



XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE COBERTURA VEGETADA PARA CONDIÇÕES SUBTROPICAIS

**Clarisse S. A. Di Núbila (1); Eduardo L. Krüger (2); Marlos Hardt (3); Janine N. Corrêa (4),
Juliana L. Rose (5), Endrio L. de F. Nascimento (6), Cintia A. Tamura (7)**

(1) Engenheira Civil, Especialista, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, clarissedinubila@yahoo.com.br, UTFPR

(2) Engenheiro Civil, Doutor, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, ekruger@utfpr.edu.br, UTFPR

(3) Arquiteto e Urbanista, Doutor, Professor da Escola de Arquitetura e Design, marlos@arquitetoeurbanista.com.br, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rua Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, Curitiba-PR, CEP 80215-901, Tel.: 3271-1555

(4) Engenheira Civil, Doutora, Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, janine@utfpr.edu.br, UTFPR

(5) Engenheira Ambiental e Sanitária, Doutora, Pesquisadora de Pós Doutorado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, julrose@gmail.com, UTFPR

(6) Graduando em Engenharia da Computação, endrio@msn.com, UTFPR

(7) Arquiteta, Doutora, Pesquisadora Credenciada do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, cintiatamura@gmail.com, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000, Ecoville, Curitiba-PR, CEP 81280-340, Tel.: (41) 3279-6800

RESUMO

Dentre as estratégias que contribuem para o conforto térmico e redução do consumo de energia pelas edificações está o emprego de técnicas de climatização passiva, como sistemas de coberturas vegetadas. Neste sentido, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho térmico de um sistema de cobertura vegetada extensiva, por meio de testes realizados com módulos experimentais, durante o verão, na cidade de Curitiba (Paraná). Para essa avaliação, foram empregados dois módulos experimentais: um módulo de cobertura vegetada, e outro de cobertura com camada de ar não ventilada, o qual correspondeu ao controle. Os parâmetros medidos corresponderam à temperatura externa e interna aos módulos, bem como umidade do substrato da cobertura vegetada. Com os resultados da pesquisa realizada, verificou-se um desempenho térmico superior do módulo de cobertura vegetada, em relação ao módulo controle, demonstrando efeito de estabilização térmica, atraso térmico, e amortecimento térmico.

Palavras-chave: cobertura vegetada, desempenho térmico, arquitetura bioclimática, módulos experimentais.

ABSTRACT

Among the strategies that contribute to the thermal comfort and reduction of energy consumption of buildings is the use of passive acclimatization techniques, such as vegetated roof systems. In this sense, this study aimed to assess the thermal performance of an extensive vegetated roof system, by means of tests carried with experimental modules, during the summer, in the city of Curitiba (Parana). For the evaluation, two experimental modules were applied: a vegetated roof module, and a roof with a non-ventilated air-layer module, which corresponded to the control module. The measured parameters are the external and internal temperature of the modules, as well as the substrate moisture of the vegetated layer. Based on the results of this research, it was verified a superior performance of the vegetated roof module, compared to the control module, demonstrating effects of thermal stability, thermal delay and thermal damping.

Keywords: green roof, thermal performance, bioclimatic architecture, experimental modules.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Balanço Energético Nacional da EPE (2018a), as residências foram responsáveis por cerca de 25% do consumo de energia elétrica no Brasil em 2017, ficando atrás somente do setor industrial. Os setores comercial e público consumiram cerca de 17% e 8% (EPE, 2018a), respectivamente, porém dentro desta estatística estão sendo consideradas outras categorias de uso, e não somente edificações. Somados, os setores residencial, comercial e público são responsáveis por metade do consumo de eletricidade no país.

Considerando apenas o setor residencial, dados de 2018 apontam que o consumo de energia elétrica por equipamentos de ar condicionado aumentou em cerca de 237%, considerando os 12 anos anteriores (EPE, 2018b). O Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 projeta que condicionadores de ar serão os principais responsáveis pelo consumo de energia elétrica nos domicílios (EPE, 2017).

Dada a relevância do consumo energético para satisfazer as necessidades de conforto, existe uma preocupação em buscar estratégias que contribuam para maximizar o desempenho ambiental das edificações urbanas. De acordo com Keller e Burke (2009), estratégias de projeto responsivas ao clima que incorporem técnicas passivas reduzem a necessidade da energia utilizada para o conforto condicionado em edificações residenciais.

Os telhados verdes podem ser utilizados como uma técnica de design passivo nas construções, trazendo inúmeras vantagens, como: isolamento térmico e acústico, redução das variações de temperatura no interior da edificação, produção de O₂ e absorção de CO₂ (MINKE, 2005), absorção de água e redução do escoamento superficial das chuvas, filtragem de contaminantes (água e ar), servir como habitat para a fauna local (KELLER e BURKE, 2009), entre outras.

De acordo com Rosenzweig et al. (2006), telhados verdes consistem em um conjunto formado por uma camada impermeável e camadas de substrato, drenagem, e proteção anti-raízes, que permitem a propagação da vegetação na superfície da cobertura. Existem várias denominações para esse sistema, tais como telhados verdes, lajes jardins e coberturas verdes ou naturadas, superfícies horizontais vegetadas, coberturas vegetadas, dentre outras (HARDT, 2013).

Estudos vêm sendo realizados para avaliar o desempenho térmico de coberturas vegetadas, tanto por meio de medições em coberturas em escala real (PARIZOTTO e LAMBERTS, 2011; JIM e PENG, 2012; BUCKLAND-NICKS et al., 2016), como por meio de protótipos (ABREU et al., 2015; LIZ et al. 2016; SAVI, 2015; FEITOSA e WILKINSON, 2018; KAVISKI, 2018), de modo a comparar com outros sistemas de cobertura, e também estudar a influência da variação de determinados parâmetros.

De acordo com Parizotto e Lamberts (2011), a massa térmica parece ser a propriedade mais importante dos telhados verdes, contribuindo para a absorção de grandes quantidades de calor, além de retardar a transferência de calor do exterior para o interior (principalmente quando úmido), diminuindo a flutuação diária da temperatura. Ressalta-se que a umidade do substrato influencia o comportamento térmico do telhado verde. Em seu estudo, Jim e Peng (2012) verificaram que a umidade agiu esfriando as camadas do telhado e a superfície da telha de concreto (sobre a qual o sistema estava instalado) em dias ensolarados, e esquentando em dias nublados ou chuvosos.

