

DESEMPENHO TÉRMICO DE JARDINS VERTICAIS DE TIPOLOGIA FACHADA VERDE

THERMAL PERFORMANCE OF VERTICAL GARDENS OF GREEN FAÇADE TIPOLOGY

Luiza Sobhie Muñoz ¹

Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, Brasil, luiza.smunoz@gmail.com

Murilo Cruciol Barbosa ²

Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, Brasil, murilo_cruciol@yahoo.com.br

Maria Solange Gurgel de Castro Fontes ³

Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, Brasil, sgfontes@faac.unesp.br

João Roberto Gomes de Faria ⁴

Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, Brasil, joaofari@faac.unesp.br

Resumo

As fachadas verdes, uma das tipologias de jardins verticais, utilizam espécies de trepadeiras ou pendentes que crescem e se desenvolvem em superfícies verticais. Sua aplicação nas fachadas dos edifícios traz diversos benefícios, tais como a melhoria das condições de conforto térmico em seu interior e a diminuição dos efeitos das ilhas de calor urbanas. Essa melhoria ocorre em razão dos seguintes mecanismos de ação dos jardins verticais: (i) sombreamento; (ii) resfriamento evapotranspirativo; (iii) influência na dinâmica do vento e (iv) isolamento térmico da edificação. Nesse contexto, esse artigo apresenta o estado da arte acerca do potencial amenizador térmico das fachadas verdes, a partir da análise dos objetivos, metodologias e principais resultados de artigos de periódicos e dissertações buscados nas bases Scopus, Web of Science™, P@rthenon e a Biblioteca Digital Brasileira de Dissertações e Teses. Do material encontrado foram analisados 23 trabalhos, selecionados pelos seguintes critérios: (i) trabalhos que tratam do desempenho térmico das fachadas verdes e (ii) trabalhos experimentais e estudos de caso. Os resultados confirmam o potencial amenizador térmico das fachadas verdes e indicam lacunas de pesquisa, como a falta de trabalhos que comparem o desempenho térmico de diferentes espécies de trepadeiras e fachadas verdes diretas e indiretas, e lacunas informacionais, como a escassez de detalhes sobre as espécies selecionadas e as estruturas e materiais adotados nos estudos. Além disso, os resultados também indicam temas para possíveis futuros trabalhos sobre o desempenho térmico dessa tipologia de jardim vertical.

Palavras-chave: Jardim vertical. Desempenho térmico. Fachada verde.

Abstract

Green façades, a kind of vertical gardens, use climbing or creeping species that grow and develop on vertical surfaces. Its application in buildings facades brings some benefits, like an improvement of the internal thermal comfort as well as a reduction of the urban heat-island effect. Such improvement occurs due to these vertical gardens mechanisms: (i) shading; (ii) evapotranspiration cooling effect; (iii) wind dynamics influence and (iv) thermal insulation. The following paper aims to develop a literature review about the thermal mitigation potential of green façades, analyzing objectives, methodologies and main results of papers published in scientific journals and theses searched on Scopus, Web of Science, P@rthenon databases and the Brazilian Digital Library of Dissertations and Theses. As a result of this research 23 studies were analyzed, which were defined by the following choice criteria: (i) studies that investigates the thermal performance of the green façades and (ii) experimental works and cases of study. The analyses confirm the thermal reduction potential of green façades and also research gaps, such as the lack of work comparing the thermal performance of different species of climbers and direct and indirect green façades, and informational gaps such as the scarcity of details about the selected species and materials adopted in the studies. In addition, the results also indicate subjects about green façades thermal performance, for future works.

Keywords: Vertical Garden. Thermal performance. Green façade.

How to cite this article:

MUÑOZ, Luiza Sobhie et al. Desempenho térmico de jardins verticais de tipologia fachada verde. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 10, p. e019013, mar. 2019. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8652775>>. Acesso em: 27 mar. 2019. doi:<https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8652775>.

Received in 24.06.2018 - accepted in 17.02.2019 - published in 27.03.2019

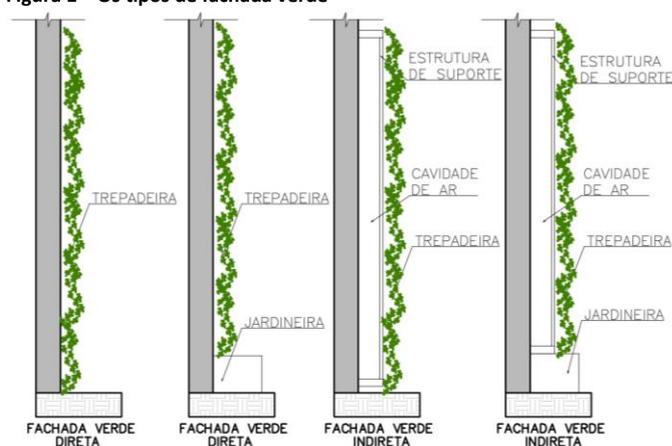
e019013-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 10, p. e019013, 2019, ISSN 1980-6809

Introdução

Os jardins verticais surgem como uma alternativa à degradação ambiental causada pela urbanização, melhorando o desempenho da edificação e de seu entorno. Eles permitem a integração entre edificação e natureza e trazem benefícios ambientais, sociais e econômicos, como a diminuição dos efeitos das ilhas de calor urbanas (PERINI et al., 2013), a melhoria do desempenho térmico e a economia energética da edificação (PÉREZ et al., 2014; SAFIKHANI et al., 2014b; RAZZAGHMANESH; RAZZAGHMANESH, 2017).

A fachada verde é um tipo de jardim vertical constituído por espécies de trepadeiras ou pendentes e podem ser de dois modelos: diretas, quando a vegetação usa a própria fachada da edificação como suporte, ou indiretas, nas quais estruturas especialmente projetadas darão suporte à vegetação e guiarão seu crescimento e desenvolvimento (PERINI et al., 2013; HUNTER et al., 2014; SAFIKHANI et al., 2014b; SCHERER, 2014; MANSO; CASTRO-GOMES, 2015; BESIR; CUCE, 2018). Destaca-se que, em ambos os casos, a vegetação pode estar plantada diretamente no solo ou em jardineiras (CRUCIOL BARBOSA; FONTES, 2016) (Figura 1).

Figura 1 – Os tipos de fachada verde



Fonte: Os autores.

Como alternativa bioclimática, revestem as fachadas e paredes das construções e evitam a incidência direta da radiação solar, o que pode aumentar o desempenho térmico do edifício através de quatro mecanismos: sombreamento, isolamento térmico, barreira ao vento e resfriamento evaporativo (PEREZ et al., 2011; HUNTER et al., 2014; SUSOROVA, 2015; WONG; BALDWIN, 2016; BESIR; CUCE, 2018). Pelo sombreamento e isolamento térmico, a vegetação e a camada de ar existente entre a parede e a folhagem bloqueiam a radiação solar direta e reduzem a entrada de calor na edificação (WONG et al., 2010; PÉREZ et al., 2011; HUNTER et al., 2014; WONG; BALDWIN, 2016); como barreira ao vento, a fachada verde diminui a troca térmica por convecção (SUSOROVA; AZIMI; STEPHENS, 2014); a evapotranspiração consome calor sensível para evaporação da água do solo e da superfície das folhas e aumenta a umidade no entorno (WONG et al., 2010; SUNAKORN; YIMPRAYOON, 2011).

Desta forma, a fachada verde diminui o fluxo de calor de entrada para os ambientes internos e, com isso, contribui para que o edifício seja mais eficiente térmica e energeticamente, em climas predominantemente quentes. Estudos verificaram a redução de até 20% no consumo de energia com aparelhos de ar condicionado (WONG; BALDWIN, 2016).

Os trabalhos sobre o desempenho térmico das fachadas verdes são recentes e realizados em diversas localidades ao redor do mundo, o que gera dificuldade de

sistematização e comparação dos resultados, em função da variedade de processos metodológicos e dos parâmetros avaliados. Destaca-se aqui, o trabalho realizado por Montanari e Labaki (2017), cujo objetivo foi identificar o comportamento térmico de ambientes internos sob a influência de envoltórias verdes e quais as suas possíveis variáveis de desempenho térmico. Diferentemente, este trabalho tem por objetivo realizar uma revisão dos estudos sobre o desempenho térmico especificamente das fachadas verdes, enfatizando a análise de seus modelos, espécies utilizadas, estratégias metodológicas e principais resultados.

Materials e métodos

Inicialmente foi feita uma busca nas bases de dados Scopus (Elsevier), Web of Science (Clarivate Analytics), P@rthenon (Unesp) e na Biblioteca Digital Brasileira de Dissertações e Teses (IBICT) através das seguintes palavras chave: desempenho térmico (thermal performance), fachada verde (green façade) e jardim vertical (vertical garden). A busca foi realizada de forma única e combinada e as palavras chave deveriam estar presentes no título, abstract e palavra-chave do trabalho. Todos os estudos referentes ao tema “fachadas verdes” foram selecionados de forma retrospectiva nos idiomas português e inglês.

