

APLICABILIDADE DE GLOBOS DE MATERIAIS ALTERNATIVOS EM TERMÔMETROS DE GLOBO

Alexandre Oliveira (1); Aldomar Pedrini (2)

(1) Arquiteto, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da UFRN, alxgoliveira@unifor.br

Professor do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

(2) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, apedrini@ufrnet.br
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental, Natal-RN, Tel.: (84) 3215 3722

RESUMO

O presente artigo teve como objetivo investigar a aplicabilidade de dois materiais alternativos, alumínio e PVC, para fabricação de globo para termômetro de globo, associado a termopares com registradores de dados. O método consistiu em uma análise estatística para se identificar as diferenças e o nível de correlação dos dados de medição da temperatura de globo (T_g) e da temperatura radiante média (T_{rm}) calculada de dois globos de 0.15m de diâmetro construídos com materiais alternativos com os dados medidos em um globo convencional de cobre (GC), usado como referência. As medições das temperaturas dos globos do experimento foram planejadas para ocorrerem em três cenários distintos, considerando a exposição dos globos à radiação de superfícies em espaço interno e a uma fonte de calor artificial, em ambiente climatizado artificialmente com baixa velocidade do ar. Os resultados mostraram que o globo de PVC apresentou melhor tempo de resposta, com maior correlação com os dados obtidos com o globo de cobre em condições de menor intensidade da radiação. O globo de alumínio destacou-se por também apresentar alta correlação com os dados medidos pelo globo de cobre, mesmo em mais altas temperaturas, porém apresentou tempo de resposta mais lento. Ambos, de fato, mostraram-se possíveis de utilização em substituição ao globo de cobre, porém deve-se considerar às exigências relativas ao tempo de resposta para registro da temperatura e as condições de exposição do globo à radiação em termos de intensidade.

Palavras-chave: instrumentos, termômetro de globo, conforto térmico.

ABSTRACT

The present paper aimed to investigate the suitability of alternative materials, aluminum and PVC, to the manufacture of globes to be used in globe thermometers, integrated with data logger with thermocouples. The method consisted of a statistical analysis to identify the differences and correlation between data measured with the two alternatives globes, which have 0.15m of diameter, with data measured with a 0.15m diameter conventional copper globe, adopted as reference. The measurement experiment was carried out considering three distinct scenarios where the globes were exposed to indoor surface radiation and to an artificial heat source in air-conditioned indoor space with a low air velocity. The results showed that the PVC globe presented a faster response rate and a higher correlation with data measured by the copper globe in low radiation intensity conditions. The aluminum globe, on the other hand, presented a slower response rate, but a higher data correlation with the copper globe measurements, even in higher temperatures. As a matter of fact, both revealed suitable to be used in globe thermometers provided it is considered the response rate requirements and the radiation intensity conditions in which the globes will be exposed.

Keywords: instruments, globe thermometer, thermal comfort.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação do conforto térmico em espaços internos usando como critério de análise o índice de conforto térmico PMV/PPD requer o conhecimento da temperatura do ar, temperatura radiante média (TRM), umidade relativa do ar, velocidade do ar, taxa metabólica e resistência térmica de vestimentas (ASHRAE, 2013). O uso do termômetro de globo é indicado pela norma *ISO 7726:1998 - Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities*, entre outros métodos, para estimar a TRM. A norma estabelece também as características do termômetro de globo, os procedimentos de medição, bem como as equações para o cálculo da TRM (ISO, 1998). No Brasil, termômetros de globo com registradores de dados e sensores integrados são considerados instrumentos relativamente novos e caros. Existem diversos modelos no mercado, como o Medidor de Estresse Térmico TGD-400 da Instrutherm (Figura 1) que é utilizado, geralmente, na avaliação de estresse térmico através do cálculo do IBUTG e ITGU a fim de se atender à normas de segurança no trabalho (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2015). Para avaliação dos efeitos da transferência de calor por radiação e convecção em ambientes com maior variação da radiação, recomenda-se o uso de três termômetros de globo em alturas que representem diferentes partes do corpo (tornozelo, dorso e cabeça), sendo considerável o erro no cálculo da TRM quando usado apenas um termômetro de globo (ISO, 1998).

Embora existam instrumentos menores e com globo de diâmetro reduzido, basicamente dois obstáculos podem ser apontados em relação ao uso de um instrumento com o globo de cobre de 0.15m de diâmetro, considerado o globo padrão, se adotado o procedimento sugerido pela referida norma. Primeiro, o custo elevado de compra de três instrumentos com sensores integrados com globo de cobre de 0.15m de diâmetro ou apenas dos globos de cobre para serem usados com registradores de dados e termopares. Muitos desses instrumentos com sensores integrados também possuem sensores para medição de outras variáveis ambientais que podem não ser úteis ou serem inadequados em função da posição do sensor ou de suas especificações. Assim, as medições destas outras variáveis poderiam ser realizadas de forma mais eficiente e barata por outros instrumentos isoladamente. Segundo, o fator praticidade quando se considera o manuseio de três globos de cobre (metal denso) de 0.15m de diâmetro. O uso deste tipo de globo promoverá acréscimo de peso para transporte de uma estação de medição, bem como aumento de custo e complexidade de seu projeto.

