodos para calcular os índices de incerteza associados aos resultados da temperatura do ar: (a) cálculo dos valores de temperatura registrados ao longo de 24 horas; (b) considerando toda a amostra); e (c) cálculo das médias dos índices obtidos em cada um dos dias monitorados (8 dias). Esse procedimento, também seguido por Saleh (2015), foi realizado com o intuito de proporcionar uma análise diversificada dos valores obtidos para o NMBe e o CVRMSE. A Tabela 3 apresenta os resultados dos índices de incerteza calculados, relacionando os dados do monitoramento de campo com a simulação numérica para a varanda. É importante ressaltar que os resultados se encontram dentro da faixa recomendada por Haberl, Culp e Claridge (2005), tanto para o NMBe quanto para o CVRMSE, considerando os três métodos de cálculo adotados. Assim, o modelo pode ser considerado adequado.

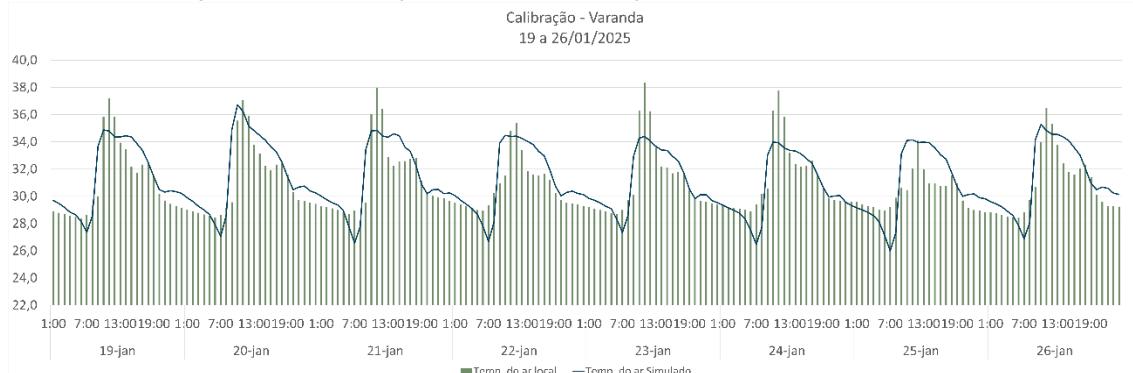
Tabela 3 — Faixa de incerteza associada com o NMBe e CVRMSE.

Método	NMBe	CVMSE	ASHRAE 14:2002	IPMVP	FEMP
Método 1	19/jan.	-1,31	4,23	Atendido	Atendido
	20/jan.	-2,07	4,62	Atendido	Atendido
	21/jan.	-0,61	4,74	Atendido	Atendido
	22/jan.	-1,68	4,74	Atendido	Atendido
	23/jan.	0,02	4,36	Atendido	Atendido
	24/jan.	1,48	4,66	Atendido	Atendido
	25/jan.	-1,90	6,02	Atendido	Atendido
	26/jan.	-1,70	4,45	Atendido	Atendido
Método 2	Considera a amostra toda	-0,97	1,68	Atendido	Atendido
Método 3	Média entre os índices de cada dia	-0,97	4,73	Atendido	Atendido

Fonte: As autoras (2025).

A partir do gráfico 1 podemos comparar as temperaturas registradas com as simuladas no DesignBuilder observando o atendimento do modelo.

Gráfico 1 — Calibração da varanda: Temperatura in loco vs. Temperatura simulada.



Fonte: As autoras (2025).

3.3 Indicador de desempenho térmico

Os indicadores de desempenho térmico são fundamentais para avaliar a eficácia de um espaço residencial em garantir o conforto térmico dos ocupantes. Um dos conceitos-chave nesse contexto é o intervalo de conforto adaptativo, que se refere à faixa de temperaturas internas que permite que os ocupantes se sintam confortáveis em determinado ambiente.