Realizou-se a seleção dos trabalhos que seriam incluídos na revisão por meio de dois critérios: 1 – que abordassem o desempenho térmico de fachadas verdes e 2 – que fossem pesquisas experimentais e estudos de caso. Portanto, foram excluídos os trabalhos de revisão, de simulação, com informação repetida ou disponível em outros artigos, que não apresentavam estratégias metodológicas claras e aqueles que, mesmo com o tema fachadas verdes, abordavam outros tópicos sobre o assunto.

A partir dos levantamentos foi possível identificar lacunas de conhecimento e tendências de pesquisas, além de problemas em sua execução. Os resultados da revisão são apresentados em quadros que permitem a clara visualização das principais informações e resultados.

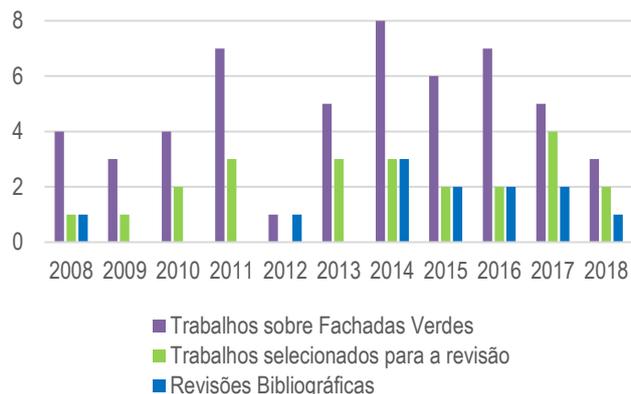
Características gerais dos estudos selecionados

A pesquisa inicial apresentou um total de 53 trabalhos sobre o tema “fachadas verdes”, dentre os quais foram selecionados 23 estudos sobre seu desempenho térmico. Desses trabalhos, 11 (48%) realizaram estudos de caso em fachadas verdes já existentes, enquanto 12 (52%) construíram as fachadas verdes. A Figura 2 apresenta as principais características destes trabalhos, sendo possível observar que os estudos tiveram início em 2008 e atingiram o seu auge no ano de 2014.

Quanto à nomenclatura empregada pelos autores, treze deles utilizam o termo “fachada verde” (green façade), enquanto Sunakorn e Yimrayoon (2011) utilizam o termo “biofachada” (biofacade), Perini et al. (2011) e Hoelscher et al. (2016) “fachada verde” (façade greening) e Koyama et al. (2015) “parede verde trepadeira” (climber green wall).

Eumorfopoulou e Kontoleon (2009) e Susorova, Azimi e Stephens (2014) não se referem ao jardim vertical com termos específicos, mas apenas como superfícies vegetadas. Apesar de utilizarem a nomenclatura “green façade”, Pérez et al. (2011) também utilizam o termo “cortina verde” (green curtain) no resumo do artigo. Ip, Lam e Miller (2010) fazem uso do termo “biossombreador” (bioshader), totalmente único e derivado de sua metodologia. Tsoumarakis et al. (2008) e Lee e Jim (2017) utilizam o termo específico parede verde (green wall).

Figura 2. Quantidade de estudos ao longo dos anos



Fonte: Os autores.

No Quadro 1 são apresentadas as principais informações sobre os estudos selecionados, como: nome dos autores, ano de publicação, nomenclatura utilizada, localidade em que o estudo foi desenvolvido, clima informado pelos autores, período de estudo, orientação solar das superfícies estudadas e o tipo de fachada verde utilizada no experimento. Cada estudo recebe uma numeração que é utilizada para referência ao longo do texto.

Destaca-se o erro de nomenclatura encontrado no trabalho de Jaafar et al. (2013), que se refere a uma fachada verde por “living wall” e a uma parede viva por “green façade”, invertendo os conceitos.

Em relação à localidade, a maioria dos trabalhos ocorreu em países asiáticos, de clima quente e úmido, e europeus, desde países com clima quente e seco, como o Centro-sul da Espanha e Grécia, até Alemanha, Holanda e Reino Unido, que apresentam clima temperado. Destaca-se a Espanha, com os trabalhos de Pérez et al. (2011) e Pérez et al. (2017). Juntos, os países europeus e asiáticos correspondem a 78% dos trabalhos selecionados.

Quanto ao período de estudo, observa-se um padrão, em que o verão é a época escolhida por 12 dos 23 trabalhos, o que corresponde a 52% do total. O período de inverno foi estudado exclusivamente no trabalho de Cameron, Taylor e Emmett (2015), e só é analisado, de maneira conjunta, em cinco trabalhos: Wong et al. (2010), Pérez et al. (2011), Matheus et al. (2016), Otellé e Perini (2017), Vox, Blanco e Schettini (2018). O estudo de Jaafar et al. (2013) é o único cuja estação do ano em que ocorreu o experimento não é informada, enquanto Pérez et al. (2011) são os únicos que analisam e experimentam todas as estações do ano. Wong et al. (2010) também se destacam por realizar o experimento durante três estações do ano.

Em relação à orientação das fachadas estudadas, destaca-se a Sul (a mais ensolarada no hemisfério Norte), analisada, exclusivamente, em cinco trabalhos: Koyama et al. (2013), Suklje, Arkar e Medved (2014), Koyama et al. (2015), Yin et al. (2017) e Vox, Blanco e Schettini (2018). Wong et al. (2010), Cameron, Taylor e Emmett (2015) e Otellé e Perini (2017) não informam a orientação, e cinco trabalhos analisam diversas orientações: Pérez et al. (2011), Susorova, Azimi e Stephens (2014), Hoelscher et al. (2016), Pérez et al. (2017), Lee e Jim (2017) e Yang et al. (2018).

Do total de trabalhos avaliados, seis (26%) tratam especificamente da tipologia “fachada verde direta”, enquanto catorze (60%) estudam a tipologia “fachada verde indireta”.

Apenas Perini et al. (2011), Morelli e Labaki (2013) e Hoelscher et al. (2016) analisam as duas tipologias simultaneamente e promovem comparações entre elas.

Quadro 1 – Estudos sobre desempenho térmico de fachadas verdes e suas principais características

Nº	Referência	Nomenclatura	Localidade	Clima (autores)	Período de estudo	Orientação	Tipo
01	Tsoumarakis et al. (2008)	Green wall	-	-	Verão e Outono	Oeste	FVD
02	Eumorfopoulou e Kontoleon (2009)	Superfícies vegetadas	Grécia	Temperado	Verão	Leste	FVD
03	Ip, Lam e Miller (2010)	Biosombreador	Reino Unido	-	Verão	Sudoeste	FVI
04	Wong et al. (2010)	Fachada Verde	Singapura	Tropical	Inverno/ Primavera/ Verão	-	FVI
05	Pérez et al. (2011)	Fachada Verde	Espanha	Mediterrâneo Continental	Todo o ano	Nordeste, Sudoeste e Sudeste	FVI
06	Perini et al. (2011)	“façade greening”	Holanda	Temperado Marítimo	Outono	Nordeste	FVD/FVI
07	Sunakorn e Yimprayoon (2011)	Biofachada	Tailândia	Tropical	Verão	Oeste	FVI
08	Jaafar et al. (2013)	Fachada Verde	Malásia	Tropical	-	Norte	FVI
09	Koyama et al. (2013)	Fachada Verde	Japão	-	Verão	Sul	FVI
10	Morelli e Labaki (2013)	Parede Verde	Brasil	Tropical de Altitude	Verão	Norte	FVD/FVI
11	Safikhani et al. (2014a)	Fachada Verde	Malásia	Quente e úmido	Primavera	Oeste	FVI
12	Suklje, Ankar e Medved (2014)	Fachada Verde	Eslovênia	-	Verão	Sul	FVI
13	Susorova, Azimi e Stephens (2014)	Superfícies vegetadas	Estados Unidos	Frio	Verão	Norte, Sul, Leste e Oeste	FVD
14	Cameron, Taylor e Emmett (2015)	Fachada Verde	Reino Unido	Temperado Marítimo	Inverno	-	FVI
15	Koyama et al. (2015)	Parede Verde Trepadeira	Japão	Úmido Subtropical	Outono	Sul	FVI
16	Hoelscher et al. (2016)	“façade greening”	Alemanha	-	Verão	Leste, Oeste, Sudoeste	FVD/FVI
17	Matheus et al. (2016)	Fachada Verde	Brasil	-	Verão e Inverno	Sudeste	FVD
18	Pérez et al. (2017)	Fachada Verde	Espanha	Mediterrâneo Continental	Verão	Leste, Sul e Oeste	FVI
19	Yin et al. (2017)	Fachada Verde	China	Monções Tropical	Verão	Sul	FVD
20	Otellè e Perini (2017)	Fachada Verde	-	-	Verão e Inverno	-	FVD
21	Lee e Jim (2017)	Green Wall	Hong Kong	Subtropical	Verão	Nordeste/Noroeste	FVI
22	Yang et al. (2018)	Fachada Verde	China	-	Verão	Norte e Sul	FVI
23	Vox, Blanco e Schettini (2018)	Fachada Verde	Itália	Mediterrâneo (K)	Verão e Inverno	Sul	FVI

Legenda: FVD – Fachada verde direta; FVI – Fachada verde indireta; K – seguiu classificação de Köppen-Geiger. Fonte: Os autores.