Destaca-se ainda que embora alguns estudos apontem que as diferenças encontradas entre a temperatura radiante média e a temperatura do ar possam ser pequenas, na ordem de menos de 1°C (THE UNIVERSITY OF SYDNEY, 2017b), isto é esperado apenas em edificações bem isoladas termicamente onde a maior parte das trocas de calor acontece através de processos convectivos (CIBSE, 2015). No Brasil, onde as edificações – inclusive edificações sustentáveis certificadas – são marcadamente caracterizadas por fachadas com baixa resistência térmica, independentemente do clima onde está localizada, mensurar os efeitos das trocas de calor por radiação das superfícies para avaliação do conforto térmico em espaços internos mostra-se relevante. Edificações comerciais com grandes áreas de fachada envidraçadas são facilmente encontradas mesmo em zonas de clima tropical, podendo potencialmente apresentar maiores temperaturas superficiais internas de forma a impactar o conforto térmico dos ocupantes. Portanto, a construção de instrumentos alternativos de medição de variáveis ambientais para pesquisas relacionadas ao conforto térmico em edificações, considerando as exigências normativas, aumento da praticidade de uso e redução dos custos financeiros envolvidos, poderá contribuir para ampliação de estudos nesse campo, em especial sobre a investigação dos efeitos da radiação sobre ocupantes em zonas internas perimetrais à fachada.



Figura 1 – Medidor de estresse térmico. (INSTRUTHERM, 2016).

1.1. Estudos sobre a aplicabilidade de globos alternativos em termômetros de globo

A norma ISO 7726 não especifica o tipo de material a ser usado na construção do globo de um termômetro de globo, porém recomenda que possa ser uma esfera, pintada na cor negra ou cinza e de diâmetro de 0.15m (ISO, 1998). O termômetro de globo mais comum possui um globo de 0.15m de diâmetro fabricado em chapa de cobre de 1.0mm de espessura. É possível utilizar um globo com diâmetro menor, ajustando-se os dados medidos com a equação de correção do cálculo da TRM, mas estes podem gerar erros nas medições em função dos efeitos da temperatura do ar e do fluxo de ar serem mais significativos (ISO, 1998). Apesar disso, Humphreys (1977) propõe o uso de um globo com diâmetro de aproximadamente 40mm para avaliar a radiação em ambientes com movimento do ar leve em virtude da taxa de resposta ser mais rápida, além da facilidade do manuseio de um instrumento menor e do uso de materiais alternativos, como um bola de tênis de mesa. Reduzir a espessura do material e o diâmetro do globo são medidas indicadas quando se deseja reduzir o tempo de resposta do termômetro, principalmente no planejamento de coleta dados em espaços externos onde as

variações ambientais ocorrem de forma mais rápida, sendo a bola de tênis de mesa uma alternativa eficiente (NIKOLOPOULOU *et al.*, 1999). Segundo Dear (1998), a construção de termômetros de globo utilizando-se uma bola de tênis de mesa mostra-se adequada para medições em espaços internos. O *CIBSE Guide A – Environmental Design* também sugere o seu uso, desde que a temperatura radiante média não seja muito maior que a temperatura do ar (CIBSE, 2015). Esta solução foi amplamente utilizada nas medições de temperatura de globo das edificações que fizeram parte do projeto da ASHRAE RP-884 – *Adaptive Model Project* que culminou na elaboração do modelo adaptativo de conforto térmico adotado atualmente na norma *ASHRAE Standard 55:2013 – Thermal environmental conditions for human occupancy* (ASHRAE, 2016). Dos 20 subprojetos que compõem o projeto RP-884, 15 usaram uma bola de tênis de mesa de 38mm de diâmetro para coleta dos dados de temperatura de globo (THE UNIVERSITY OF SYDNEY, 2017a).

A medição da temperatura no centro geométrico do globo com termopares ou outros tipos de sensores apresenta-se também como uma alternativa prática para fabricação de termômetros de globo e, dependendo do tipo de registrador de dados, pode ser uma opção bem mais econômica comparado a aquisição de instrumentos com sensores integrados. De acordo com Purswell e Davis (2008), um termômetro de globo com registrador de dados de temperatura tipo “botão” (Figura 2) pode ser uma opção viável, em termos de precisão, e econômica, gerando uma redução nos custos de até 85% quando comparado a um termômetro de globo industrializado com sensor e registrador de dados integrados. Contudo, comparando-se os resultados ao de um termômetro com termoresistor e registrador de dados de uma estação de monitoramento externa, observou-se que quanto maiores as temperaturas, maiores as diferenças entre os dois termômetros (PURSWELL e DAVIS, 2008).



Figura 2 – Globo de cobre de 0.15m de diâmetro (esfera de bomba de água) e base de fixação para registrador de temperatura do ar tipo “botão” (PURSWELL e DAVIS, 2008).