Nesse contexto, o presente estudo foca na utilização de módulos experimentais para avaliar o desempenho térmico de um sistema de cobertura vegetada, cujas configurações permitem que ambos estejam sujeitos às mesmas condições ambientais, além de eliminar a interferência das condições climáticas externas que poderiam influenciar de maneira imediata na variação da temperatura da superfície inferior da cobertura (as demais faces do protótipo são isoladas termicamente). A umidade do substrato também foi monitorada ao longo do experimento.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar o desempenho térmico de um sistema de cobertura vegetada em situação de calor em Curitiba, por meio de medições realizadas em módulos experimentais.

3. MÉTODO

Os experimentos foram realizados baseando-se em estudos no campo de climatização passiva, especificamente sobre os sistemas de resfriamento evaporativo indireto (GONZÁLEZ-CRUZ e GONZÁLEZ-GARCIA, 2013; GONZÁLEZ-CRUZ et al., 2014; KRÜGER et al., 2016a e 2016b) e de telhados verdes (DI NÚBILA et al., 2018), que foram avaliados a partir de experimentos com emprego de módulos experimentais.

3.1 Módulos experimentais

Foram utilizados dois módulos para o experimento: cobertura verde (MV) e controle (MC), o qual simula uma condição de cobertura com ático sem ventilação. Na presente pesquisa, para o MV foi aproveitada a estrutura de um dos módulos utilizados no estudo realizado por Di Núbila et al. (2018). O MC, por sua vez, possui somente a tampa e a bacia metálica (reservatório) utilizadas no estudo de Di Núbila et al. (2018), o restante do módulo foi construído com as mesmas dimensões e materiais que o MV (exceto a camada de cobertura verde).

A Figura 1 apresenta um corte esquemático dos módulos MC e MV.

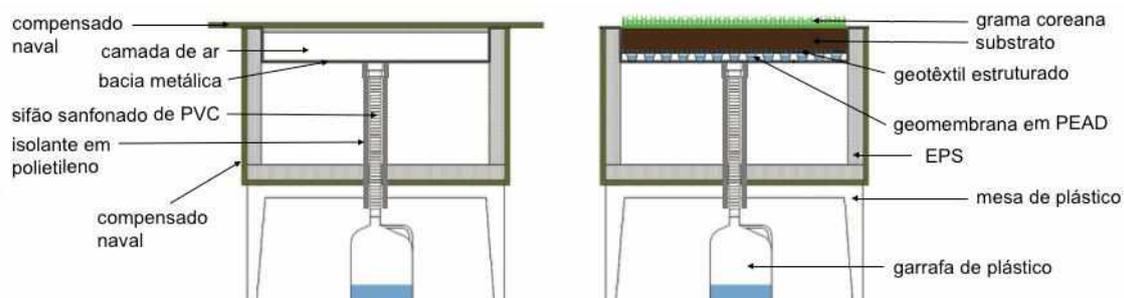


Figura 1 – Corte esquemático dos módulos MV e MC.

Os módulos foram feitos de compensado naval com 15 mm de espessura, revestidos externamente com tinta esmalte branca (o MV foi repintado, inclusive a tampa). Por dentro, as laterais e o fundo foram revestidos com poliestireno expandido (EPS) de 4,5 cm de espessura. Os reservatórios metálicos, confeccionados com chapas de aço galvanizado de 1,2 mm, originalmente revestidos por uma camada de tinta epóxi e pintura com tinta acrílica preta, receberam uma pintura em tinta spray branca (multiuso brilhante), a fim de proteger as bacias e cobrir alguns pontos de ferrugem.

Foi realizado um ensaio para garantir que as condições térmicas no interior de ambas as caixas de compensado revestidas por EPS fossem equivalentes, uma vez que as caixas foram construídas em momentos diferentes (a que compõe o MV era existente, e a que compõe o MC foi construída para o presente estudo). Ambas as caixas foram testadas sem a bacia metálica e tampadas (compensado naval de 10 mm e camada de EPS de 10 mm, já existentes), entre os dias 26 a 31/10/2017. Para garantir estanqueidade, foi aplicada uma espuma expansiva de poliuretano para vedar as frestas entre a tampa e a caixa de compensado.

O processo de confecção da cobertura verde no interior da bacia metálica do módulo MV é apresentado na Figura 2.

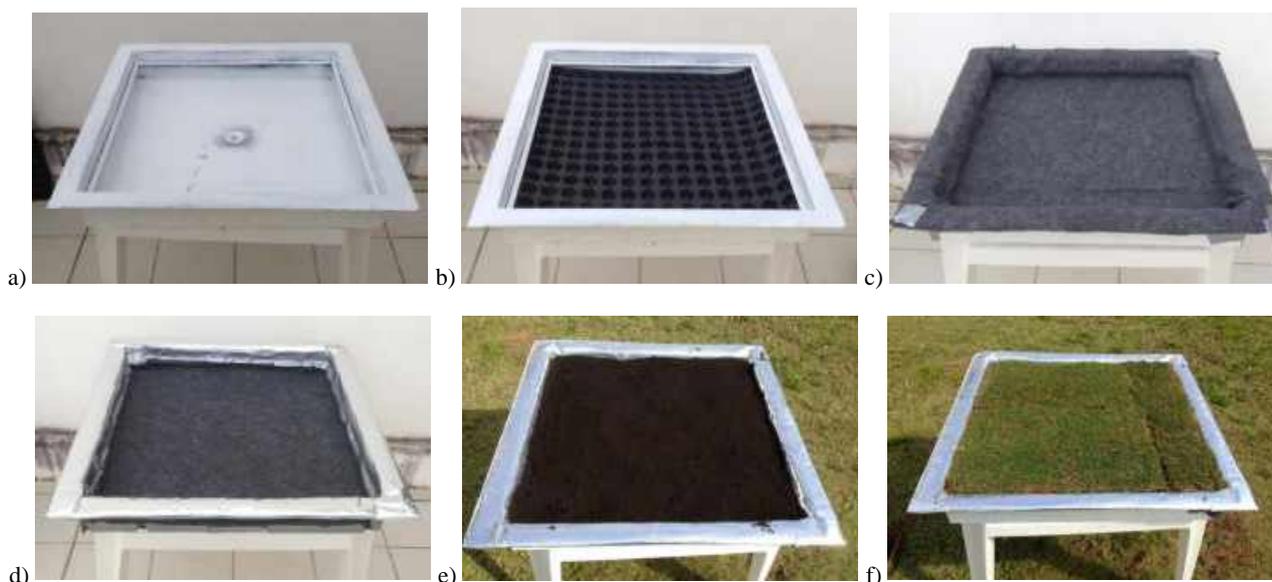


Figura 2 – Processo de construção da cobertura verde do módulo MV.

a) Ralo instalado no centro da bacia; b) Camada drenante e armazenadora de água; c) Manta drenante; d) Manta refletiva; e) Camada de substrato; f) Plantio da leiva de grama.