O intervalo de conforto adotado foi o proposto pelo método adaptativo da ASHRAE 55 (2017), que considera o percentual de 90% de aceitabilidade e, assim como em Nico-Rodrigues et al.(2015), utilizando a temperatura operativa neutra (TN) como parâmetro envolvido, resultante da equação 3.

$$\text{Equação 3} \quad TN = 15,293 + 0,3106 \times TE$$

Onde:

TN é a média diária da temperatura operativa interna neutra [°C];

TE é a média diária da temperatura do ar externo (bulbo seco) [°C].

A Frequência de Desconforto (FDT) mede as horas em que a temperatura interna supera o limite de conforto. No estudo, um dia (24 horas) representa 100% de desconforto, com cada hora valendo 4,16%. Multiplicando esse valor pelo número de horas de desconforto, obtém-se o percentual diário. Esse cálculo abrange tanto os dias confortáveis quanto as horas de desconforto ao longo de um ano.

3.4 Consumo energético (kWh) e custo financeiro (R\$) para resfriamento das horas em desconforto

A análise do consumo energético em edificações multifamiliares constitui um fator determinante para orientar decisões construtivas, não apenas para compreender o impacto ambiental das construções, mas também para estimar os custos financeiros ao longo da vida útil do edifício quando habitado. Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA), o consumo energético residencial está predominantemente associado à climatização, iluminação



e funcionamento de aparelhos eletrodomésticos (IEA, 2025). Dessa forma, a eficiência energética torna-se um aspecto fundamental para a redução de custos e mitigação de impactos ambientais.

A análise considerará as tarifas de energia elétrica de baixa tensão residencial (classe B1, conforme classificação da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2025) e os custos relacionados ao consumo energético necessário para manter os ambientes em condições de conforto térmico. A implementação de soluções projetuais que priorizam a eficiência energética proporciona não apenas benefícios ambientais, mas também economia financeira, evidenciando a importância de considerar esses aspectos no planejamento e construção de novos empreendimentos. Para os cálculos, serão utilizadas a Tarifa de Energia (TE) de R\$0,3010/kWh e a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) de R\$0,3835/kWh (EDP Brasil, 2024).

A seleção do equipamento de ar-condicionado baseou-se no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), utilizando a lista de equipamentos atualizada em abril de 2025 (Inmetro, 2022). Para o ambiente integrado de sala e varanda (47,9 m²), identificou-se a necessidade de um aparelho com capacidade de 30.000 BTUs do tipo split hi-wall. O fator decisivo para a escolha foi o Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal (IDRS), que avalia a eficiência energética considerando o desempenho em diversas condições climáticas ao longo do ano. Medido em Wh/Wh (watt-hora por watt-hora), um IDRS mais elevado indica maior eficiência do equipamento (Daikin, 2025). Este índice é fundamental para orientar consumidores na escolha de aparelhos que sejam simultaneamente eficientes e econômicos, refletindo com maior precisão a realidade climática brasileira. O modelo selecionado foi da marca Gree, modelo GWC30ATEXF-S6DNA1A, com IDRS de 7,44 Wh/Wh.

Conforme especificações do fabricante, o consumo anual do equipamento é de 975,8 kWh/ano, resultando em um consumo horário de 0,111 kW/h. Para calcular o consumo energético acumulado anualmente em cada cenário simulado, multiplicou-se a Frequência de Desconforto Térmico (FDT) anual, expressa em horas, pelo consumo horário do ar-condicionado, aplicando-se posteriormente a tarifa vigente estabelecida pela concessionária de energia elétrica do Espírito Santo.

Os tributos aplicáveis são o Programa de Integração Social (PIS – 0,9%), a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS – 4,12%) e o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS – 17%). O PIS e COFINS primeiro incidem sobre a tarifa ANEEL e em seguida o ICMS incide sobre o subtotal resultante.

Para determinar a Tarifa Final (TF), portanto, aplica-se a seguinte equação:

$$\text{Equação 4} \quad \text{TF} = \text{TA} \times (1 + \text{PIS} + \text{COFINS}) \times (1 + \text{ICMS})$$

Onde:

TF (Tarifa Final) é o valor final pelo consumidor por kWh [R\$];

TA (Tarifa da ANELL) é a soma das tarifas TUSD e TE [R\$].