Wang e Li (2015) avaliaram a aplicabilidade de um globo alternativo de acrílico de 40mm de diâmetro exposto a radiação solar em espaços externos e observaram que as diferenças existentes em relação à radiação entre o espaço externo e espaços internos implicam em alterações expressivas nas medições em relação a um globo de cobre de mesma dimensão. A tendência do globo de acrílico em subestimar a TRM ocorre principalmente na condição de céu claro e deve-se essencialmente a baixa condutividade térmica do material, promovendo variações na temperatura superficial do globo que, associado aos efeitos do movimento do ar em diferentes direções no espaço externo, não se traduzem em medições representativas das condições térmicas internas no globo. Considerou-se ainda o problema relativo a opacidade do material plástico que, mesmo pintado, pode permitir a entrada de radiação solar direta, influenciando as leituras do sensor de temperatura interno. Tal restrição aplica-se também em espaços internos expostos ao acesso da radiação solar direta ou com grande assimetria de radiação, como é o caso de edificações cujas fachadas apresentam grandes áreas envidraçadas (WALIKIEWITZ *et al.*, 2015). Embora o globo de acrílico apresente um tempo de resposta mais rápido, o globo de metal é recomendado para espaços externos em razão da alta condutividade térmica que promove maior homogeneidade da temperatura na superfície do globo, devendo, entretanto, considerar-se os impactos da densidade do material para fabricação de um termômetro de globo alternativo (WANG e LI, 2015). Quando necessário for, o tempo de resposta do globo pode ser ainda reduzido com uso registradores de dados de resposta rápida (HELLON e CROCKFORD, 1959).

No Brasil, estudos relacionados a análise da aplicabilidade do uso de globos de materiais e diâmetros alternativos concentram-se na avaliação de conforto térmico de animais em campo aberto ou em instalações agrícolas (SOUZA. C. F. *et al.*, 2002; NAVARINI *et al.*, 2007; CAMERINI *et al.*, 2011; COELHO *et al.*, 2013; SAMPAIO *et al.*, 2016). Destaca-se os experimentos realizados por Souza *et al.* (2002), em espaço externo, com globos sob incidência da radiação solar direta, e por Camerini *et al.* (2011), com globos expostos à radiação de onda longa em um galpão, que mostram uma alta correlação dos dados obtidos por globos de PVC de 0.15m de diâmetro com um globo negro padrão de cobre também de 0.15m diâmetro.

Em um estudo em edificações, Barbosa *et al.* (2008) testaram um globo de PVC de 0.09m de diâmetro construído a partir de uma “bola de Natal”, associada a um termopar, como alternativa para o globo padrão de cobre. Exposto a uma fonte de calor artificial em distintos níveis de radiação, os resultados mostraram diferenças de menos de 0.25 °C entre os dois globos. Omar *et al.* (2010) também avaliaram a aplicabilidade de globos negros de plástico de 0.09m e 0.12m de diâmetro. Estes foram comparados a um termômetro de globo negro padrão de cobre de 0.15m de diâmetro com sensor de temperatura integrado de um medidor de estresse térmico. No experimento, os globos foram posicionados em uma sala sobre uma mesa, com velocidade do ar próxima de zero, de forma equidistante e na mesma altura de uma fonte de calor artificial. Esta consistia em duas lâmpadas incandescentes de 40W e de 100W que foram ligadas por um período de uma hora cada, em

momentos distintos, com registros de temperatura sendo realizados a cada 30s. Com os dados de temperatura obtidos em cada globo, foram calculadas as temperaturas radiantes médias e realizada a análise estatística ANOVA. Os resultados demonstraram que ambos globos de plástico constituem alternativas válidas para substituição do globo padrão de cobre de 0.15m de diâmetro, com erros relativos máximos de até 3.5%. Esse estudo, entretanto, limitou-se a comparar os dados de temperatura obtidos apenas durante o período inicial (20min) de aquecimento dos globos, não sendo analisadas as diferenças após a estabilização da temperatura.

2. OBJETIVO

O presente artigo tem como objetivo investigar a aplicabilidade de dois materiais alternativos, alumínio e PVC, para fabricação de globo para termômetro de globo, associado a termopares com registrador de dados. Estes foram construídos para serem usados em duas estações portáteis de medição de variáveis ambientais em pesquisa de campo para avaliação do conforto térmico em edificações climatizadas artificialmente.

3. MÉTODO

O método consistiu em uma análise estatística para se identificar as diferenças e o nível de correlação dos dados de medição, obtidos em experimento em espaço interno climatizado artificialmente, da temperatura de globo (T_g) e da temperatura radiante média (T_{rm}) calculada de dois globos construídos com materiais alternativos com os dados medidos em um globo convencional de cobre (GC), usado como referência. O globo de cobre (GC) pertence a um medidor de estresse térmico da Instrutherm, modelo TGD-200. Este possui características padronizadas, com diâmetro de 0.15m e espessura de 1.0mm, pintado na cor preta (emissividade ≥ 0.95). Os materiais dos globos alternativos são o alumínio e o PVC. O globo de alumínio (GA) foi construído a partir de duas conchas (hemisférios) para refeitório (Nº 15) em que foram soldadas para formar uma esfera de 0.15m de diâmetro, com 2.0mm de espessura. O Globo de PVC (GP) é originalmente uma bola para árvores de Natal de 0.15m de diâmetro, com 0.5mm de espessura. Ambos tiveram a superfície externa pintada na cor preta (emissividade ≥ 0.95).