Ressalta-se que, para este estudo, a bacia que compõe o MV já possuía ralo instalado no centro (Figura 2a), procedimento que foi realizado no estudo de Di Núbila et al. (2018), e que permite a drenagem do excesso de água da cobertura verde. Sobre a bacia, foi posicionada uma camada drenante e armazenadora de

água, uma geomembrana extrudada em PEAD (polietileno de alta densidade), com 20 mm de espessura (Figura 2b). Sobre essa camada foi colocada uma manta drenante estruturada, formada por uma malha de polietileno de alta densidade unida em ambas as faces a um geotêxtil não tecido (Figura 2c). Em seguida foi realizada a proteção das bordas da bacia metálica com uma manta térmica refletiva (*foil simples*) (Figura 2d), de modo a bloquear a incidência de raios solares e minimizar o ganho de calor pelas bordas da bacia. Posteriormente foi espalhada uma camada de 3,5 cm de terra preta (enriquecida com calcário, adubo NPK 4-14-18, e esterco de aves), e por cima uma camada de 3 cm de substrato para plantas (composto por turfa e calcário, aditivado com 0,02% de N, 0,08% de P2O5, e 0,04% de K2O) (Figura 2e). Sobre a camada de substrato para plantas, foi realizado o plantio de leiva de grama coreana (*Zoysia tenuifolia*) (2 cm, descontando a altura da vegetação), no dia 20/04/2017 (Figura 2f).

No caso da bacia do MC, foi realizada a furação no centro e instalado um ralo de PVC de 1", com aplicação de silicone para auxiliar a vedação (como na Figura 2a), porém o ralo permaneceu tampado com uma peça de plástico.

Em ambas as bacias metálicas (MC e MV), foi instalado um sifão sanfonado de PVC no prolongamento rosqueado do ralo, com fita veda rosca, sendo o sifão envolvido por 2 camadas de isolante térmico em polietileno, de 5 mm cada (totalizando 10 mm), de modo a evitar trocas de calor pela sua superfície. A Figura 3 apresenta o processo de envolvimento do sifão, e de sua ligação no ralo, com material isolante. Embora não houvesse a necessidade de drenagem de água da bacia do MC, o sifão foi instalado para garantir que o volume interno dos módulos fosse o mesmo.

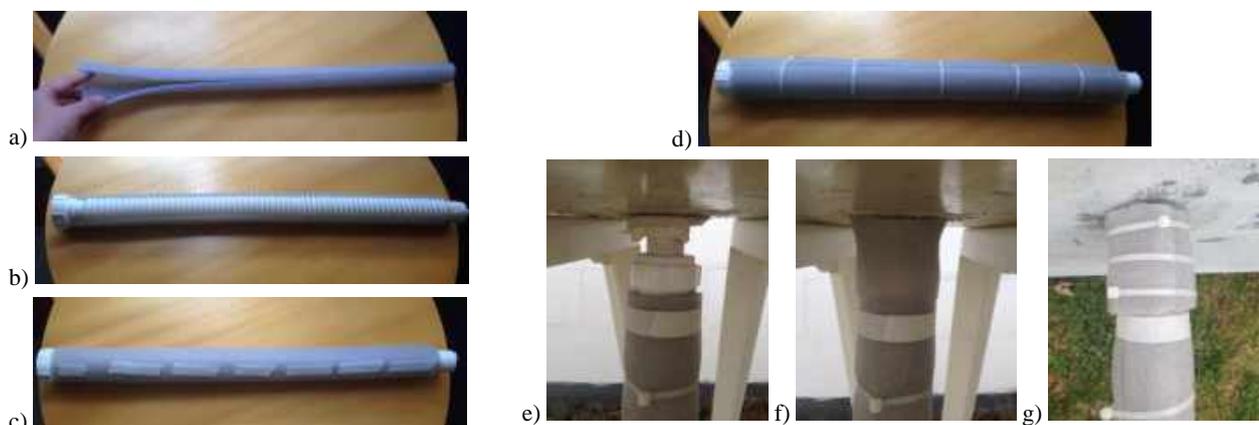


Figura 3 – Processo de isolamento térmico do sifão e ligação sifão-ralo.

a) Corte longitudinal no isolante térmico de 28mm de diâmetro; b) Envolvimento do sifão com a primeira camada de isolante; c) Sifão revestido com a primeira camada de isolante; d) Sifão revestido com a segunda camada de isolante e acabamento com abraçadeiras; e) Ligação do sifão no prolongamento rosqueado do ralo; f) Ligação sifão-ralo revestida com primeira camada de isolante; g) Ligação sifão-ralo revestida com segunda camada de isolante e acabamento com abraçadeiras.

Foi feito um furo no centro do fundo das caixas de compensado de ambos os módulos, de modo a permitir a passagem do sifão sanfonado (Figura 4). O sifão foi conectado a um galão de 5 L, que serviu para armazenar a água que poderia eventualmente escoar pelo ralo da bacia do MV. No caso do MC, o sifão também foi conectado a um galão, mas somente com o objetivo de garantir uma padronização com relação ao MV.

A cobertura verde foi mantida apoiada sobre 2 mesas de plástico, desde o plantio até seu encaixe na base do módulo MV, por pouco mais de 6 meses (20/04 até 12/12). Durante esse período houve o desenvolvimento da vegetação, e o devido enraizamento.

Durante o desenvolvimento da cobertura verde, foi realizada rega manual pelo menos uma vez por semana, nas semanas em que não houve precipitação. Porém, durante o período de medições, a rega manual foi suspensa.