Por fim, multiplica-se o valor da Tarifa Final pelo consumo energético de cada cenário simulado para obter o custo financeiro correspondente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de desempenho térmico e energético do edifício multifamiliar em Vitória, Espírito Santo, revelou melhorias significativas com a implementação da fachada verde. A avaliação comparativa entre a situação existente (caso base) e a proposta com a intervenção, considerando os cenários climáticos atual, 2050 e 2090, demonstrou um impacto positivo notável na ampliação das condições de conforto térmico.

A abordagem temporal baseada em simulações para o clima atual e projeções climáticas para 2050 e 2090 permite avaliar o potencial da vegetação como estratégia de redução da demanda energética. A análise comparativa entre o caso base e a intervenção com fachada verde, considerando a ventilação natural e o uso de ar-condicionado para resfriamento durante períodos de desconforto térmico, evidencia os impactos significativos no consumo energético, custos operacionais e eficiência do SVV, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 — Média de horas por dia em conforto/desconforto durante o ano.

CASO BASE							
Cômodos	ATUAL		FUTURO 2050		FUTURO 2090		
	Horas	%	Horas	%	Horas	%	
Sala	Conforto	18,51	77,13%	17,78	74,10%	12,46	51,92%
	Desconf. calor	4,69	19,53%	6,2136	25,89%	11,54	48,08%
	Desconf. frio	0,80	3,33%	0,0024	0,01%	0	0,00%
Varanda	Conforto	13,91	57,97%	13,11	54,61%	9,88	41,19%
	Desconf. calor	9,28	38,68%	10,89	45,39%	14,11	58,81%
	Desconf. frio	0,81	3,36%	0,00	0,00%	0,00	0,00%
COM FACHADA VERDE							
Cômodos	ATUAL		FUTURO 2050		FUTURO 2090		
	Horas	%	Horas	%	Horas	%	
Sala	Conforto	23,40	97,49%	22,87	95,31%	20,70	87,28%
	Desconf. calor	0,00	0,00%	0,17	0,70%	3,05	12,72%
	Desconf. frio	0,60	2,51%	1,13	4,69%	3,33	13,89%
Varanda	Conforto	23,52	98,00%	23,31	97,12%	18,70	77,92%
	Desconf. calor	0,30	1,24%	0,69	2,88%	5,30	22,08%
	Desconf. frio	0,18	0,75%	0,00	0,00%	0,00	0,00%

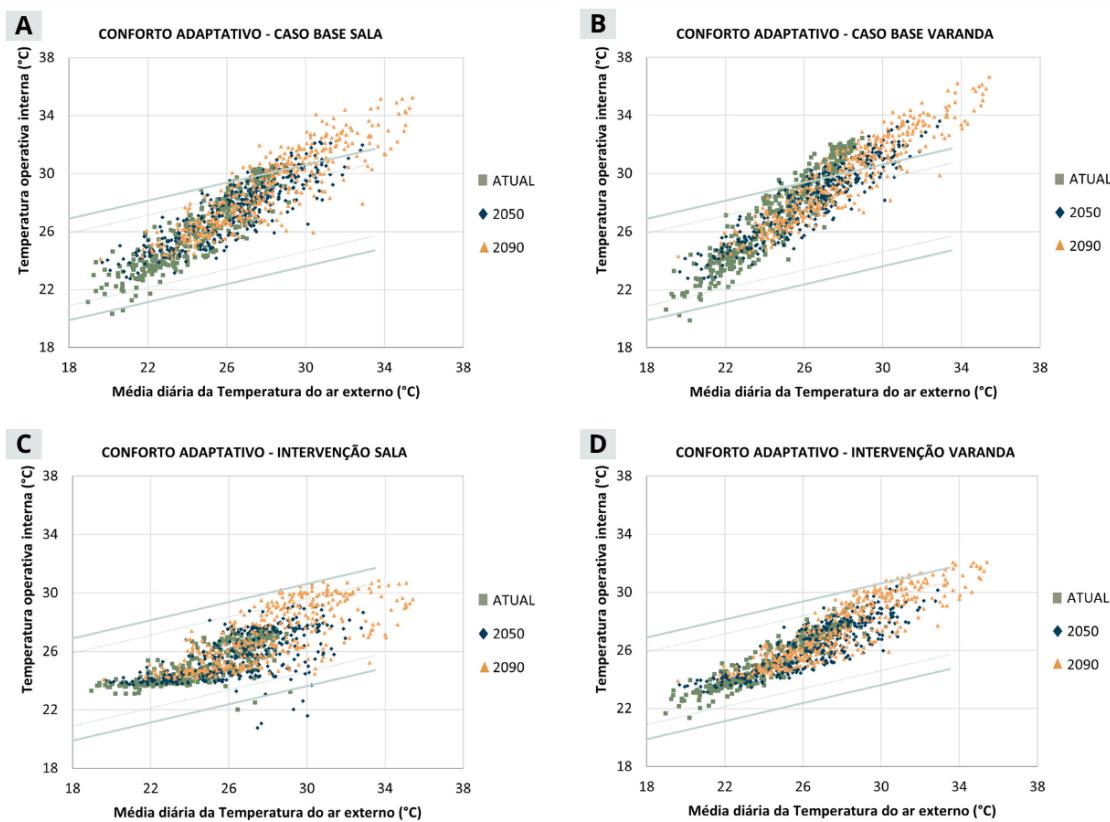
Fonte: As autoras (2025).