A Figura 3 ilustra os dois objetos usados para fabricação dos globos e a Tabela 1 apresenta as principais características dos materiais destes. Dados de densidade, condutividade térmica e capacidade térmica foram referenciados em mais de uma fonte (SZOKOLAY, 2004; ABNT, 2005; CIBSE, 2015), porém variações podem existir em virtude de não haver garantia da pureza dos materiais dos globos usados. A resistência térmica e capacidade térmica foram calculadas usando-se valores médios de densidade, condutividade térmica e calor específico através dos métodos prescritos na norma da ABNT NBR 15220:2005 - Parte 2 (ABNT, 2005).

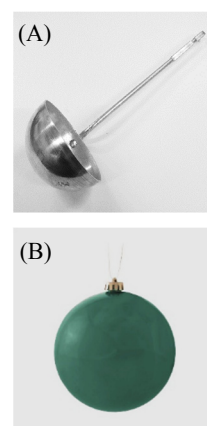





Figura 3 – (A) Concha de refeitório Nº 15; e, (B) Bola de Natal.

Tabela 1 – Globos usados no experimento e principais características dos materiais dos globos.

Características	 Globo de Alumínio (GA)	 Globo de PVC (GP)	 Globo de Cobre (GC)
Diâmetro (m)	0.15	0.15	0.15
Espessura (mm)	2.0	0.5	1.0
Densidade (kg/m³)	2700	1200-1400	8600 - 8900
Condutividade Térmica (W/m.K)	230 - 236	0.16 - 0.20	380 - 384
Calor Específico (kJ/kg.K)	0.87 - 0.88	1.00	0.38 – 0.39
Resistência Térmica (m².K /W)	0.0000087	0.0027778	0.0000026
Capacidade Térmica (kJ/m².K)	4.75	0.65	3.34

Para cada globo foi preparado um suporte (Figura 4) para termopar do tipo K que consistiu em um tubo metálico (feito de antena telescópica para rádio), encaixado em porca redutora rosqueável metálica (usada para irrigação) que foi preenchida com massa epóxi para fixação do tubo na porca e vedação do ar. Este foi inserido nos orifícios dos globos de alumínio e PVC, garantindo-se a ponta do termopar no centro geométrico do globo. O globo de cobre já possuía um tubo metálico para encaixe do termopar onde foi utilizado apenas uma fita adesiva para garantir a vedação.

Os termopares foram conectados a um registrador de dados de temperatura do ar Onset HOBO UX120-14M com 4 quatro canais para termopares de temperatura do ar, com precisão de ± 0.21 °C. Três termopares foram inseridos nos três globos (T2, T3 e T4) e o outro (T1) foi usado para registro da temperatura do ar. A umidade relativa do ar foi medida, apenas para referência, com um termohigrômetro da Instrutherm Mod. HT-300 e a velocidade do ar, com um velocímetro de fio quente bidirecional Testo 415. Estes não possuem registrador de dados, tendo sido realizadas leituras dos instrumentos no início e final do período de medição de cada cenário.



Figura 4 – Suporte para termopar do GA e GP.

3.1. Experimento de medição da temperatura de globo

O experimento de medição das temperaturas dos globos ocorreu em três cenários distintos, descritos na Tabela 2. Este foi realizado na sala do LABCON da Universidade de Fortaleza (UNIFOR), em Fortaleza-CE (Lat. 3.7S, Lon. 38.5°), que tem forma retangular, com 6.00m de largura, 9.35m de comprimento e 2.75m de pé-direito, com forro em PVC branco. A sala tem janelas altas (altura: 1.00m, peitoril: 1.90m) de vidro claro de 3mm com película fumê, situadas ao longo das fachadas Norte e Sul, de maiores comprimentos. As paredes, de 0.15m de espessura, são de tijolos cerâmicos, rebocados e pintados no interior na cor branca e externamente na cor bege. A sala está no térreo, abaixo do único pavimento superior existente no bloco e possui um condicionador de ar tipo *split high-wall* e um conjunto de nove luminárias de duas lâmpadas fluorescentes tubulares tipo “T8” de 32W que permaneceram ligadas durante as medições. Conforme esquema da Figura 5, os globos foram posicionados sobre uma mesa, em área central da sala, e ajustados para estarem na mesma altura e equidistantes (cerca de 20cm) a uma fonte de calor artificial. Esta poderia ser uma lâmpada halógena de bulbo transparente de 70W ou três de 70W. Os três globos ficaram expostos à radiação das superfícies internas, mas de maneira que nenhum globo fizesse “sombra” no outro em relação à radiação das fachadas com janelas. A Figura 5 apresenta também uma foto da sala do LABCON ilustrando a mesa com os globos e o seu posicionamento na sala em relação às janelas e condicionador de ar.