Resultados

Processos metodológicos: parâmetros analisados e mecanismos de ação

Todos os trabalhos apresentaram processos metodológicos claros e explicativos, com descrição do local em que o experimento está inserido e parâmetros avaliados. No entanto, os processos utilizados são muito variados, não seguem um padrão e geram diferentes parâmetros e resultados.

Cada parâmetro avaliado corresponde a um mecanismo de ação da fachada verde e, assim, foi possível compreender o desempenho térmico de cada uma delas. Os parâmetros monitorados com maior frequência nos trabalhos foram: temperaturas superficiais externas e internas; temperaturas do ar externas e internas; umidade relativa do ar interna e externa; velocidade do vento (Quadro 2).

Quadro 2 – Estudos sobre desempenho térmico de fachadas verdes e suas principais características

Nº	Parâmetros	Mecanismos atuantes
01	Ti, Te, Tse, Tsi e Ur interna e externa	Sombreamento e isolamento térmico
02	Te, Ti, Tse, Tsi e Tf.	Sombreamento
03	Rs, Cf e Pc.	Sombreamento
04	Tse, Te, T substrato	Sombreamento e evapotranspiração
05	Iluminância externa e na cavidade, Te, Tc, Tse, Ur externa e cavidade e Var externa.	Sombreamento, evapotranspiração e barreira ao vento.
06	Tse, Te e Var.	Sombreamento e barreira ao vento
07	Ti, Te, Ur interna e externa e Var.	Sombreamento e aumento na velocidade do vento
08	Tc, Te, Ur cavidade e externa	Sombreamento e aumento de velocidade do vento
09	Te, Tse, Ur externa, Pc.	Sombreamento, evapotranspiração
10	Te, Ti, Tse, Tsi, Ur interna e externa Var.	Sombreamento, evapotranspiração e isolamento térmico
11	Ti, Te, Tse, Tsi, Ur interna e externa.	Sombreamento
12	Rs, Te, Ti, Ur externa.	Sombreamento
13	Te, Ti, Tse, Tsi, Var externa, Ur externa.	Sombreamento, evapotranspiração e redução da velocidade do vento
14	Te, Tse, Var externo.	Isolamento térmico e barreira ao vento
15	Tf, Trf	Evapotranspiração
16	Tse, Tf, Tsi, Te, Ur externa	Sombreamento e evapotranspiração
17	Te, Tse, Tsi, Tg, Var.	Sombreamento, evapotranspiração e isolamento térmico
18	Tse, Tsi, Te, Tc, Ti, Ur externa e interna.	Sombreamento
19	Te, Rs, Ur externa e Var.	Sombreamento
20	Tar, Tse, Tsi e Resistência.	Sombreamento e isolamento térmico
21	Tse, Tsi, Te e Ti	Sombreamento e isolamento térmico
22	Tse, Tsi, Tc, Ur cavidade, Ti, Ur interna, Var interna, Tg.	Sombreamento e evapotranspiração
23	Te, Ur, Var, Tse.	Sombreamento

Legenda: Te – temperatura do ar externa; Ti – temperatura do ar interna; Tse – temperatura superficial externa; Tsi – temperatura superficial interna; Tf – temperatura folhagem; Tg – temperatura de globo; Pc – percentual cobertura; Cf – Camada foliar; Ur – umidade relativa; Var – velocidade do ar; Tc – temperatura na cavidade; Rs – radiação solar; Trf – transpiração foliar. Fonte: Os autores.

O potencial amenizador térmico dos jardins verticais se baseia em diferentes mecanismos de ação que promovem o resfriamento da edificação e variam conforme a sua tipologia. Para as fachadas verdes, estes mecanismos são: (i) sombreamento, ação que intercepta a radiação solar; (ii) evapotranspiração, função biológica da vegetação que promove o aumento da umidade e, conseqüentemente, um possível resfriamento em locais de clima quente; (iii) variação do efeito da velocidade do vento na edificação e (iv) isolamento térmico da edificação através da cavidade de ar formada entre a folhagem e a edificação (PEREZ et al., 2011; HUNTER et al., 2014; WONG; BALDWIN, 2016; BESIR; CUCE, 2018).

Segundo Wong et al. (2010), o sombreamento causado pela interceptação da radiação solar reduz o aquecimento da fachada e o conseqüente fluxo de calor para o interior das edificações, o que diminui sua temperatura. Ainda segundo os mesmos autores, fachadas verdes podem atenuar em torno de 40% a 80% da radiação solar através de reflexão e absorção das folhas. A cobertura vegetal funciona como material isolante, mantendo a temperatura interna da edificação mais baixa do que a externa durante o

dia. Durante a noite, o calor armazenado se dissipa mais lentamente e proporciona conforto térmico no interior do ambiente adjacente (MATHEUS et al., 2016).

O trabalho de Suklje, Arkar e Medved (2014) se destaca do restante no que diz respeito à metodologia, uma vez que os autores instalaram um duto de ar na parte posterior da fachada verde indireta, de maneira a verificar sua temperatura final em função do sombreamento, e confirmar e quantificar o potencial amenizador térmico desse jardim.

A metodologia aplicada por Yin et al. (2017) também se destaca das demais pois, apesar de medições *in loco* terem sido realizadas, os resultados finais foram obtidos através de softwares 3D e de sistema de informação geográfica para realizar a contagem de pixels. Koyama et al. (2013) utilizam a contagem de pixels para o cálculo do percentual de cobertura vegetal a partir da transformação de registros fotográficos retirados em campo em imagem digital.

Lee e Jim (2017) apresentam uma metodologia que se destaca de todas as outras, uma vez que é o único trabalho que investiga o desempenho térmico de fachadas verdes indiretas em diferentes condições de tempo no período do verão: dias ensolarados, nublados e chuvosos.

O mecanismo de evapotranspiração é função biológica da vegetação e promove o aumento da umidade do ar: a folhagem absorve parte da radiação solar e a transforma em calor latente de evaporação da água. Além disso, é responsável por melhorar a qualidade do ar devido à absorção de partículas e gases poluentes. Em todos os fenômenos aqui relacionados a densidade de cobertura vegetal é fator determinante (WONG et al., 2010; SUNAKORN E YIMPRAYOON, 2011; WONG; BALDWIN, 2016; BESIR; CUCE, 2018). Em trabalho de revisão sistemática, Montanari e Labaki (2017) destacam, também, a importância de fatores como a evapotranspiração e a densidade de cobertura vegetal para o bom desempenho térmico das fachadas verdes.

Importante para o desempenho térmico das fachadas verdes, o mecanismo de ação de variação da velocidade do vento pode promover sua redução próximo à fachada das edificações e depende de fatores como a densidade da cobertura vegetal. Este fenômeno pode bloquear, parcialmente, o vento e reduzir a transferência de calor através de convecção e infiltração de ar para o interior das edificações (SUSOROVA; AZIMI; STEPHENS, 2014; SUSOROVA, 2015; WONG; BALDWIN, 2016; BESIR; CUCE, 2018). Este mecanismo é importante não apenas para manter o conforto térmico em locais de clima frio, como também para diminuir os gastos de energia com aquecimento. Em contrapartida, tem efeito negativo para locais de clima quente, visto que a vegetação impede o resfriamento através da convecção (SUSOROVA, 2015; WONG; BALDWIN, 2016).

O efeito de isolamento térmico está diretamente associado à densidade da cobertura vegetal e à troca de calor através da cavidade de ar formada entre a fachada verde e a edificação (PÉREZ et al., 2011; WONG; BALDWIN, 2016; BESIR; CUCE, 2018). Este espaço promove o isolamento térmico da edificação devido à baixa taxa de renovação do ar, o que diminui a troca de calor por convecção.

Os intervalos de medição são os mais variados, mas a maioria utiliza cinco minutos, como: Koyama et al. (2013), Hoelscher et al. (2016), Pérez et al. (2017) e Safikhani et al. (2014a). A duração do monitoramento também é variada, mas campanhas de três dias são as mais comuns.

Tipos de fachadas verdes, estruturas e espécies utilizadas

Sejam diretas ou indiretas, o bom desempenho térmico das fachadas verdes depende de detalhes como a estrutura utilizada e as espécies selecionadas. Os tipos de estrutura para as fachadas verdes indiretas são variados, mas a treliça modular, composta por treliça e jardineira, é a mais utilizada e está presente em sete experimentos (30%). Este tipo foi utilizado por Ip, Lam e Miller (2010), Wong et al. (2010), Pérez et al. (2011), Perini et al. (2011), Sunakorn e Yimprayoon, (2011), Safikhani et al. (2014a) e Yang et al. (2018). O sistema de cabos foi utilizado nos experimentos de Jaafar et al. (2013), Cameron, Taylor e Emmett (2015), Hoelscher et al. (2016) e Lee e Jim (2017). Outro tipo de estrutura utilizada nos experimentos foram as telas, tanto de plástico, nos estudos de Koyama et al. (2013) e Koyama et al. (2015), quanto a de aço, no experimento de Pérez et al. (2017) ou metálica, em Vox, Blanco e Schettini (2018). Morelli e Labaki (2013) utilizam treliça, com a vegetação plantada diretamente no solo.