Com a fachada verde, observou-se uma redução significativa na demanda de resfriamento. Na sala de estar, o caso base apresentou conforto em 77,1% das horas no cenário atual, reduzindo para 74,1% em 2050 e 51,9% em 2090. Com a fachada verde, esse percentual aumentou para 97,5% de conforto térmico no cenário atual, 95,3% em 2050 e 87,3% em 2090. Na varanda, o conforto, que no caso base era de apenas 58% no cenário atual, saltou para 98% com a fachada verde. Este aumento significativo demonstra a eficácia da intervenção em ambientes com maior exposição às condições externas.

Ao adicionar o SVV à envoltória do edifício, há redução na carga térmica que alcança o interior do edifício, e a umidade proveniente da evapotranspiração das plantas auxilia no resfriamento evaporativo. Este mecanismo de funcionamento permite, portanto, que as temperaturas internas se mantenham dentro do intervalo de conforto por mais tempo e, consequentemente, reduz o consumo de energia para climatizar os espaços.

No Gráfico 2, observamos que após a intervenção, as temperaturas, vistas nas imagens C e D, ficaram majoritariamente dentro das margens de limite de 90% de aceitabilidade de conforto para o intervalo adaptativo.

Gráfico 2 — Intervalo de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (2017) com 90% de aceitabilidade a partir da média diária das temperaturas durante um ano das simulações. A) Caso base sala; B) Caso base varanda; C) Com intervenção sala; D) Com intervenção varanda.



Fonte: As autoras (2025).

Na projeção de consumo (tabela 5), é importante ressaltar a ausência de demanda por arrefecimento no cenário atual da sala com a fachada verde. Na varanda, houve a economia de 413 kWh/ano no cenário em 2050, equivalente a R\$ 331,21 a menos em gasto com energia elétrica.