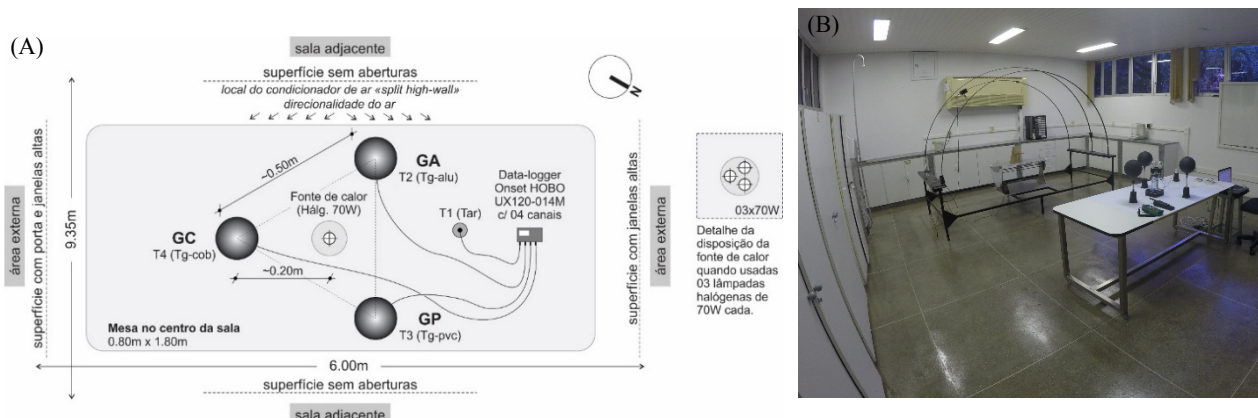


Figura 5 – (A) Esquema de planejamento do experimento; (B) Foto do LABCON com experimento sobre mesa (UNIFOR).

Em todos os cenários, o tempo de medição foi de 2h, com registros a cada 1min, e o sistema de climatização artificial foi mantido ligado, tendo sido acionado com pelo menos 45min de antecedência antes de se iniciar os registros (pré-resfriamento da sala e globos). A fonte de calor artificial foi ligada com 15min de início dos registros e desligada com 1h45min para se observar as variações de temperatura durante os processos de aquecimento (inicial) e resfriamento (final) dos globos. A velocidade do ar média foi planejada para ser baixa, com média inferior a 0.15 m/s e o termostato do condicionador de ar foi ajustado para proporcionar uma temperatura do ar entre 22.5 °C e 24 °C, condizente com os valores recomendados por normas brasileiras (ABNT, 2008). As medições ocorreram no final do verão, à tarde, entre os dias 05 a 14 de março de 2017.

Tabela 2 – Cenários para comparação dos resultados de medição da temperatura de globo dos três termômetros.

	Fonte de calor artificial	Climatização artificial	Temperatura do ar durante medições	Velocidade do ar média	Tempo de medição	Frequência de registros
Cenário C1	NÃO	Ligada	~ 24 °C	≤ 0.15 m/s	2 horas	1 min
Cenário C1	SIM (01 de 70W)	Ligada	~ 24 °C	≤ 0.15 m/s	2 horas	1 min
Cenário C2	SIM (03 de 70W)	Ligada	~ 24 °C	≤ 0.15 m/s	2 horas	1 min

Com os resultados das medições foram verificadas as médias das diferenças entre as medições de cada globo e sua magnitude através do cálculo da raiz quadrática média (RMS). Em seguida, foram analisados os níveis de correlação através do cálculo do coeficiente de Pearson (R^2), buscando-se avaliar a correlação dos dados obtidos com os globos de alumínio (GA) e PVC (GP) com os dados obtidos com o globo de cobre (GC). A partir dos dados de temperatura do ar e velocidade do ar foram, então, calculadas as temperaturas radiantes médias para cada globo em cada cenário. Em seguida, essas foram submetidas a mesma análise anterior, somando-se a uma análise de correlação e de variância ANOVA. Além disso, no Cenário 3 (C3) foram tiradas fotos termográficas da área mais aquecida dos globos com uma câmera FLIR C2, com emissividade ajustada para 0.95, após 1h30min de medição e com a fonte de calor artificial ainda ligada, a fim de se verificar o comportamento térmico das superfícies dos globos e sua relação com as condições térmicas internas do globo.

3.1. Cálculo da temperatura radiante média

A temperatura radiante média (T_r) representa a média das temperaturas das superfícies do entorno, ponderada pelo ângulo sólido de cada superfície em relação ao ponto de medição e expressa as trocas de calor por radiação de um ocupante em um ambiente. Esta é função da forma do ambiente e da área e temperatura das superfícies (CIBSE, 2015). A T_r pode ser calculada através da Equação 1 (ISO, 1998).

$$T_r = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{\epsilon_g \times \sigma} \times (T_g - T_a)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

T_r é a temperatura radiante média [°C];

T_g é a temperatura de globo [°C];

h_{cg} é o coeficiente de transferência de calor por convecção ao nível do globo [W/m².K];

ϵ_g é a emissividade do globo [adimensional];

σ é a constante de Stehen Boltz, igual 5.67×10^{-8} W/m².K⁴;

T_a é a temperatura do ar [°C].