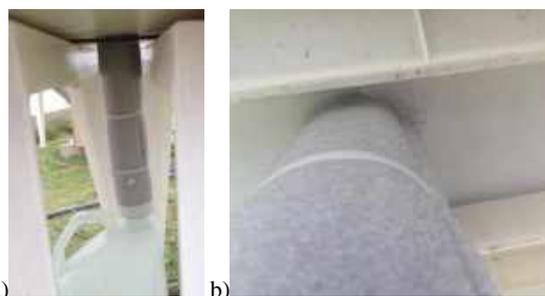


Figura 4 – Processo de passagem do sifão pelo furo da caixa e ligação com galão.

a) Sifão conectado com galão; b) Detalhe da passagem do sifão através do furo da caixa.

3.2 Local do experimento e posicionamento dos módulos

O experimento foi realizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Curitiba, Sede Ecoville. As coordenadas geográficas do local do experimento eram de aproximadamente 25.44 °S, 49.35 °W e 955 m de altitude. Curitiba possui um clima subtropical, sendo classificado como Cfb (temperado marítimo úmido) conforme a classificação de Köppen-Geiger.

Os módulos experimentais foram posicionados sobre uma área com cobertura vegetal, com afastamento de 1,20 metros entre si. As Figuras 5 e 6 apresentam o esquema de localização dos módulos no local do experimento, e uma fotografia dos módulos durante o período de medições, respectivamente.

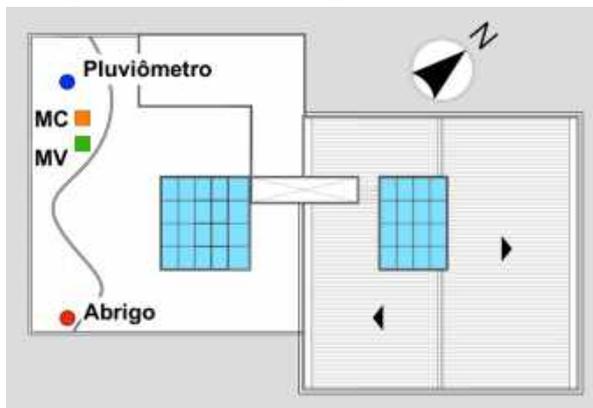


Figura 5 – Esquema de localização dos módulos, pluviômetro e abrigo do sensor de temperatura externa no terraço do bloco IJ da UTFPR, Sede Ecoville, Curitiba-PR (sem escala).



Figura 6 – Módulos MC (esquerda) e MV (direita) durante o período de medições.

Foi realizado um estudo de sombreamento de modo a garantir que os módulos fossem expostos à mesma quantidade de radiação solar, e não projetassem sombras um sobre o outro (Figura 7). Além disso, os módulos foram dispostos afastados de grandes barreiras que interferissem a ação dos ventos (muros).

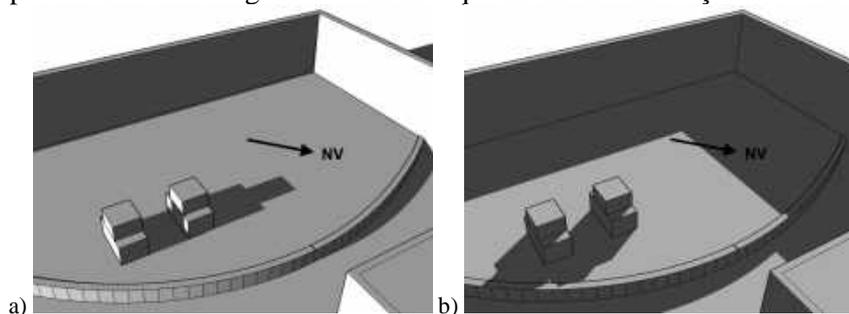


Figura 7 – Estudo de sombreamento do dia 15/12/17 (primavera).
a) 7h00min; b) 17h00min

3.3 Aquisição de dados e posicionamento dos sensores

O monitoramento de temperaturas foi realizado entre os dias 13/12/2017 até 19/12/2017, período próximo ao solstício de verão.

As temperaturas externas foram registradas por meio de um *data logger* HOBO®, modelo H08-003-02, e a umidade relativa do ar, por um *data logger* da Novus, modelo LogBox-RHT-LCD, ambos com intervalo de 5 minutos entre medições, tendo sido mantidos dentro de um abrigo contra radiação solar direta e intempéries.

Quanto às temperaturas do ar e da superfície no interior dos módulos, o registro foi realizado por meio de sensores modelo S-THB M002 e S-TMB M002, respectivamente, conectados a uma estação meteorológica HOBO®, modelo H21-001. As medições de temperatura foram programadas para ocorrer a cada 5 minutos. Ressalta-se que os sensores de temperatura utilizados nesse experimento foram equalizados, passando por um procedimento de monitoramento de temperatura em uma caixa fechada durante 6 dias. Para cada sensor foi gerada uma equação de correção, de modo que seus valores se aproximassem da média da temperatura entre todos os sensores.

Em ambos os módulos os sensores de temperatura foram fixados na parte inferior da bacia metálica (Figura 8). O sensor que monitorou temperatura do ar foi fixado com auxílio de fio de nylon e fita adesiva reforçada, preso e ficou pendurado a uma distância vertical de 15,0 cm da bacia, enquanto o sensor de temperatura superficial foi fixado com o auxílio de uma peça em EPS colada na bacia.

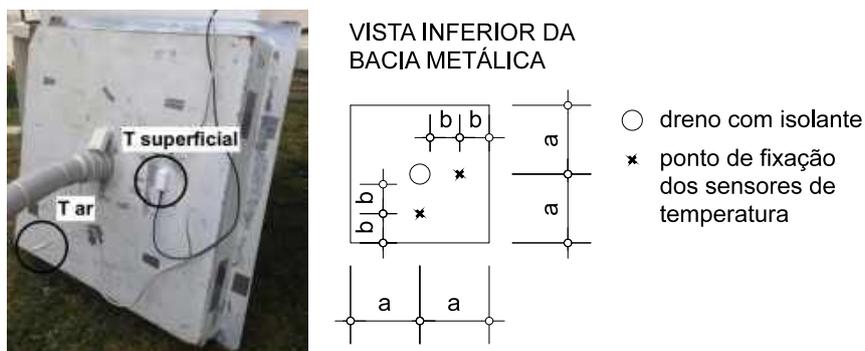


Figura 8 – Posicionamento dos sensores de temperatura nos módulos.