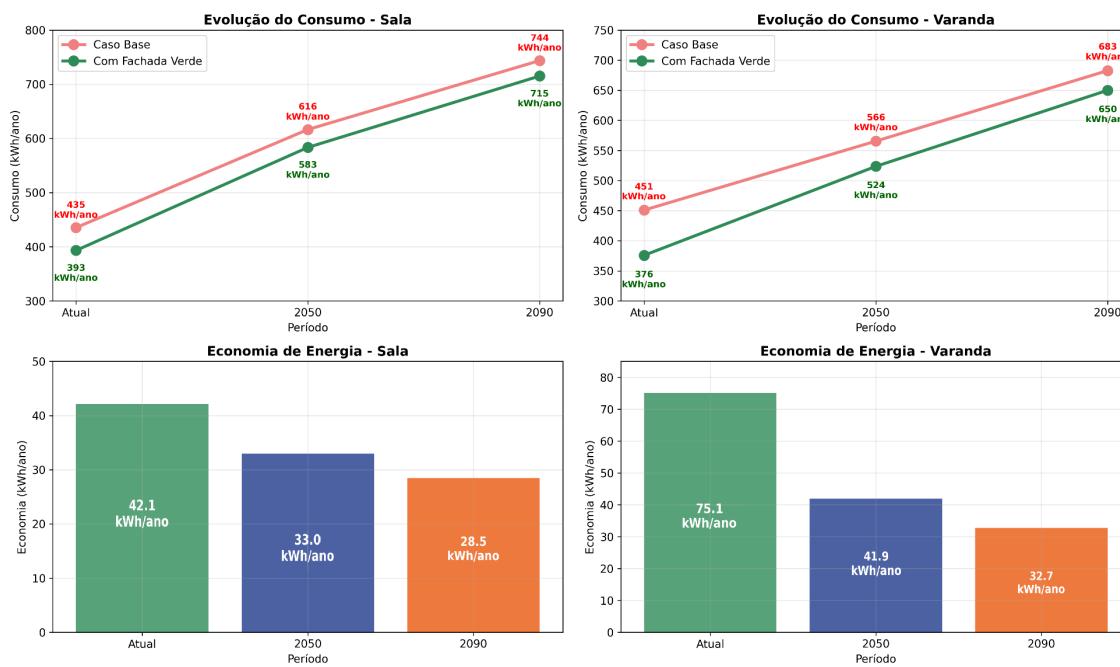
Tabela 5 — Custo por horas de desconforto ao ano

CASO BASE						
CÔMODO	ATUAL		FUTURO 2050		FUTURO 2090	
	kWh/ano	R\$	kWh/ano	R\$	kWh/ano	R\$
Sala	190	R\$ 152,18	252	R\$ 201,72	468	R\$ 374,62
Varanda	376	R\$ 301,33	441	R\$ 353,63	572	R\$ 458,22
COM FACHADA VERDE						
CÔMODO	ATUAL		FUTURO 2050		FUTURO 2090	
	kWh/ano	R\$	kWh/ano	R\$	kWh/ano	R\$
Sala	0	R\$ -	7	R\$ 5,43	122	R\$ 97,92
Varanda	12	R\$ 9,69	28	R\$ 22,41	215	R\$ 172,01

Fonte: As autoras (2025).

A análise temporal no Gráfico 3 revela que, embora a eficiência relativa da fachada verde diminua com o aquecimento global, ela mantém benefícios importantes. O consumo energético no caso base aumenta consideravelmente na sala, de 435,3 kWh (atual) para 744 kWh (2090), um aumento de 70,8%. Com a fachada verde, o aumento é de 393,2 kWh para 715,2 kWh, representando 81,9% de crescimento.

Gráfico 3 — Evolução temporal do consumo energético e economias com fachada verde.



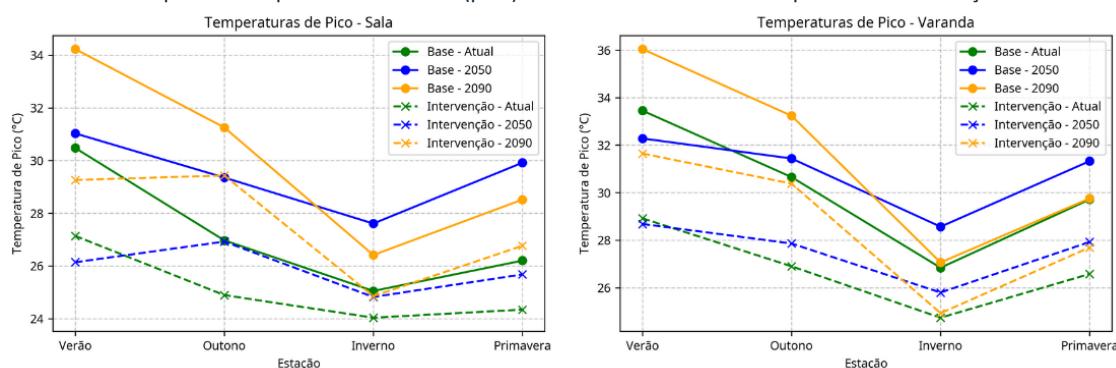
Fonte: As autoras (2025).