A cavidade de ar formada entre a edificação e a folhagem da fachada verde indireta promove o isolamento térmico entre a construção e a área externa e sua espessura é um detalhe importante para o seu desempenho térmico. De acordo com Lee e Jim (2017), quanto maior for sua espessura maior é o resfriamento da superfície externa da edificação. Dos trabalhos avaliados, apenas Ip, Lam e Miller (2010), Wong et al. (2010), Pérez et al. (2011) e Cameron, Taylor e Emmett (2015) não especificam o distanciamento entre a fachada verde e a edificação. Detalhes dos tipos de estruturas utilizadas em cada trabalho e ilustrações das mesmas são apresentados no Quadro 3 e Figura 3, respectivamente.

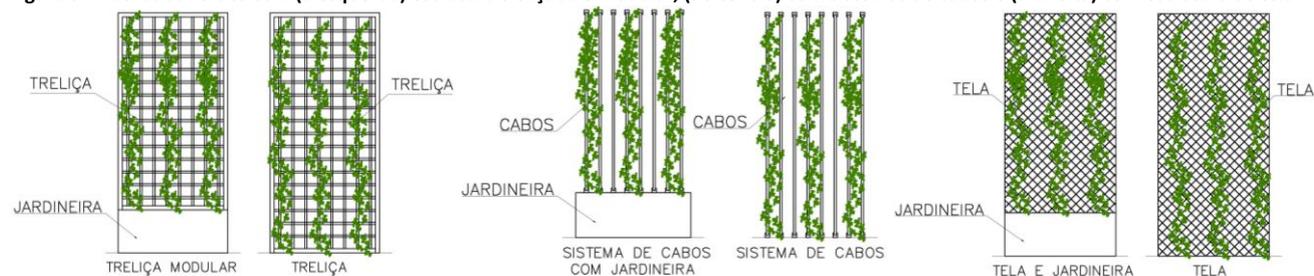
Quadro 3 – Estruturas utilizadas nos trabalhos de desempenho térmico de fachadas verdes indiretas e o tamanho das cavidades de ar formadas

Nº	Tipo de estrutura utilizada	Cavidade de ar
03	Treliça modular	-
04	Treliça modular	-
05	Treliça modular	-
06	Treliça modular	20 cm
07	Treliça modular	70 cm
08	Sistema de cabos	123 cm
09	Tela de plástico	2,5 cm
10	Treliça	20 cm
11	Treliça modular	15 cm
12	-	80 cm
14	Sistema de cabos	-
15	Tela de plástico	20 cm
16	Sistema de cabos	20 cm
18	Tela de aço	20 cm
21	Sistema de cabos	100/30 cm
22	Treliça modular	70 cm
23	Tela metálica	15 cm

Fonte: Os autores.

A maioria dos trabalhos compara os resultados obtidos entre as superfícies que recebem as fachadas verdes e as superfícies “controle”, sem vegetação. Apenas Pérez et al. (2011), Koyama et al. (2015) e Ip, Lam e Miller (2010) não utilizam superfícies “controle”.

Figura 3 – Fachadas verdes com (a esquerda) estrutura treliçada e modular, (ao centro) com sistemas de cabos e (a direita) com estrutura de tela



Fonte: Os autores.

Tsoumarakis et al. (2008), Eumorfopoulou e Kontoleon (2009), Wong et al. (2010), Pérez et al. (2011), Perini et al. (2011), Susorova, Azimi e Stephens (2014), Hoelscher et al. (2016), Matheus et al. (2016), Yin et al. (2017), Lee e Jim (2017) e Yang et al. (2018) realizaram os estudos em fachadas verdes já existentes. Em todos os demais trabalhos as fachadas verdes foram construídas, sejam em paredes de edificações, em células teste ou independentes, como é o caso dos trabalhos de Koyama et al. (2013; 2015). Destaca-se aqui o trabalho de Otellè e Perini (2017), pois foi o único em que o experimento foi totalmente construído e realizado em condições laboratoriais. Detalhes dos experimentos, superfícies controle e equipamentos utilizados nos trabalhos em que as fachadas verdes foram construídas são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Estudos sobre desempenho térmico de fachadas verdes e suas principais características (continua)

Nº	Estrutura da fachada verde		Estrutura controle		Equipamentos
	Dimensões	Materiais	Dimensões	Materiais	
03	Treliça: não informa; Jardineira: 0,4x0,3x0,6 m (LxPxA).	Treliça: estrutura metálica composta por cordas e cabos; Jardineira: madeira compensada.	Sala 3x3 m (LxP); Janela 1,2x2,1 m (LxA).	Não informa quanto à edificação; Janela de vidro comum.	Especifica modelos; Especifica a posição; Especifica precisão.
07	Treliça: não informa.	Treliça: estrutura metálica;	Duas salas 3x3 m (LxP);	Divisórias: poliestireno; Teto: placa cimentícia.	Especifica modelos; Especifica a posição; Especifica precisão.
08	Cabos: 2,5 m de altura; Jardineiras: 0,16 m de largura.	Cabos: metálicos; Jardineira: polipropileno reciclado.	Estudo realizado em espaço de transição de edifício em que não foi especificada a sua constituição material.		Especifica modelos; Especifica a posição; Especifica precisão.
09	Tela: 0,91x1,8 m (LxA);	Tela: plástico.	Estudo realizado em área externa livre.		Especifica modelos; Especifica a posição; Especifica precisão.
10	Treliça: não informa.	Treliça: não informa.	Células teste: 1 m ² de área cada (3 unidades); Laje: 5 cm de espessura.	Paredes: tijolo comum e totalmente rebocadas; Cobertura: laje; Pintura externa: verde, azul e vermelha; Pintura interna: branca; Fechamento posterior: MDF.	Especifica modelos; Especifica a posição.
11	Treliça: 1x1,6 m (LxA); Jardineira: não informa.	Treliça: madeira com malha; Jardineira: madeira.	Caixa teste: 0,6x0,6x1,6 m (LxPxA).	Caixa teste: madeira.	Especifica modelos; Especifica a posição.
12	Não informa.	Não informa.	Não informa.	Jardim instalado sobre piso de concreto.	Especifica modelos; Especifica a posição; Especifica precisão.

Quadro 4 – Estudos sobre desempenho térmico de fachadas verdes e suas principais características (conclusão)

Nº	Estrutura da fachada verde		Estrutura controle		Equipamentos
	Dimensões	Materiais	Dimensões	Materiais	
14	Sistema de cabos: não informa dimensões.	Cabos: aço.	Caixa teste: 0,6x0,6x0,7 m (LxPxA); Piso: 0,68x0,5x0,04 m (LxPxA).	Paredes: tijolo vermelho; Piso: concreto; Teto: concreto.	Especifica modelos; Especifica a posição; Especifica precisão.
15	Tela: não informa.	Tela: plástico.	Casa: 1,83x3,65x2,6 m (LxPxA); Fechamento externo: 15 mm; Fechamento interno: 4 mm; Teto: ≈ 13 cm; Janela: 3 mm.	Fechamento externo: metal; Fechamento interno: madeira; Teto: metal e madeira; Janela: madeira.	Especifica modelos; Especifica a posição.
18	Tela: não informa.	Tela: metálica.	Casas: 2,4x2,4x2,4 m (LxPxA); Base: 3x3 m; Teto: 35 cm.	Base: argamassa e pedra; Paredes: gesso, tijolo alveolar e reboco; Teto: plástico, vigas pré moldadas em concreto, revestimento cerâmico, poliuretano e cascalho.	Especifica modelos; Especifica a posição; Especifica precisão.
20	Fachada verde direta: 1x1,40 m (LxA).	Não possui estrutura.	Câmaras: 1,1x1,4x1,4 m (LxPxA); Paredes: 218 mm; Fechamento interno: 240 mm.	Câmaras: 1,1x1,4x1,4 m (LxPxA); Paredes: poliestireno e madeira; Fechamento interno: ISOBOOSTER.	Especifica modelos; Especifica a posição; Especifica precisão.
23	Tela: não informa.	Tela: metálica.	Paredes: 1,00x0,20x1,55 m (LxPxA). Fechamento externo: 0,03 m.	Paredes: alvenaria e gesso; Fechamento externo: poliestireno expandido.	Especifica modelos; Especifica a posição; Especifica precisão.

Fonte: Os autores.

A escolha correta das espécies influencia no desempenho térmico das fachadas verdes, uma vez que a consolidação da cobertura vegetal e espessura da folhagem alteram o grau de sombreamento (HUNTER et al., 2014; SAFIKHANI et al., 2014a; MONTANARI; LABAKI, 2017; BESIR; CUCE, 2018). Além disso, cada espécie interfere à sua maneira no desempenho térmico das fachadas verdes, de acordo com suas propriedades físicas (SAFIKHANI et al., 2014a). Para a fachada verde direta, apenas duas espécies foram utilizadas: *Hedera helix* e *Parthenocissus tricuspidata*, sendo a última a mais aplicada e presente em sete dos nove trabalhos, enquanto a *Hedera helix* foi utilizada em apenas um deles. Apenas Hoelscher et al. (2016) realizaram trabalho experimental com estas duas espécies em conjunto.