Para uma situação de convecção forçada, com termômetro de globo de diâmetro de 0.15m e emissividade de 0.95, a Equação 1 pode ser reescrita na forma da Equação 2, usada no presente artigo.

$$t_r = \left[(t_g + 273.15)^4 + 2.5 \times 10^8 \times v_a^{0.6} \times (t_g - t_a) \right]^{0.25} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

t_r é a temperatura radiante média [°C];

t_g é a temperatura de globo [°C];

v_a é a velocidade do ar ao nível do globo [W/m².K];

t_a é a temperatura do ar [°C].

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Comparação das temperaturas de globo

As figuras 6 e 7 apresentam os resultados das medições da temperatura do ar e dos globos nos cenários C1, C2 e C3. Em razão do uso de registrador de dados de resposta rápida com termopares, observou-se nos três cenários oscilações de temperatura de aproximadamente 1 °C, em ciclos de cerca de 15-20min, em função do acionamento e desligamento do compressor do condicionador de ar.

As temperaturas de globo registradas no C1 são resultantes apenas da radiação das superfícies internas. Neste, a temperatura do ar (T_a) média registrada foi de 22.8 °C, a umidade relativa do ar (UR) variou entre 54% e 58% e a temperatura de

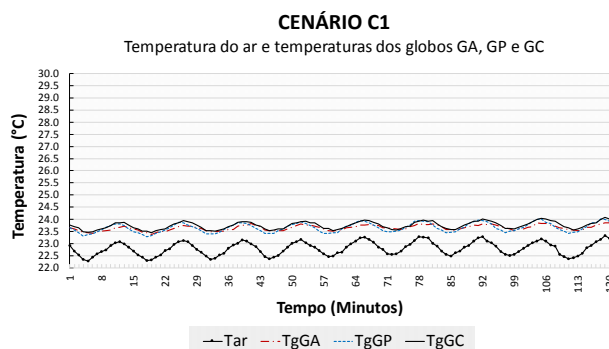


Figura 6 - Temperatura do ar e dos globos no Cenário 01.

globo média do globo de cobre (GC), usado como referência, foi de 23.7 °C. As temperaturas dos globos ficaram bem próximas, porém as temperaturas do globo de alumínio (GA) não atingiram às máximas encontradas no globo de cobre (GC), enquanto que as temperaturas do globo de PVC (GP) apresentaram mínimas inferiores aos do GC, indicando um resfriamento maior do plástico durante as oscilações de temperatura do ar. A diferença média encontrada entre o GA e o GC é de 0.10 °C, enquanto a diferença média entre o GP e o GC foi 0.09 °C. Ambos apresentaram raiz quadrática média (RMS) das diferenças de 0.12 °C, sendo, portanto, iguais a magnitude das diferenças de temperatura do GA e do GP em relação ao GC. O GA apresentou coeficiente de correlação de Pearson $R^2 = 0.88$ e o GP, de 0.86.

A Figura 7 apresenta os resultados das medições da temperatura do ar e dos globos dos cenários C2 e C3. No cenário C2, registrou-se uma temperatura do ar média de 23.8 °C e UR entre 53% e 56%. Com uma fonte de calor artificial constituída por uma lâmpada halógena de 70W, a temperatura do globo de cobre registrou em média 25.7 °C. Neste cenário, os valores registrados de temperatura dos três globos foram também bem próximos. O GA, no entanto, apresentou uma maior diferença em relação ao GC, em média de -0.06 °C, com raiz quadrática média (RMS) das diferenças de 0.16 °C. O GP apresentou diferença média menor em relação ao GC, de 0.03 °C e raiz quadrática média (RMS) das diferenças também menor, de 0.07 °C, em relação ao GC. No C2 observa-se mais claramente que o GA apresentou também um menor tempo de resposta nos momentos de aquecimento e resfriamento, comparado ao GP. No período de estabilização da temperatura dos globos, as temperaturas mínimas registradas com o GA foram superiores as medidas pelo GP que, da mesma forma que no C1, apresentou mínimas inferiores às do GC. Em relação ao GC, a correlação dos dados calculados através do coeficiente de Pearson (R^2) para o GA foi de 0.95 e para o GP, de 0.99. No cenário C3, a temperatura do ar média registrada foi de 23.5 °C e a UR entre 56% e 59%. Com uma fonte de calor artificial formada por três lâmpadas halógenas de 70W posicionadas frontalmente e equidistantes ao centro de cada globo, a temperatura média registrada no GC foi de 28.7 °C. Diferentemente dos outros cenários, as diferenças de temperatura encontradas entre o GC e os globos alternativos, GA e GP, foram maiores. Embora o GP ainda se destaque por apresentar um tempo de resposta mais rápido, verificado principalmente nos momentos de aquecimento (00h15min) e resfriamento (1h45min) dos globos, em mais altas temperaturas este apresentou uma diferença bem maior em relação aos valores registrados pelo GC, de média de -0.08 °C e raiz quadrática média (RMS) de 0.64 °C. Por outro lado, o GA apresentou diferença média menor, de apenas 0.08 °C e raiz quadrática média (RMS) das diferenças de 0.40 °C, em relação ao GC. Verifica-se, portanto, que com o aumento da intensidade da radiação, o GP tende a subestimar os valores da temperatura de globo. Assim como no C1 e C2, às mínimas registradas com o GA durante as oscilações de temperatura foram também superiores as registradas pelo GC e o tempo de resposta do GA também foi mais lento do que o do GP. Quanto a correlação entre os dados, verificada através do cálculo do coeficiente de Pearson, o valor de R^2 do GA foi de 0.96 e o valor R^2 do GP foi de 0.99. Mesmo identificado uma correlação maior entre o GP e o GC, possivelmente em função do tempo de resposta do GP ser similar ao do GC, o GA, nestas condições, mostra-se mais eficaz por apresentar uma magnitude de erro menor do que a do GP.