Na varanda, ambiente mais exposto às condições externas, também se observou economia expressiva ao deixar de consumir 364 kWh/ano, ou R\$ 291,64, ao adicionar a vegetação à fachada nas simulações atuais. Para 2050, a projeção aumenta para 413 kWh/ano, ou R\$ 331,21, e em 2090 passa para 357 kWh/ano, correspondente a R\$ 286,21. Considerando ambos os ambientes, a economia total é de R\$ 443,81 no cenário atual, R\$ 527,21 para 2050 e R\$ 562,91 para 2090.

Os resultados demonstram que a fachada verde atua como uma estratégia passiva de eficiência energética, reduzindo a carga térmica sobre o sistema de ar-condicionado. No cenário atual, a economia total de energia (sala e varanda) é de 554 kWh/ano, equivalente a uma redução de 97,9% no consumo para climatização.

A análise das temperaturas operativas máximas, registradas durante os horários de pico térmico em dias típicos de cada estação do ano, evidencia a capacidade da fachada verde de mitigar os extremos de temperatura. No verão, a temperatura operativa máxima na sala foi reduzida em 3,3°C com a implementação da fachada verde no cenário atual, passando de 30,5°C (caso base) para 27,1°C (com intervenção). Os gráficos a seguir representam as temperaturas operativas máximas (pico) para a sala e a varanda.

Gráfico 4 — Temperaturas operativas máximas (pico) na sala e varanda em dias típicos de cada estação do ano.



Fonte: As autoras (2025).

Essa redução torna-se relevante considerando que o consumo de energia para climatização tende a aumentar significativamente com as mudanças climáticas. A fachada verde oferece uma solução sustentável que, além de reduzir o consumo energético, contribui para a melhoria da qualidade ambiental urbana e o sequestro de carbono.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação de fachadas verdes em edifícios multifamiliares, como demonstrado neste estudo de caso em Vitória, Espírito Santo, representa uma estratégia eficaz para o enfrentamento dos desafios impostos pelas mudanças climáticas. Os resultados obtidos evidenciam o potencial dessa intervenção na melhoria do conforto térmico interno, na redução do consumo energético e na mitigação das temperaturas de pico, aspectos importantes para a sustentabilidade e a qualidade de vida em ambientes urbanos quentes e úmidos.

Observou-se um aumento substancial nos dias e horas de conforto térmico tanto na sala quanto na varanda, com a fachada verde proporcionando um ambiente mais agradável e resiliente às variações climáticas. Essa melhoria é particularmente relevante em cenários futuros, onde as projeções indicam um agravamento das condições térmicas. A capacidade da fachada verde de manter o conforto mesmo diante de um clima mais quente sublinha sua importância como medida adaptativa.



Do ponto de vista energético, a redução significativa no consumo de eletricidade para climatização demonstra o retorno econômico da intervenção. As economias anuais, que variam de 5 a 10h a mais de conforto em média diária dependendo do ambiente e período analisado, representam um incentivo claro para a adoção dessa tecnologia. Particularmente notável é o desempenho na varanda, onde a fachada verde reduz significativamente a demanda de climatização, transformando um ambiente com alta carga térmica em um espaço mais eficiente energeticamente.

A mitigação das temperaturas de pico, especialmente em estações críticas como o verão, reforça o papel da fachada verde na criação de microclimas mais amenos e na proteção dos espaços internos contra o superaquecimento. Esta característica é fundamental para a adaptação das edificações às condições climáticas cada vez mais extremas previstas para as próximas décadas.