Dos 23 trabalhos avaliados, apenas Koyama et al. (2013), Hoelscher et al. (2016), Lee e Jim (2017) e Vox, Blanco e Schettini (2018) fazem estudo comparativo entre os resultados do desempenho térmico das fachadas em função da aplicação de diferentes espécies. Apesar de selecionarem cinco espécies para seu experimento, Perini et al. (2011) não especificam os resultados obtidos com cada uma. Destaca-se aqui o erro do estudo de Jaarfah et al. (2013) quanto à identificação da espécie, uma vez que os autores informam no texto uma variação de *thunbergia* arbustiva, quando a utilizada foi a *Thunbergia grandiflora*, espécie de trepadeira.

Quanto à justificativa da seleção das espécies, dez trabalhos deixam claro este importante aspecto: Ip, Lam e Miller (2010), Pérez et al. (2011), Sunakorn e Yimprayoon (2011), Koyama et al. (2013), Morelli e Labaki (2013), Susorova, Azimi e Stephens (2014), Koyama et al. (2015), Hoelscher et al. (2016), Matheus et al. (2016) e Pérez et al. (2017). Pérez et al. (2011) e Sunakorn e Yimprayoon (2011) realizaram um experimento prévio para a escolha das trepadeiras, comparando o crescimento, desenvolvimento e densidade de cobertura vegetal para diversas espécies. Koyama et al. (2015) determinaram a espécie para o experimento com base em trabalho anterior, de 2013, no qual foi avaliada a influência do desempenho térmico de cinco trepadeiras. As espécies utilizadas em cada estudo e a espessura da folhagem são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Espécies mais utilizadas nos trabalhos selecionados

Nº	Espécie	Espessura da folhagem
01	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	-
02	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	25 cm
03	<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	-
04	-	10 cm
05	<i>Wistéria sinesis</i>	-
06	<i>Hedera helix, Vitis, Clematis, Jasmine e Pyracantha</i>	20/10 cm
07	<i>Thunbergia grandiflora</i>	-
08	<i>Thunbergia grandiflora</i>	123 cm
09	<i>Momordica charantia, Ipomea tricolor, Canavalia gladiata, Pueraria lobata e Apios american medikus</i>	4/25 cm
10	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	-
11	<i>Thunbergia grandiflora</i>	20 cm
12	<i>Phaseolos vulgaria L</i>	-
13	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	20 cm
14	<i>Hedera helix</i>	6 cm
15	<i>Pueraria lobata</i>	-
16	<i>Parthenocissus tricuspidata, Hedera helix, Fallopia baldschuanica</i>	-
17	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	-
18	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	-
19	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	-
20	<i>Hedera helix</i>	-
21	<i>Lonicera japônica e Wisteria sinensis</i>	-
22	<i>Mucuna sempervirens</i>	20 cm
23	<i>Pandorea jasminoides variegated e Rhyncospermum jasminoides</i>	15/20 cm

Fonte: Os autores.

Discussão

O desempenho térmico das fachadas verdes

A análise do efeito do sombreamento no desempenho térmico das fachadas verdes é uma constante, com exceção dos trabalhos de Cameron, Taylor e Emmett (2015) e Koyama et al. (2015). Dentre todos os trabalhos, apenas Susorova, Azimi e Stephens (2014), Hoelscher et al. (2016), Pérez et al. (2017) e Vox, Blanco e Schettini (2018) avaliam o parâmetro LAI (Leaf Area Index), ou seja, o índice de área foliar. Este parâmetro consiste na relação entre a área da folhagem e a superfície e, por estar relacionado à densidade vegetal e à capacidade de sombreamento, influencia diretamente no desempenho térmico das fachadas verdes (MONTANARI; LABAKI, 2017; PÉREZ et al., 2017).

Com a finalidade de quantificar o desempenho de sombreamento de uma fachada verde, Ip, Lam e Miller (2010) desenvolveram o conceito de “coeficiente de bio

sombreamento”, que representa a proporção de radiação solar existente na cavidade de ar entre a fachada verde e a edificação e é calculado através da razão entre esta proporção e a registrada em frente à fachada verde.

Os trabalhos de Ip, Lam e Miller (2010) e Pérez et al. (2011) são os únicos que avaliam a transmitância solar antes e depois do crescimento da cobertura vegetal da fachada verde. Em trabalho desenvolvido no Reino Unido, Ip, Lam e Miller (2010) mediram esse parâmetro em função das cinco camadas de vegetação da fachada verde. Tais valores foram da ordem de 0,45, 0,31, 0,27, 0,22 e 0,12 para a primeira até a quinta e última camada, que representa a vegetação em sua cobertura vegetal máxima.

No trabalho de Perez et al. (2011), para o mês de abril, período em que a folhagem estava desenvolvida, esse fator variou entre 0,04 e 0,37, enquanto que no período sem folhagem variou entre 0,38 e 0,88. No período em que a folhagem não estava crescida, a iluminância diferencial entre área externa e a cavidade intermediária atrás do jardim era da ordem de 20.000 lux, em função do próprio efeito de sombreamento da estrutura. Após o crescimento da vegetação esse diferencial chegou a 80.000 lux. Em virtude do efeito de sombreamento, a fachada Sudoeste, no período do verão, foi a que apresentou maior diferencial de temperatura superficial externa, equivalente a 15,2 °C.

Em trabalho realizado no Japão, Koyama et al. (2013) concluem que o efeito de sombreamento está diretamente relacionado ao percentual de cobertura vegetal, responsável pela diminuição da temperatura superficial da superfície vegetada. Em fachadas verdes com orientação Sul e período de estudo no verão, a redução máxima de temperatura superficial externa, devido ao sombreamento, atingiu 7,9 °C.

Semelhante ao trabalho de Koyama et al. (2013), destaca-se o estudo realizado por Yin et al. (2017), que analisa a influência de características da vegetação como: porcentagem de cobertura verde, espessura foliar, densidade foliar e volume. Como resultado, os autores encontraram redução máxima de temperatura superficial externa para as áreas vegetadas de 4,67 °C.

Em experimento realizado na Espanha através da aplicação de fachada verde indireta, Pérez et al. (2011) obtiveram como resultado para a redução de temperatura superficial externa e na cavidade de ar valores de 15,18 °C e 3,8 °C, respectivamente. Além disso, confirmam o potencial das fachadas verdes no aumento da umidade relativa do ar na cavidade de ar em decorrência da evapotranspiração. Para o mês de julho, período de verão com altas temperaturas, tempo seco e que o jardim vertical apresentava folhas, a umidade relativa foi 7% maior neste espaço do que na parte externa.

Hoelscher et al. (2016) compararam a proporção da eficácia do sombreamento e da evapotranspiração no efeito de resfriamento gerado por fachadas verdes do tipo direta e indireta com diferentes espécies de trepadeiras em diversas condições de tempo. Os autores obtiveram como resultado o efeito de sombreamento e evapotranspiração como responsáveis por 79,4% e 21,6%, respectivamente, para esse fenômeno. Para um dia nublado, essa proporção se altera, sendo a evapotranspiração responsável por 73% do efeito de resfriamento gerado pelas fachadas verdes.

Com o objetivo de quantificar o efeito de resfriamento causado pela transpiração das folhas de trepadeiras da mesma espécie em uma fachada verde indireta intacta e outra que não respira devido ao corte de seus caules, Koyama et al. (2015) mediram a transpiração das folhas e suas temperaturas. A vegetação que teve seus caules cortados apresentou temperatura superficial da folhagem 5 °C mais alta do que aquela que permaneceu intacta, assim como menor taxa de transpiração. Os resultados demonstraram que o efeito da transpiração no resfriamento dos espaços é menos

significativo do que o sombreamento, uma vez que a média de temperatura superficial interna das paredes cuja vegetação foi podada apresentou aumento de 0,23 °C em relação à vegetação intacta, enquanto a média de diferencial de temperatura superficial entre a parede “nua” e a superfície coberta pela vegetação podada foi de 8,5 °C.

Segundo Sunakorn e Yimprayoon (2011), a ventilação natural melhora o desempenho térmico das fachadas verdes, uma vez que, quanto maior a velocidade do vento, maior é a redução do ganho de calor durante o dia e sua dissipação durante a noite. Esse mecanismo atua de maneira diferente conforme as características climáticas da localidade em que a fachada verde será instalada. Para locais de clima quente e úmido é importante a presença da ventilação e que a fachada verde atue como mecanismo de aumento da sua velocidade, promovendo a perda de calor convectivo. O trabalho de Sunakorn e Yimprayoon (2011) foi realizado na Tailândia e teve como objetivo estudar o desempenho térmico da “biofachada” para dois ambientes idênticos, onde apenas um deles estava sob efeito de ventilação natural. Segundo os autores, a fachada verde não bloqueia o vento quando sua velocidade é superior a 0,5 m/s. O maior diferencial de temperatura do ar externo e interno (9,93 °C) foi registrado para a situação em que a ventilação natural estava presente. Ressalta-se que este é o único trabalho que estuda, efetivamente, a ventilação, através da comparação entre dois ambientes idênticos.

O único trabalho sobre o desempenho térmico de fachadas verdes em espaços de transição foi realizado por Jaafar et al. (2013). Os autores demonstram o aumento da velocidade do vento em decorrência da instalação de fachadas verdes em um espaço de transição de um edifício vertical na Malásia. A estrutura escolhida foi a de cabos, que promove uma menor espessura da cobertura vegetal, permite maior fluxo de ar e diminui seu efeito de barreira. Em consequência, o fluxo de ventilação é maior, o que contribui para a redução da temperatura do ar no espaço de transição (cavidade de ar), que atingiu 12,98 °C.