Para fins de caracterização da umidade do substrato no período de medições, foi construído para este estudo um sistema de monitoramento automático de umidade do solo, de baixo custo, utilizando a plataforma Arduino (Figura 9).

O sistema consiste de dois sensores de umidade de solo (princípio resistivo), um visor LED, e um módulo cartão SD, conectados a uma plataforma Arduino, alimentado por uma fonte conectada à rede elétrica. Esse procedimento foi realizado em triplicata, e a equação foi obtida com o auxílio do software Origin.

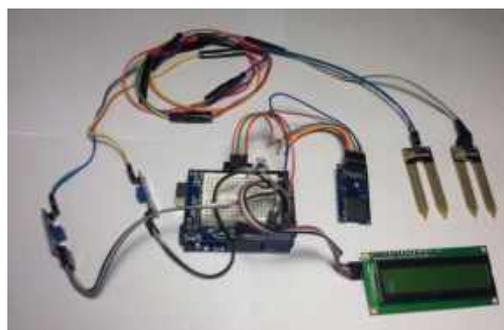


Figura 9 – Sistema de monitoramento da umidade do solo.

O sistema foi calibrado previamente utilizando-se a mesma terra preta empregada no módulo MV. Foi estabelecida uma equação de calibração em comum para os sensores, os quais foram inseridos em amostras de solo com 4 níveis de umidade, e suas leituras comparadas com o valor de umidade obtido após secagem em estufa. Durante o monitoramento módulo MV, as leituras ocorreram em intervalos de 5 minutos, tendo início às 21h00min do dia 13 até o dia 19/12.

O posicionamento dos sensores de umidade no MV é apresentado na Figura 10.

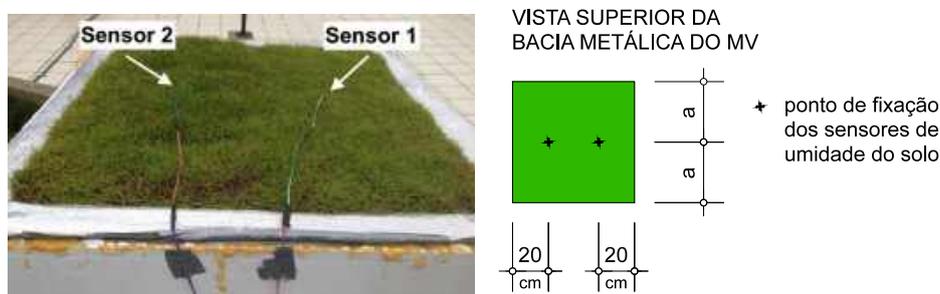


Figura 10 – Posicionamento dos sensores de umidade do solo no módulo MV

O monitoramento da precipitação durante o período de medições foi realizado utilizando-se um recipiente construído para esse fim. Foi utilizada uma garrafa de vidro de 1 litro, a qual envolvida com manta refletiva (*foil simples*), de modo a minimizar o aquecimento e consequente evaporação da água coletada. Na boca da garrafa foi colocado um funil de plástico de 10 cm de diâmetro. O recipiente foi parcialmente enterrado no terreno, próximo aos módulos (posicionamento consta na Figura 8), e a leitura era feita ao final de cada dia, de modo a coletar o volume de chuva que caiu ao longo do dia. Ressalta-se que as medições de pluviosidade iniciaram-se dia 12/12/2017.

A radiação solar também foi avaliada em todos os dias monitorados, e foram utilizados os dados disponibilizados pelo INMET, com intervalo de 1 hora entre medições.

3.4 Escolha do dia para análise

A escolha do dia a ser avaliado deu-se por 4 critérios:

1. Dia sem precipitação
2. Maior oscilação da temperatura diária (DTR ou *diurnal temperature range*) e com mais alta temperatura máxima diária
3. Maior valor de radiação solar acumulada e maior número de horas de radiação

Esses critérios foram escolhidos de modo a garantir que fosse avaliado o dia com as condições mais adversas, ou seja, cujas condições climáticas propiciassem o ganho de calor pelos módulos.

O DTR é calculado como a diferença entre a temperatura máxima no dia e a temperatura mínima no dia seguinte e, segundo a literatura, é influenciado pela nebulosidade e velocidade do vento, e pode ser empregado para avaliar estabilidade atmosférica (HOLMER et al., 2013). As nuvens podem desempenhar um papel fundamental na mudança do DTR devido a seus efeitos na temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) e temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$): as nuvens podem reduzir $T_{\text{máx}}$ reduzindo a radiação solar de ondas curtas incidente na superfície da Terra durante o dia, e podem aumentar a $T_{\text{mín}}$ interceptando radiação de onda longa liberada durante a noite (CAMPBELL e VANDER HAAR, 1997 *apud* LIU et al., 2004). Portanto, quanto maior o DTR, menor a nebulosidade do céu.

4. RESULTADOS

A Figura 11 apresenta um gráfico com as temperaturas do ar e superficial interna dos módulos, e temperatura e umidade relativa do ar externo, no período de 13 a 19/12/2017. A temperatura externa variou no período entre 14,9°C e 33,2°C, e a UR, entre 10,3% e 83%.