Os resultados demonstram que a fachada verde constitui uma estratégia eficaz para reduzir o consumo energético de sistemas de ar-condicionado em edificações multifamiliares em climas quentes e úmidos. A solução não apenas proporciona economias energéticas e financeiras no presente, mas também aumenta a resiliência dos sistemas de climatização frente aos cenários futuros de aquecimento global.

Do ponto de vista econômico, as economias anuais de até R\$ 562,91 evidenciam que o investimento em fachadas verdes oferece retorno financeiro tangível através da redução dos custos operacionais. Essa característica, combinada com os benefícios ambientais, posiciona as soluções baseadas na natureza como elementos fundamentais para a transição energética no setor da construção civil.

A eficácia da fachada verde se manifesta de forma consistente nos três períodos analisados (atual, 2050 e 2090), demonstrando sua viabilidade como estratégia de longo prazo. Além de elevar o bem-estar dos habitantes, estas intervenções minimizam a pegada ecológica das construções e contribuem para a valorização patrimonial vinculada à sustentabilidade no contexto urbano.

Em suma, a fachada verde não apenas otimiza o desempenho térmico e energético do edifício, mas também oferece uma solução robusta e multifuncional para a adaptação urbana às mudanças climáticas. Os benefícios se estendem desde o conforto dos ocupantes até a sustentabilidade econômica e ambiental, consolidando a fachada verde como um elemento arquitetônico de valor inestimável para o futuro das cidades. A continuidade de pesquisas e a promoção de políticas públicas que incentivem a sua implementação são fundamentais para maximizar esses impactos positivos em larga escala.



REFERÊNCIAS

BORGES, C. M.; PAGEL, E. C. Mudanças climáticas e habitação multifamiliar: influência dos materiais do peitoril de varanda no desempenho térmico de apartamento em Vitória/ES. **Scientific Journal ANAP**, v. 3, n. 13, p. 525-541, 2025. Edição Especial - Anais do II Congresso Brasileiro "Mudanças Climáticas e a Resiliência Urbana". ISSN 2965-0364.

BRACHT, M. K.; OLINGER, M. S.; KRELLING, A. F.; GONÇALVES, A. R.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Multiple regional climate model projections to assess building thermal performance in Brazil: understanding the uncertainty. **Journal of Building Engineering**, v. 88, n. 109248, 2024.

DAIKIN. **Eficiência energética**: o papel das etiquetas de consumo de energia em ar-condicionado. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.daikin.com.br/blog/2025/02/03/eficiencia-energetica-do-ar-condicionado-entenda/>. Acesso em: 18 abr. 2025.

DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD. **DesignBuilder Version 7.2**: User Manual. Gloucestershire: DesignBuilder Software, 2023.

EDP BRASIL. **Tarifas Vigentes**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.edp.com.br/tarifas-vigentes/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

HABERL, J. S.; CULP, C.; CLARIDGE, D. E. ASHRAE's Guideline 14-2002 for measurement of energy and demand savings: how to determine what was really saved by the retrofit. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR ENHANCED BUILDING OPERATIONS, 2005, Pittsburgh. **Anais [...]**. Pittsburgh: Energy Systems Laboratory, 2005.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas do Brasil**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 22 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Vitória (ES) | Cidades e Estados | IBGE**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/es/vitoria.html>. Acesso em: 16 abr. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. **Programa brasileiro de etiquetagem**: tabela de eficiência energética - ar-condicionado. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/condicionadores-de-ar>. Acesso em: 17 abr. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2021: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf. Acesso em: 10 abr. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Buildings - energy system**. Paris, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/buildings>. Acesso em: 14 abr. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7726:2018**: ergonomics of the thermal environment - instruments for measuring physical quantities. Geneva: ISO, 2018.

KARIMI, Kimia; FARROKHZAD, Mohammad; ROSHAN, Gholamreza; AGHDASI, Mahnaz. Evaluation of effects of a green wall as a sustainable approach on reducing energy use in temperate and humid areas. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 262, n. 112014, p. 112014, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778822001852>. Acesso em: 17 set. 2024.