Em locais de clima quente e seco é importante que a fachada verde atue como barreira ao vento. Em estudo realizado durante um ano na cidade de Lérida, Espanha, Pérez et al. (2011) demonstram este efeito e o da umidade no resfriamento da cavidade de ar, onde a temperatura do ar é ligeiramente mais baixa que a externa e, conseqüentemente, a umidade relativa mais alta. Para a fachada Sudoeste, durante o período de verão, o diferencial de temperatura do ar entre a área externa e a cavidade intermediária foi de 1,36 °C, enquanto no inverno a cavidade se encontrava 3,8 °C acima da temperatura registrada no espaço externo.

O trabalho de Perini et al. (2011) teve por objetivo analisar o efeito de fachadas verdes direta e indireta no fluxo de ar, nas temperaturas superficiais e na temperatura do ar. Este trabalho ressalta o potencial das fachadas verdes na diminuição da velocidade do vento próximo à cobertura vegetal. Essas variações ocorrem de acordo com a tipologia de fachada verde aplicada e suas características construtivas. Para as fachadas verdes diretas, a velocidade do ar tende a ser nula no interior de sua folhagem, enquanto para as fachadas verdes indiretas essa velocidade aumenta dentro da cavidade de ar formada entre o jardim e a edificação. Os autores concluem que a fachada verde direta é mais eficiente para a redução tanto da velocidade do ar quanto das temperaturas.

O trabalho de Cameron, Taylor e Emmett (2015) é o único realizado especificamente no período de inverno e trata do potencial das fachadas verdes como sistemas passivos de economia de energia em função de seu desempenho térmico. Demonstram como a vegetação atua como barreira ao vento e às intempéries, protegendo a edificação e a mantendo mais quente durante a noite. Nesse estudo, a metodologia se baseou na aplicação de fachadas verdes indiretas com *Hedera helix* em vinte cubos idênticos e os

comparando com outros não vegetados. Após a realização do experimento em dois invernos consecutivos, os resultados demonstraram que, em noites em que a temperatura externa se aproximava de zero, as superfícies vegetadas apresentavam-se em torno de 3 °C mais quentes em comparação com as superfícies “nuas”. Dos 23 trabalhos analisados este é o único em que o experimento ocorreu em períodos de neve e frio extremo.

Quanto ao isolamento térmico da edificação, apenas os trabalhos de Morelli e Labaki (2013), Cameron, Taylor e Emmett (2015) e Matheus et al. (2016) apresentaram resultados sobre este efeito através da fachada verde. No trabalho de Matheus et al. (2016), durante o período de verão de 2009, a temperatura do ar externo apresentava média de 36,8 °C. No interior da edificação, esses valores se apresentavam na ordem de 26,7 °C e 28 °C, com e sem a presença de fachada verdes, respectivamente. Mesmo no período mais quente do ano, o jardim vertical minimizou os ganhos de calor internos (MATHEUS et al, 2016).

Montanari e Labaki (2017) desenvolveram uma revisão sistemática sobre o comportamento térmico incluindo, entre outras envoltórias verdes, as fachadas verdes. Na revisão foram abordadas as questões de sombreamento, transpiração e isolamento, com o enfoque na identificação das variáveis climáticas envolvidas e não os mecanismos de ação referentes ao potencial amenizador térmico das fachadas verdes. Observa-se, entretanto, que outros aspectos importantes e definidores do comportamento térmico das fachadas verdes, como as estruturas, espécies e tipos de fachadas verdes utilizados nos experimentos não foram analisados. Dessa maneira, destaca-se o aprofundamento do potencial amenizador térmico de fachadas verdes alcançado neste artigo valendo-se como referência e balizador de tomada de decisão de novos projetos para fachadas verdes.

Síntese

Uma síntese dos principais resultados encontrados nos estudos selecionados sobre o desempenho térmico de fachadas verdes diretas e indiretas é apresentada nos Quadros 6 e 7.

Quadro 6 – Trabalhos sobre desempenho térmico de fachadas verdes diretas: principais resultados

(continua)

Nº	Principais resultados
01	Reduções máxima e mínima de 3 °C e 1 °C de Tse, respectivamente; Redução máxima de 1 °C para Tsi; Aumentos máximo e mínimo de 1,5 e 2 °C de Ti no período frio, respectivamente.
02	Redução média de 5,7 °C para Tse e 0,9 °C para Tsi; Redução média de 0,5 °C para Ti.
06	Nenhuma diferença de Te em frente a parede “controle” e a fachada verde; Redução de 1,2 °C para Tse da parede com fachada verde; Redução de 0,43 m/s de Var entre o meio da folhagem e a 10 cm da parede “controle”. Dentro da folhagem sempre tende a 0 m/s.
10	Estudo com 3 células teste nas cores vermelha, verde e azul; Reduções de 5,3 °C, 6,1 °C e 4,5 °C de Ti para as três cores, respectivamente; Aumento máximo de 2,5% da Ur para a célula de cor vermelha e diminuição de 3,4% para a cor azul; Reduções de 2,7 °C, 3,5°C e 2,2 °C de Tg para as três cores, respectivamente; A célula teste vermelha mostrou o melhor resultado de Tse e Tsi.
13	Redução máxima de até 12,6 °C de Tse para a fachada Leste e 11,1 °C para Oeste; Redução de 10% de transmissão de fluxo de calor para todas as orientações; Redução máxima de 14,1 °C e 16,6 °C de Te para as fachadas Leste e Oeste, respectivamente, e média de 1,9 °C e 2,1 °C; Aumento de até 4,4% na Ur próxima a folhagem; Reduções de 42 e 43% da Var para as fachadas Leste e Oeste, respectivamente.
16	Nenhuma diferença significativa de Te entre as fachadas vegetadas e nua; Redução média de 11°C e 12,3 °C de Tse para as fachadas com Parthenocissus tricuspidata e Hedera helix; Redução de 1,7 °C de Tsi.

Quadro 6 – Trabalhos sobre desempenho térmico de fachadas verdes diretas: principais resultados

(conclusão)

Nº	Principais resultados
17	Redução de 0,5 °C para Tsi e 1,1 °C para Tse; Redução de 1,3 °C para Ti.
19	Reduções máxima e mínima de Tse para as paredes vegetadas de 4,67 °C e 0,74 °C, respectivamente; Confirma a eficácia da fachada verde direta no resfriamento e economia passiva de energia.
20	Redução de 0,7 °C para Te e 3,4 °C próximo a folhagem. Ambas durante o verão; Redução de 1,7 °C de Tse e 0,4 °C para Tsi, ambas no verão; Aumento de 1,4 °C para Te, 2 °C para Ti e 1,2 °C próxima a folhagem. Ambas durante o inverno; Aumento de 1,6 °C para Tse e 3,5 °C para Tsi. Ambas durante o inverno; Redução de 2,17 e 3,24 m ² K/W de R para verão e inverno, respectivamente.

Legenda: R – resistência térmica; Tse – temperatura superficial externa; Tsi – temperatura superficial interna; Te – temperatura do ar externa; Ti – temperatura do ar interna; Tg – temperatura de globo; Ur – umidade relativa do ar; Var – velocidade do ar. Fonte: Os autores.

Quadro 7 – Trabalhos sobre desempenho térmico de fachadas verdes indiretas: principais resultados

(continua)