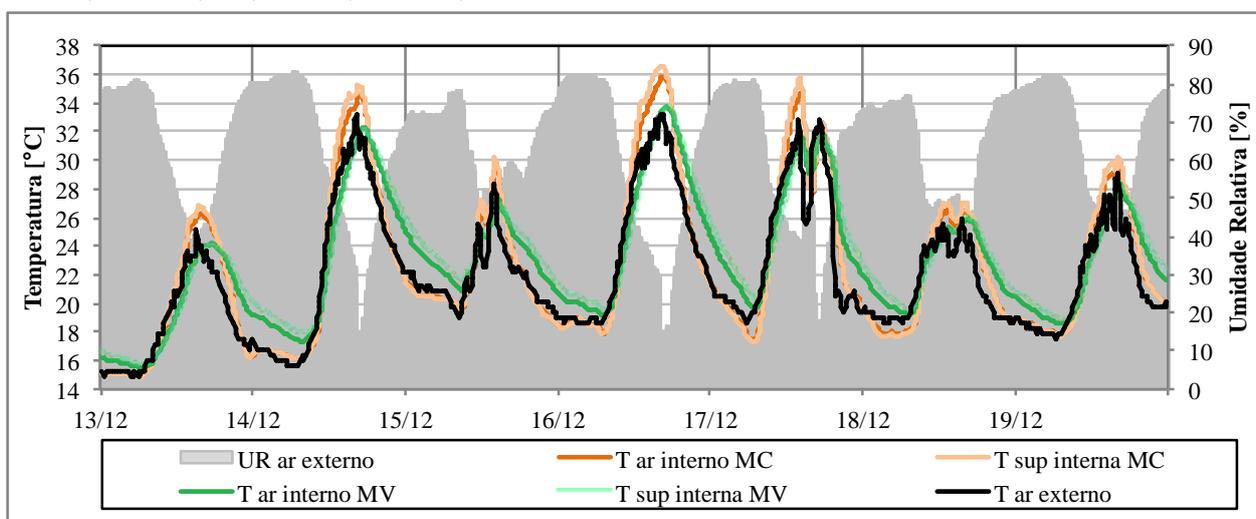


Figura 11 – Temperaturas do ar e superfície interna dos módulos, e temperatura e UR do ar externo (13 a 19/12/2017).

As temperaturas da superfície interna dos módulos acompanharam o padrão das temperaturas do ar interno dos módulos. As análises térmicas do presente estudo tomaram como base, portanto, apenas as temperaturas do ar interno.

Analisando a temperatura ar interno do MC, foi verificado efeito de atraso térmico, que atingiu no máximo 35min, porém não houve efeito de amortecimento térmico, sendo que ocorreu sobreaquecimento em todos os dias analisados, que chegou a 2,7°C. Com relação ao MV, foi verificado efeito de amortecimento térmico na maioria dos dias, e atraso térmico, sendo que no dia 13/12 ocorreu a maior redução da temperatura máxima, de 1,0 °C, e atraso térmico de 2h5min.

Para a escolha do dia a ser analisado, que corresponderia ao pior cenário, primeiramente foram identificados os dias em que houve precipitação (que seriam excluídos da análise), que ocorreu nos dias 15, 17 e 18/12/2017, com valores de 1,31 mm, 7,26 mm e 0,06 mm, respectivamente.

Posteriormente foram verificados os valores de temperatura máxima e mínima diária do ar externo, bem como DTR (Tabela 1). Os dias 14 e 16 apresentaram mesmo valor de $T_{\text{máx}}$, e valores de DTR muito próximos, porém o do dia 16 apresentou maior valor, de 14,5 °C.

Tabela 1 – Temperatura externa máxima e mínima diária e DTR no período de 13 a 19/12/2017.

Data	$T_{\text{máx}}$ [°C]	$T_{\text{mín}}$ [°C]	DTR
13/12	25,2	14,9	9,6
14/12	33,2	15,6	14,1
15/12	28,3	19,0	9,7
16/12	33,2	18,7	14,5
17/12	32,8	18,7	14,1
18/12	26,0	18,7	8,4
19/12	29,1	17,5	-

A tabela 2 apresenta os valores referentes à radiação solar no período de 13 a 19/12/2017. O dia 14/12 apresentou maior valor de radiação solar máxima (3.885 kJ/m²), enquanto o dia 16/12 apresentou o maior valor de radiação solar acumulada (27.476 kJ/m²). Comparando esses dois dias com relação ao número de horas de sol, o dia 16/12 apresenta maior número de horas (15 horas).

Com base nos critérios estabelecidos para a escolha do dia a ser analisado, foi escolhido o dia 16/12/2017.

Tabela 2 – Dados de radiação solar no período de 13 a 19/12/2017 (a partir de dados de radiação solar horária obtidos pelo INMET).

Data	Radiação solar acumulada (kJ/m ²)	Radiação solar máxima (kJ/m ²)	Início radiação solar (h:min)	Fim radiação solar (h:min)	Número de horas com rad. Solar
13/12	15.202	2.333	06:00	20:00	15
14/12	26.168	3.885	06:00	19:00	14
15/12	11.072	3.506	07:00	19:00	13
16/12	27.476	3.424	06:00	20:00	15
17/12	25.309	3.518	06:00	20:00	15
18/12	12.940	2.228	06:00	20:00	15
19/12	15.118	2.844	06:00	20:00	15

O gráfico das temperaturas do ar externas e internas dos módulos no dia 16/12/2017 é apresentado na Figura 12. Com relação ao módulo MV, não foi verificado efeito de amortecimento térmico, mas de atraso térmico, de 55 minutos. Comparando-se os módulos, o MV apresentou temperaturas inferiores ao MC, entre 9h40min e 18h10min, sendo que o MV atingiu sua $T_{\text{máx}}$ do ar interno 15 minutos após o MC. Além disso, a taxa de aumento e queda de temperatura, no período diurno e noturno, respectivamente, é visivelmente mais alta para o MC, o qual também apresenta maior amplitude térmica.

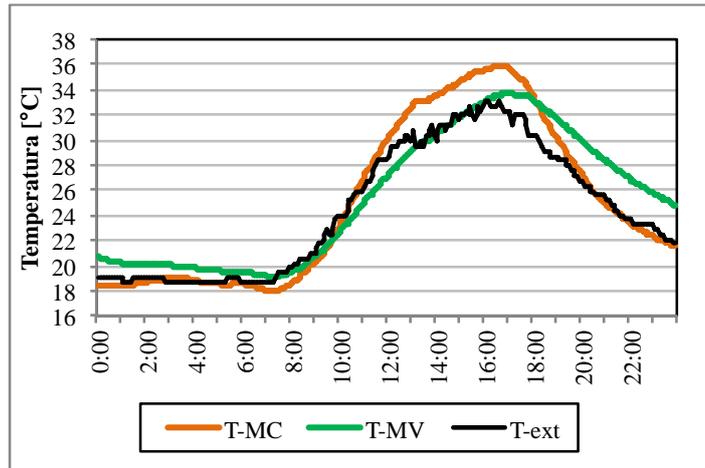


Figura 12 – Temperaturas externas e internas dos módulos para o dia selecionado (16/12/2017).