NATIONAL GEOGRAPHIC. **Mudança climática**: o que é, como é causada e o que você pode fazer para revertê-la. 2022. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2022/10/mudanca-climatica-o-que-e-como-e-causada-e-o-que-voce-pode-fazer-para-reverte-la>. Acesso em: 21 maio 2025.

OTTELÉ, Marc. **The green building envelope vertical greening**. 2011. Tese (Doutorado) – Technische Universiteit Delft, Delft, 2011. Disponível em: <https://carlstahl-greenwalls.nl/wp-content/uploads/2020/06/The-Green-Building-Envelope-def.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2024.

PAGEL, E. C.; ALVAREZ, C. E. de; REIS JÚNIOR, N. C. Avaliação e percepção do usuário em relação ao conforto térmico e qualidade do ar em varandas com fechamento em vidros móveis situadas em uma região urbana industrializada. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 13, n. 3, p. 57-78, 2018.



- PALERMO, S. A.; TURCO, M. Green wall systems: where do we stand? **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 410, n. 012013, p. 1–10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012013>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338808990_Green_Wall_systems_where_do_we_stand. Acesso em: 2 nov. 2024.
- RAJI, Babak; TENPIERIK, Martin J.; DOBBELSTEEN, Andy Van Den. The impact of greening systems on building energy performance: a literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 45, n. 5, p. 610–623, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.011>.
- REFAAT, T.; EL-ZOKLAH, M. The vertical greening envelope and its effect on energy consumption efficiency in a residential building, case study: twin house, 6th of October City. **JES - Journal of Engineering Sciences**, [s. l.], v. 50, n. 5, p. 226–247, 2022. Disponível em: https://jesaun.journals.ekb.eg/article_249516_3c87d7ba0783df4c7d30242582498f4c.pdf. Acesso em: 11 set. 2024.
- SALEH, P. H. Thermal performance of glazed balconies within heavy weight/thermal mass buildings in Beirut, Lebanon's hot climate. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 291–303, 2015.
- SIGMA SENSORS. **Data Logger de Temperatura**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://sigmasensors.com.br/produtos/datalogger-de-temperatura-suporta-sensor-termopar-tipo-j-k-s-e-t>. Acesso em: 7 abr. 2025.
- URBAN GREENING. **UK guide to green walls**: an introductory guide to designing and constructing green walls in the UK. 2013. Disponível em: <https://www.urbangreening.info/>. Acesso em: 29 out. 2024.
- WRIGHT, Nathaniel. **Thermal efficacy of green walls in building structures in the Northeast United States**. 2023. Honor Thesis Project – University of Massachusetts, Amherst, 2023. Disponível em: <https://scholarworks.umass.edu/entities/publication/90ce11ff-a77b-4a41-8dbe-aad52cd1594c>. Acesso em: 30 out. 2024.
- YEANG, Ken; POWELL, Robert. **Designing with nature**: the ecological basis for architectural design. New York: McGraw-Hill, 2007.
- YOSHIMI, Juri; ALTAN, Hasim. Thermal simulations on the effects of vegetated walls on indoor building environments. In: BUILDING SIMULATION 2011: 12TH CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 2011, Sydney. **Anais** [...]. Sydney: International Building Performance Simulation Association, 2011. p. 1438–1483. Disponível em: https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2011/papers/bs2011_1479.pdf. Acesso em: 11 set. 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (Fapes) por meio do edital nº 21/2023 (Mulheres na Ciência), que tornou este trabalho possível.



DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

CMB: Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Redação - Rascunho Inicial, Revisão e Edição Final.

ECP: Concepção e Design do Estudo, Aquisição de Financiamento, Redação - Revisão Crítica, Supervisão.

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, Camila Mauro Borges e Érica Coelho Pagel, declaramos que o manuscrito intitulado "Fachadas Verdes no Enfrentamento às Mudanças Climáticas: Desempenho Térmico em Edifício Multifamiliar em Clima Quente e Úmido":

- Vínculos Financeiros:** Não possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho.
 - Relações Profissionais:** Não possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados.
 - Conflitos Pessoais:** Não possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.
-