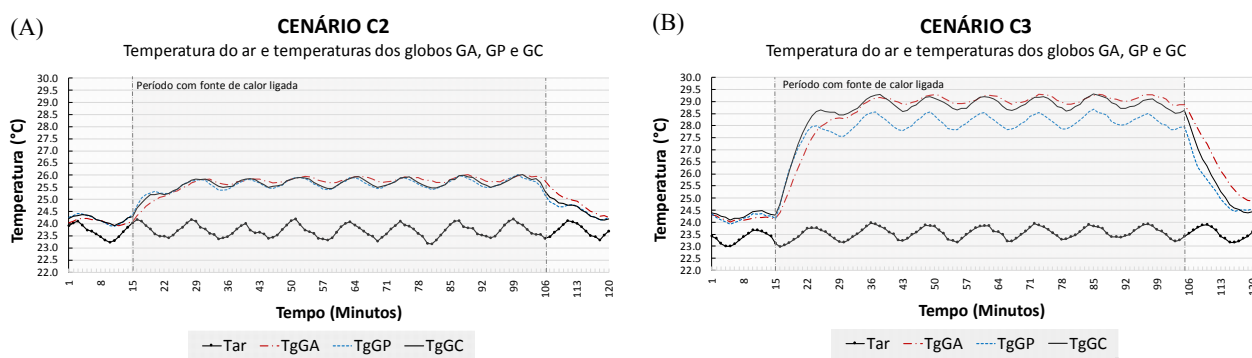


Figura 7 - Temperatura do ar e dos globos: (A) Cenário C1 e (B) Cenário C2.

A Figura 8 apresenta as fotos termográficas tiradas durante o C3, com 1h00min de acionamento da fonte de calor artificial. O GP apresentou uma temperatura superficial em seu centro maior, de cerca de 42.6 °C, do que as temperaturas superficiais de GA (33.3 °C) e de GC (30.8 °C). A maior temperatura superficial do GP, em função da baixa condutividade térmica do material, associado a uma maior heterogeneidade das temperaturas superficiais, possivelmente explicam as menores temperaturas registradas pelo GP que não refletem as condições térmicas no interior do globo quando exposto a uma maior intensidade de radiação.

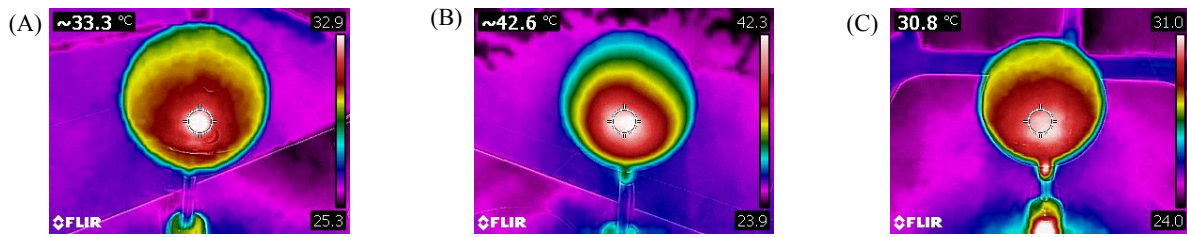


Figura 8 – Fotos termográficas dos globos no C3, após 1h30min de acionamento das lâmpadas: (A) Globo de alumínio (GA); (B) Globo de PVC (GP) e (C) Globo de cobre (GC).

4.2. Comparação das temperaturas médias radiante calculadas

Para cada cenário foram calculadas as temperaturas radiantes médias (T_r) dos globos, apresentadas nas figuras 9 e 10. A velocidade do ar média medida de cerca de 1.5 m/s foi adotada como valor fixo na equação de cálculo da T_r . Para um globo de 0.15m de diâmetro, o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção forçada (h_g) foi calculado em 4.31 W/m².K.