A diferença térmica entre os módulos e o ambiente externo ($T_{\text{ext}} - T_{\text{MC}}$ e $T_{\text{ext}} - T_{\text{MV}}$) é variável ao longo do dia medido (diferenças negativas indicam aquecimento das condições do ar internas), como mostra o gráfico da Figura 13.

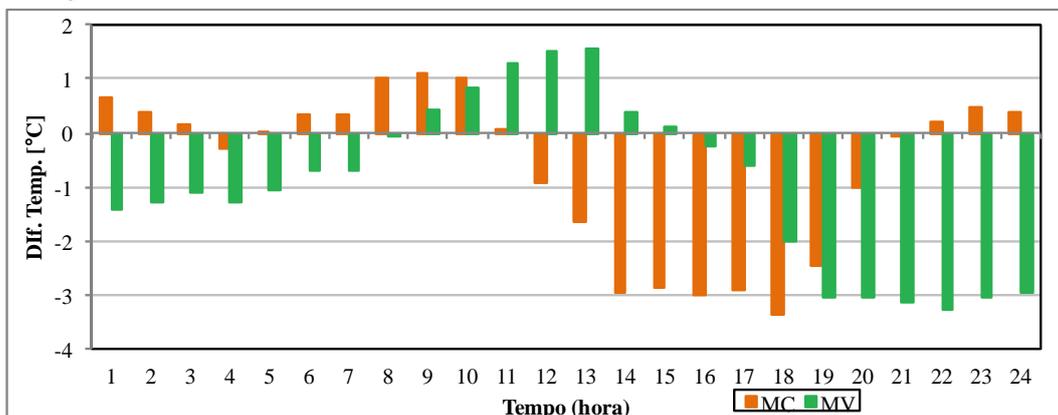


Figura 13 – Médias horárias das diferenças térmicas entre MC e MV em relação à temperatura externa para o dia selecionado (16/12/2017).

As temperaturas no interior do MC foram mais altas que as temperaturas externas em grande parte do período com incidência solar, com início da fase de aquecimento na hora 12 (entre 11h00min e 12h00min), considerando-se as diferenças médias horárias. Ainda no caso do MC, foi verificado efeito de resfriamento na parte da manhã, de até 1,1 °C. Analisando-se o comportamento do MV, foi verificado aquecimento a partir da hora 16 (entre 15h00min até 16h00min), 4 horas após o MC. No módulo MV o resfriamento ocorreu com maior intensidade em comparação ao outro módulo, atingindo uma diferença média horária de 1,5°C em relação à temperatura do ambiente externo, justo no período com maior incidência solar é mais intensa.

A Tabela 3 apresenta a relação de temperaturas médias, máximas e mínimas do ar do ambiente externo e do ambiente interno dos módulos, e também as amplitudes térmicas.

Percebe-se que a amplitude térmica foi reduzida em 3,3 °C comparando-se as temperaturas do ar internas do módulo MV e MC, demonstrando que a cobertura verde atua como um estabilizador das temperaturas. Embora a temperatura média do ar no interior do MV tenha sido mais alta com relação ao MC (diferença de 0,3 °C), o módulo MC atingiu maior valor de temperatura máxima do ar interno, que ficou 2,7 °C acima da temperatura máxima externa, enquanto no caso de MV, a diferença com relação à temperatura máxima do ambiente externo foi de 0,5 °C.

Os gráficos das Figuras 14 e 15 referem-se aos valores de umidade do solo ao longo do período medido, e aos valores de umidade do solo média para cada dia, respectivamente.

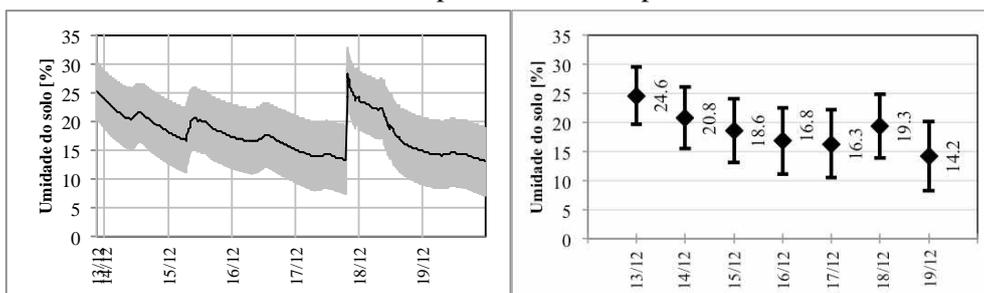


Figura 14 – Umidade do substrato ao longo do período de 13 a 19/12/2017.

Figura 15 – Umidade média do substrato para cada dia do período de 13 a 19/12/2017.

Entende-se que a variação da umidade do substrato também possa explicar o comportamento do MV ao longo do período medido. No dia em que foi verificado o melhor desempenho do MV com relação ao resfriamento do ambiente interno (13/12) a umidade do substrato encontrava-se mais elevada. Como apontado pelo estudo de Jim e Peng (2012), em dias ensolarados a umidade do substrato pode contribuir para o resfriamento das camadas abaixo dele.

Por sua vez, no dia 16/12, considerado o dia com condições do tempo mais extremas, em que foi verificado um leve aquecimento na temperatura do ar interno, de 0,5 °C, a umidade média do substrato neste dia atingiu um dos valores mais baixos, na faixa de $(16,8 \pm 5,7) \%$.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou resultados de avaliação de desempenho térmico de um sistema de cobertura vegetada realizada no período do verão, na cidade de Curitiba.

Os resultados apontaram para um melhor desempenho térmico da cobertura vegetada em comparação ao sistema de cobertura com camada de ar sem ventilação. O módulo MV atuou como um estabilizador de temperaturas, corroborando com outros estudos realizados nesse âmbito, uma vez que a amplitude térmica em seu interior foi menor em relação ao MC e ao ambiente externo, com exceção do dia com condições do tempo mais extremas (propícias ao ganho de calor), onde não houve redução da amplitude em comparação ao exterior. Além disso, no caso do MV foi verificado também o efeito de amortecimento térmico, na maioria dos dias, bem como de atraso térmico, coincidindo também com a literatura. Para o MC, por sua vez, não foram verificados os efeitos de amortecimento e atraso térmico.