Nº	Principais resultados
03	A cobertura vegetal atinge seu máximo em 4 meses e apresenta 5 camadas de vegetação; Transmissão solar de 045, 0,31, 0,27, 0,22 e 0,12 para a primeira e quinta camadas, respectivamente; A mudança de cor das folhas influencia na absorção solar da fachada verde.
04	Redução máxima de 4,36 °C para Tse; Redução máxima de 7,32 °C para Tsf; A fachada verde apresentou pouca influência na variação de Te.
05	Diferencial de 20.000 lux entre a cavidade de ar e o ambiente externo no período sem folhas e de até 80.000 lux no período com folhas; Fator de transmissão solar de 0,04 – 0,37 na época da folhagem desenvolvida, e 0,38 – 0,88 no período sem folhas; Redução média de 5,55 °C de Tse e máxima de 15,2 °C para a fachada Sudoeste no mês de agosto; Redução de 1,36 °C de Tc durante o verão e aumento de 3,8 °C no inverno; Para o período com folhas a Ur da cavidade de ar foi sempre maior em relação ao ambiente externo, atingindo seu máximo de 7% de aumento para a fachada Sudoeste. Já para o período sem folhas ocorreu uma redução de 8% de Ur; Redução dos diferenciais de Var entre a cavidade de ar e o ambiente externo.
06	Comparação com superfície “controle”; Nenhuma diferença de Te em frente a parede “controle” e a fachada verde; Redução de 2,7 °C para Tse da parede com fachada verde; Redução de 1,2 °C para a Temperatura Superficial em meio a folhagem; Redução de 1,25 °C de entre Tc e distância de 1m da parede “controle”; Redução de 0,55 m/s de Var entre a folhagem e a 10 cm da parede “controle”; Dentro da folhagem a Var aumenta 0,29 m/s.
07	Redução irrisória de Te para ambos os casos; Maior Var para caso em que havia ventilação natural; Redução máxima de 9,93 °C entre Ti e Te de ambiente com ventilação natural, e média de 3,63 °C; Redução máxima de 6,32 °C entre Ti e Te de ambiente sem ventilação, e média de 1,65 °C; Redução máxima de Ti entre sala com fachada verde sem ventilação natural e sala comum de 4,71 °C e média de 0,89 °C; Redução máxima de Ti entre sala com fachada verde e ventilação natural e sala comum de 4,31 °C e média 0,33 °C; Aumento irrisório de 6,8% para Ur durante o dia.
08	Redução de 12,9 °C de Tar máxima entre os pavimentos controle e aquele com mais unidades de fachada verde; Redução de 7,4% da Ur no pavimento com mais unidades de fachada verde devido ao local com pouca circulação de vento; Reduções da Var de 1,8 m/s, aproximadamente.
09	Redução máxima de 7,9 °C para Tse entre fachada verde com a espécie <i>Canavalia gladiata</i> e superfície “controle”.
10	Estudo com 3 células teste nas cores vermelha, verde e azul; Reduções de 4,4 °C, 6,1 °C e 3,6 °C de Ti para as três cores, respectivamente; Aumento irrisório da UR para a célula de cor vermelha e diminuição de 4% para a cor azul; Reduções de 1 °C, 1,9 °C e 0,5 °C de TG para as três cores, respectivamente; A célula teste azul apresentou os maiores valores para Tse e Tsi.
11	Redução de 6,5 °C e 3 °C para Tc e Ti, respectivamente; Redução de Tse e Tsi de 5,5 e 3,5 °C respectivamente; Aumento de 16 e 12%, respectivamente, para Ur na cavidade de ar e no interior do ambiente.
12	Redução de 5 °C para Tar da fachada verde em comparação à superfície “controle”.
14	Em situação de neve, as caixas-teste sem vegetação consumiram maior quantidade de energia de todo o trabalho; Caixas teste com vegetação foram de 42 e 50% mais eficientes em condições de temperaturas congelantes com vento e chuva e situações de frio, vento e sol; As caixas vegetadas encontravam-se secas em suas fachadas durante as chuvas; Em condições de tempo frio e com a presença de vento, as caixas vegetadas apresentaram Tse 2,1 °C mais quentes e, quando a temperatura externa era quase zero, tal diferencial subia para 3 °C; A vegetação promoveu o isolamento térmico da edificação, impedindo a infiltração do vento e a dispersão de seu calor interno e apresentou desvantagem relacionada ao sombreamento das caixas em tempo frio.

Quadro 7 – Trabalhos sobre desempenho térmico de fachadas verdes indiretas: principais resultados (conclusão)

Nº	Principais resultados
15	Após o corte dos caules o percentual de cobertura verde diminuiu significativamente; Aumento de 5 °C de Tsf, após 3 horas, dos indivíduos que tiveram seus caules cortados; A evapotranspiração contribui menos do que o sombreamento e foi responsável por 9,7 e 3,6% no resfriamento de Tsi e Ti.
16	Nenhuma diferença significativa de Te entre as fachadas vegetadas e nua; Redução média de até 6,6 °C de Tse para a espécie Fallopia baldschuanica.
18	Para a fachada Sul, com a vegetação parcialmente desenvolvida, registrou reduções de Tse e Tsi de 10,1 °C e 2,5 °C; Com a vegetação completamente desenvolvida atingiu-se um LAI de 4 e 34% de economia de energia; Para a fachada Oeste atingiu-se o máximo de 15 °C de redução para Tse.
21	Reduções mínimas e máximas de Tse durante dias ensolarados de 0,52 °C e 3,49 °C e 0,55 °C e 2,73 °C para o “bloco alto” e “bloco baixo”, respectivamente; Reduções mínimas e máximas de Tse durante as noites de dias ensolarados de 0,03 °C e 0,78 °C e -0,11 °C e 1,25 °C para o “bloco alto” e “bloco baixo”, respectivamente;
22	Redução máxima de 5,5 °C e 2,5 °C para Tc e Ti da fachada Sul e 3,3 °C e 1,5 °C para Norte; Aumento máximo de 22,3% para Ur na fachada Sul com fachada verde e redução de 9,2% para fachada Norte vegetada; Tsf 9,2 °C mais quente que a Tse da edificação durante o dia para fachada Sul; Reduções máximas de 8,7 °C e 2 °C para Tse e Tsi entre fachada controle e fachada Sul vegetada e 4,2 °C e 1,3 °C para Norte.
23	Redução média de 7 °C para Tse das superfícies vegetadas durante o verão e máxima de 9 °C para a fachada com Pandorea jasminoide; Aumento máximo de 3,5 °C durante o inverno para a Pandorea jasminoide Redução máxima de 6 °C para Te das superfícies vegetadas durante o verão; Ambas as espécies são ideais para o efeito de resfriamento no local estudado; O efeito de resfriamento mais efetivo ocorreu quando a Var era de 3 a 4 m/s, Ur de 30 a 60% e radiação solar acima de 800 W/m².

Legenda: Tse – temperatura superficial externa; Tsi – temperatura superficial interna; Tsf – temperatura superficial da folhagem; Tar – temperatura do ar; Te – temperatura do ar externa; Ti – temperatura do ar interna; Tc – temperatura do ar na cavidade; Tg – temperatura de globo; Ur – Umidade relativa do ar; Var – velocidade de ar. Fonte: Os autores.

O Quadro 8 apresenta as principais lacunas encontradas nos trabalhos em relação à padronização, metodologia, espécies utilizadas, equipamentos, orientação da fachada, localidade dos estudos, clima e detalhes da estrutura de suporte e modelos. Essas lacunas podem direcionar trabalhos similares, não só em relação ao tema, mas também no sentido de considerar informações necessárias para o entendimento da pesquisa, apontar necessidades de estudo para os próximos trabalhos e erros comuns que não devem ser repetidos.

Quadro 8 – Principais lacunas de pesquisa

Tipo	Categoria	Detalhamento
De pesquisa	Comparativo entre espécies	Faltam trabalhos que comparem o desempenho térmico de fachadas verdes com diferentes espécies;
	Localidade	É importante a realização de estudos em localidades diferenciadas, uma vez que 80% dos trabalhos se localizam na Europa e Ásia;
	Ambientes avaliados	Pouca variedade em relação aos ambientes da edificação estudados. Dentre todos os trabalhos selecionados, apenas um trata de espaços de transição;
	Modelos	Poucos estudos fazem a comparação do desempenho térmico entre modelos de fachada verde direta e indireta;
Falta de informações dos trabalhos analisados	Informação sobre as espécies	Os estudos fornecem poucos detalhes sobre as espécies vegetais, apresentam nomes populares e classificação taxonômica até o nível de gênero. Wong et al. (2010) não informam a espécie utilizada;
	Equipamentos	Falta de especificação completa dos equipamentos, seu posicionamento e suas características técnicas;
	Orientação da fachada	Alguns autores não informam a orientação solar da fachada verde estudada;
	Clima	Apenas um trabalho traz a classificação climática do local de estudo segundo Köppen-Geiger;
	Estrutura e dimensões	É necessária uma maior riqueza de detalhes no que diz respeito à estrutura das fachadas verdes e suas superfícies controle. Dimensões e materiais utilizados são essenciais.

Fonte: Os autores.

Conclusão

Os estudos sobre desempenho térmico de fachadas verdes são recentes em todo o mundo e, mesmo com tendência de crescimento, ainda são escassos e concentrados em poucos países, com baixa variabilidade de climas e com estratégias metodológicas variadas. Isto dificulta a comparação entre os estudos e sua reprodutibilidade. Porém, ainda que tais questões possam ser levantadas, fica claro em todos os trabalhos avaliados o potencial amenizador térmico das fachadas verdes.

Foram encontrados resultados de até 16,6 °C na diferença de temperatura superficial em relação à superfície controle, o que evidencia e confirma o potencial amenizador térmico desse tipo de jardim vertical. Além da amenização gerada pelo sombreamento, o aumento da umidade relativa do ar também pode contribuir na melhoria do desempenho térmico da edificação através do resfriamento evaporativo, que reduz a temperatura do ar e contribui para o conforto térmico em locais com clima seco. O resfriamento promovido pelo efeito de barreira do vento, quando a temperatura do ar é maior do que a da faixa de conforto térmico, e o isolamento térmico promovido pelas infraestruturas verdes também são importantes para o seu efeito de amenização térmica.

Recomenda-se a avaliação comparativa entre diferentes espécies e os seus respectivos impactos no desempenho térmico das fachadas verdes, sejam esses no ambiente interno ou externo. Soma-se a isso a necessidade de uma maior diversidade de ambientes das edificações a serem analisados, como o espaço de transição que é avaliado apenas pelo trabalho de Jaafar et al. (2013) entre os 23 selecionados.