Considerando o dia mais extremo, foi verificado um aumento considerável da temperatura máxima do ar no interior do MC em relação ao ambiente externo. No caso do MV, nesse mesmo dia, também ocorreu um aumento, porém em menores proporções. Ainda nesse dia, foi verificada também uma fase de resfriamento, que no caso do MV ocorreu no período com maior incidência solar, com redução de temperatura de até 1,5 °C em comparação ao ambiente externo, e para o MC ocorreu durante a manhã, atingindo até 1,1 °C, considerando-se as médias horárias das diferenças térmicas.

Foi apontado também que a temperatura do substrato pode ter influenciado no desempenho térmico da cobertura verde, uma vez que no dia de melhor desempenho do MV, a umidade estava mais alta que nos demais dias, o que pode ter sido um fator que contribuiu para a redução das temperaturas das camadas inferiores ao substrato.

A cobertura verde se mostra portando uma solução eficiente para estabilização das temperaturas no interior de uma edificação, bem como para promover efeitos de atraso térmico e redução da temperatura máxima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. L. P.; GOES, F.; BAUMANN, V. A. R. Protótipos parciais de cobertura verde para estudo da redução da carga térmica interna de edificação escolar em Florianópolis. In: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Campinas, 2015, Campinas: ENCAC/ELACAC. 2015.
- BUCKLAND-NICKS, M.; HEIM, A.; LUNDHOLM, J. Spatial environmental heterogeneity affects plant growth and thermal performance on a green roof. **Science of the Total Environment**. 2016, 553, 20 – 31.
- DI NÚBILA, C.; KRÜGER, E.; FERNANDES, L. Comparação do desempenho térmico de um sistema teto-reservatório e de um sistema de telhado verde para condições subtropicais. In: SALCEDO, R. F. B.; FONTES, M. S. G. de C. (organizadores). **Pesquisa em arquitetura e urbanismo: Desafios Urbanos**. v. 3, 1 ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2018. p. 105-118.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2026>. Acesso em: 30 abr. 2019.
- _____. **Balço Energético Nacional 2018** (ano base 2017). 2018a. Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>. Acesso em: 2 abr. 2019.
- _____. **Nota Técnica EPE 030/2018** – Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. 2018b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-epe-030-2018>. Acesso em: 30 abr. 2019.
- FEITOSA, R. C.; WILKINSON, S. J. Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit. **Building and Environment**, v. 140, p. 11–22, 2018.
- GONZÁLEZ-CRUZ, E. M.; GONZÁLEZ-GARCIA, S. I. Estudio Experimental Sobre el Comportamiento Térmico de Un Nuevo Tipo de Techo-Estanque Para el Enfriamiento Passivo en Clima Húmedo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 149-171, out./dez. 2013.
- GONZÁLEZ CRUZ, E.; ORDENES MIZGIER, M.; RUTTKAY PEREIRA, F.; GÜTHS, S. Estudo experimental com sistemas de resfriamento passivo em Florianópolis. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 15, 2014, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, p.143–152, 2014.
- HARDT, M. **Envelopamento vegetal em cânions urbanos: análise da aplicação de superfícies vegetadas em edificações dos setores estruturais de Curitiba**. 2013. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Gestão Urbana, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba: PUC-PR, 2013.
- HOLMER, B.; THORSSON, S.; LINDÉN, J. Evening evapotranspirative cooling in relation to vegetation and urban geometry in the city of Ouagadougou, Burkina Faso. **International Journal of Climatology**, v. 33, p. 3089–3105, 2013.
- JIM, C. Y.; PENG, L. L. H. Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of a tropical extensive green roof. **Ecological Engineering**, v. 47, p. 9–23, oct. 2012.
- KAVISKI, Francine. **Desempenho térmico de cobertura vegetada sobre guarita de fibra de vidro exposta a diferentes condições climáticas em Curitiba**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- KEELER, M.; BURKE, B. **Fundamentals of integrated design for sustainable building**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- KRÜGER, E. L.; LANGE, S. C.; FERNANDES, L.; ROSSI, F. Avaliação do potencial de resfriamento de um sistema teto-reservatório para condições subtropicais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 107-125, jul./set. 2016a.
- KRÜGER, E.; FERNANDES, L.; LANGE, S. Thermal performance of different configurations of a roof pond-based system for subtropical conditions. **Building and Environment**, v. 107, p. 90-98, 2016b.
- LIU, B.; XU, M.; HENDERSON, M.; YE QI; LI, Y. Taking China's Temperature: Daily Range, Warming Trends, and Regional Variations, 1955-2000. **Journal of Climate**, Boston, v. 17, Iss. 22, (Nov 15, 2004): 4453-4458,4460-4462.
- LIZ, Débora G. S. de; MIZGIER, Martin O.; GÜTHS, Saulo. Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.
- MINKE, G. **Techos verdes: Planificación, ejecución, consejos prácticos**. Uruguay: Editora Fin del Siglo, 2005.
- OLIVEIRA, P. L.; SOARES, R. G.; SANTOS, S. X. Desempenho térmico das edificações: estudo comparativo entre o telhado verde e outros tipos de coberturas. **Revista Petra**. Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix. 2016.
- PARIZOTTO, S.; LAMBERTS, R. Investigation of Green Roof Performance in Temperature Climate: A Case Study of an Experimental Building in Florianópolis City, Southern Brazil. **Journal of Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 43, p.1712-1722, 2011.
- ROSENZWEIG, C.; GAFFIN, S.; PARSHALL, L. (Eds.) **Green roofs in the New York Metropolitan Region: research report**. New York: Columbia University Center for Climate Systems Research; NASA Goddard Institute for Space Studies, 2006.
- _____. **Building and Environment**, v.42, n.1, p 1395-1405, 2007.
- SAVI, A. C. **Telhados Verdes: uma análise da influência das espécies vegetais no seu desempenho na cidade de Curitiba**. 2015. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UTFPR, à Capes, à empresa Diprotec pelo fornecimento de materiais para confecção do módulo de telhado verde (geomembrana extrudada em PEAD e manta drenante), e à Ana Paula Bunick, doutoranda em Biotecnologia Aplicada à Saúde da Criança e do Adolescente do Instituto de Pesquisa Pelé Pequeno Príncipe.