Estes resultados mostram o potencial da fachada verde como instrumento de amenização térmica do ambiente construído. Dessa maneira, recomenda-se, após esta revisão, que os futuros estudos considerem métodos mais padronizados e que levem em consideração uma maior quantidade de variáveis, como a utilização de espécies diferentes e comparação do desempenho térmico das mesmas. Soma-se a isso a necessidade de estudos que comparem, também, o desempenho térmico de fachadas verdes diretas e indiretas. Cada uma destas variáveis tem influência no desempenho térmico das fachadas verdes, e deve ser considerada na avaliação completa.

Referências

BESIR, A. B.; CUCE, E. Green roofs and green facades: a comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 915-939, 2018. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>.

CAMERON, R. W. F.; TAYLOR, J.; EMMETT, M. A Hedera green façade - energy performance and saving under different maritime-temperate, winter weather conditions. **Building and Environment**, v.92, p. 111-121, 2015. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.011>.

CRUCIOL BARBOSA, M.; FONTES, M. S. G. de C. Jardins verticais: modelos e técnicas. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 7, n. 2, p. 114-124, jun. 2016. ISSN 1980-6809. DOI:<https://doi.org/10.20396/parc.v7i2.8646304>.

EUMORFOPOULOU, E. A.; KONTOLEON, K. J. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. **Building and Environment**, v. 44, n. 5, p. 1024-1038, 2009. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.004>.

HOELSCHER, M.; NEHLS, T.; JANICK, B.; WESSOLEK, G. Quantifying cooling effects of facade greening: shading, transpiration and insulation. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 283-290, 2016. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>.

HUNTER, A. M.; WILLIAMS, S. G. N.; RAYNER, J. P.; AYE, L.; HES, D.; LIVESLEY, S. J. Quantifying the thermal performance of green façades: a critical review. **Ecological Engineering**, v. 63, p. 102-113, 2014. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.021>.

IP, K.; LAM, M.; MILLER, A. Shading performance of a vertical deciduous plant canopy. **Building and Environment**, v. 45, p. 81-88, 2010. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.003>.

JAAFAR, B., SAID IS., REBA M. N., RASIDI M. H. Impact of vertical greenery system on internal building corridors in the tropic. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, v. 105, p. 558-568, 2013. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.059>.

KOYAMA, T.; YOSHINAGA, M.; HAYASHI, H.; MAEDA, K.; YAMAUCHI, A. Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. **Building and Environment**, v. 66, p. 96-103, 2013. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.020>.

KOYAMA, T.; YOSHINAGA, M.; MAEDA, K.; YAMAUCHI, A. Transpiration cooling effect of climber greenwall with an air gap on indoor thermal environment. **Ecological Engineering**, v. 83, p. 343-353, 2015. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.015>.

LEE, L., S., H.; JIM, C., Y. Subtropical summer thermal effects of wirerope climber green walls with different air-gap depths. **Building and Environment**, v. 126, p. 1-12, 2017. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.021>.

MANSO, M.; CASTRO-GOMES, J. Green wall systems: A review of their characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 863-871, 2015. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>.

MATHEUS, C.; CAETANO, F. D. N.; MORELLI, D. D. de O.; LABAKI, L. C. Desempenho térmico de envoltórias vegetada sem edificações no sudeste brasileiro. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 71-81, 2016. DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000100061>.

MONTANARI, K. B.; LABAKI, L. C. Comportamento térmico de ambientes internos sob a influência de envoltórias verdes. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 8, n. 3, p. 181-193, set. 2017. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650241/17579>>. Acesso em: 26 mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v8i3.8650241>.

MORELLI, D. D. O.; LABAKI, L. C. . Paredes verdes: estudo experimental sobre seus efeitos no espaço construído. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12, 8, 2013, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: ENCAC/ELACAC, 2013. p. 1098-1107.

OTELLÉ, M; PERINI, K. Comparative experimental approach to investigate the thermal behavior of vertical greened façades of buildings. **Ecological Engineering**, v. 108, p. 152-161, 2017. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.016>.

PÉREZ, G.; COMA, J.; MARTORELL, I.; CABEZA, L.F., Vertical greenery systems (VGS) for energy saving in buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 139-165, 2014. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>.

PÉREZ, G.; COMA, J.; SOL, S.; CABEZA, L. F. Green facade for energy savings in buildings: the influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. **Applied Energy**, v. 187, p. 424-437, 2017. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.055>.

PÉREZ, G.; RINCÓN, L.; VILA, A.; GONZÁLEZ, J. M.; CABEZA, L. F. Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate. **Energy Conservation and Management**, v. 52, n. 4, p. 1861-1867, 2011. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.008>.

PERINI, K., OTTELÉ, M., FRAAIJ, A.L.A., HAAS, E.M., RAITERI, R. Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. **Building and Environment**, v. 46, p. 2287-2294, 2011. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>.

PERINI, K.; OTTELÉ, M.; HAAS, E.M.; RAITERI, R. Vertical greening systems, a process tree for green façades and living walls. **Urban Ecosystems**, v. 16, n. 2, p. 265-277, 2013. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11252-012-0262-3>.

RAZZAGHMANESH, M., RAZZAGHMANESH, M. Thermal performance investigation of a living wall in a dry climate of Australia. **Building and Environment**, v.112, p. 45-62, 2017. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.023>.

SAFIKHANI, T., ABDULLAH, A.M., OSSEN, D.R., BAHARVAND, M. Thermal impacts of vertical greenery systems. **Environmental and Climate Technologies**, v. 14, p. 05-11, 2014a. DOI:<https://doi.org/10.1515/rtuect-2014-0007>.

SAFIKHANI, T.; ABDULLAH, A.M.; OSSEN, D.R.; BAHARVAND, M. A review of energy characteristic of vertical greenery systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.40, p. 450-462, 2014b. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.166>.

SCHERER, M. J.. **Cortinas verdes na arquitetura: desempenho no controle solar e na eficiência energética de edificações**. 2014. Dissertação (doutorado). Programa de Pesquisa e Pós Graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SUKLJE, C. T.; ARKAR, C.; MEDVED, S. The local ventilation system coupled with the Indirect green façade: a preliminary study. **International Journal of Design & Nature and Ecodynamics**, v. 9, n. 4, p. 314-320, 2014. DOI:<https://doi.org/10.2495/dne-v9-n4-314-320>.

SUNAKORN, P.; YIMPRAYOON, C. Thermal performance of biofacade with natural ventilation in the tropical climate. **Procedia Engineering**, v. 21, p. 34-41, 2011. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.1984>.

SUSOROVA, I. Green facades and living walls: vertical vegetation as a construction material to reduce building cooling loads. In: PACHECO-TORGAL, F; LABRINHA, J. A.; CABEZA, L. F.; GRANQVIST, C.-G. (Org.). **Eco-efficient materials for mitigating building cooling needs**. Chicago: Elsevier, 2015. p. 127-153. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-380-5.00005-4>.

SUSOROVA, I.; AZIMI, P.; STEPHENS, B. The effects of climbing vegetation on the local microclimate, thermal performance, and air infiltration of four building facade orientations. **Building and Environment**, v. 76, p. 113-124, 2014. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.011>.

TSOURAMAKIS, C.; ASSIMAKOPOULOS, V. D.; TSIROS, I.; CHRONOPOULOU, A. Thermal performance of a vegetated wall during hot and cold weather conditions. In: CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 25, 2008, Dublin. **Proceedings [...]**. Dublin: PLEA, 2008. p. 635-639.

VOX, G.; BLANCO, I.; SCHETTINI, E. Green façades to control wall surface temperature in buildings. **Building and Environment**, v. 129, p. 154-166, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>.

WONG, N.H.; TAN, A.Y.K.; CHEN, Y.; SEKAR, K.; TAN, P.Y.; CHAN, D.; CHIANG, K.; WONG, N.C. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. **Building and Environment**, v. 45, n. 3, p. 663-672, 2010. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005>.

WONG, I.; BALDWIN, A. N. Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise residential buildings for energy-saving in sub-tropical region. **Building and Environment**, v. 97, p. 34-39, 2016. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.028>.

YANG, F.; YUAN, F.; QIAN, F.; ZHUANG, Z.; YAO, J. Summertime thermal and energy performance of a double-skin green façade: a case study in Shanghai. **Sustainable Cities and Society**, v. 39, p. 43-51, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.049>.

YIN, H.; KONG, F.; MIDDEL, A.; DRONOVA, I.; XU, H.; JAMES, P. 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. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.020>.

¹ Luiza Sobhie Muñoz

Arquiteta e Urbanista. Bacharel. Endereço postal: Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, nº 14-01, Vargem Limpa, Bauru, SP, Brasil, CEP 17033-360.

² Murilo Cruciol Barbosa

Biólogo. Licenciado. Endereço postal: Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, nº 14-01, Vargem Limpa, Bauru, SP, Brasil, CEP 17033-360.

³ Maria Solange Gurgel de Castro Fontes

Arquiteta e Urbanista. Doutora em Ciências da Engenharia Ambiental. Profa. Dra. da Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação. Endereço postal: Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, nº 14-01, Vargem Limpa, Bauru, SP, Brasil, CEP 17033-360.

⁴ João Roberto Gomes de Faria

Engenheiro de Produção. Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental. Prof. Dr. da Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação. Endereço postal: Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, nº 14-01, Vargem Limpa, Bauru, SP, Brasil, CEP 17033-360.