Os gráficos dos três cenários apresentaram características semelhantes aos dos resultados das temperaturas de globo, porém com uma maior magnitude de valores. O mesmo procedimento de análise estatística realizado com as temperaturas de globo foi realizado para análise das temperaturas radiantes médias. Os resultados das médias das diferenças e das raízes quadráticas médias das diferenças das temperaturas de globo e das temperaturas radiantes médias foram praticamente os mesmos, sendo desprezíveis as diferenças encontradas. Assim, para as condições semelhantes às do experimento do presente artigo, demonstrou-se que esse tipo de análise comparativa é válido tanto para os valores das temperaturas de globo quanto sobre os valores das temperaturas radiantes médias. Quanto ao cálculo do coeficiente de Pearson (R^2), os resultados foram ligeiramente diferentes. No C1, o GA apresentou R^2 de 0,62 e o GP de 0,39, indicando baixa correlação, muito embora a magnitude de erro encontrada seja desprezível. No C2, o GA apresentou R^2 de 0,98 e o GP de 1.00, indicando alta correlação de ambos, com uma aceitável margem de diferenças (≤ 0.10 °C). No C3, o GA e o GP apresentaram os mesmos valores de R^2 que no C1, porém se destaca a maior média das diferenças e de magnitude das diferenças com o GP, respectivamente de 0.55 °C e de 0.62 °C, comparada às do GA, respectivamente de -0.08 °C e de 0.39 °C.

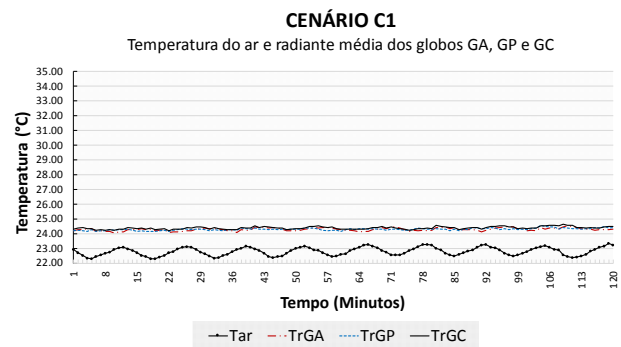


Figura 9 - Temperatura do ar e radiante média no Cenário 01.

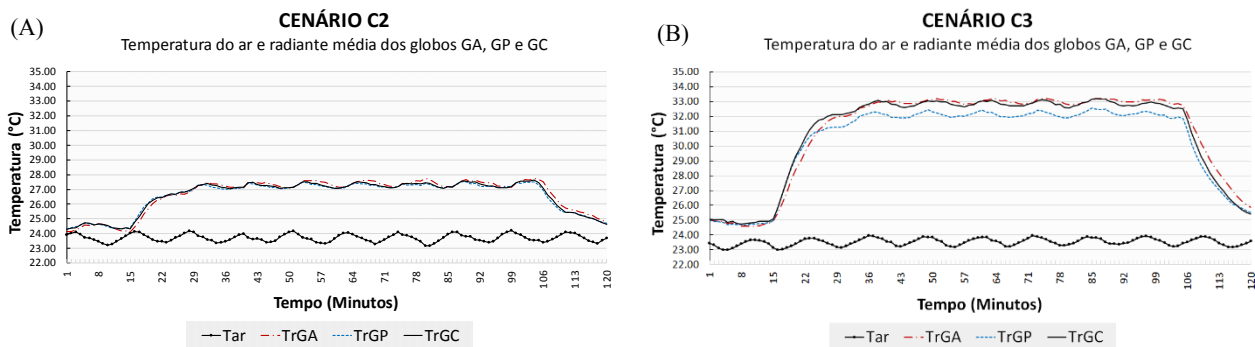


Figura 10 - Temperatura do ar e radiante média: (A) Cenário C1 e (B) Cenário C2.

Por fim, foi realizada uma análise estatística ANOVA dos dados de temperatura radiante média do GA e GP em relação ao GC para cada cenário, considerando um nível de significância de 5%. Os resultados mostraram que o valor-P em todos os cenários sugerem alta significância estatística ($p \leq 0.05$) de correspondência das medições realizadas pelo GA e GP com o GC. A Tabela 3 apresenta um sumário dos resultados do valor-P para cada globo alternativo em relação ao GC em cada cenário.

Tabela 3 – Cenários e valor-P calculados para cada globo alternativo (GA e GC) em relação ao GC.

CENÁRIO C1		CENÁRIO C2		CENÁRIO C3	
Globo	Valor-P	Globo	Valor-P	Globo	Valor-P
GA	1.13E-26	GA	7.4E-109	GA	4.1E-109
GP	1.86E-14	GP	1.3E-148	GP	1.5E-164

5. CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou uma análise da aplicabilidade de termômetros de globo com globos fabricados com materiais alternativos (PVC e alumínio), associado a um registrador de dados e termopares. Inicialmente, considerou-se uma distinção nos estudos apresentados quanto às recomendações encontradas para uso de globos alternativos voltadas para avaliação da radiação no espaço externo e interno onde os resultados encontrados no primeiro não deveriam se estender ao segundo em função das diferenças de condições ambientais encontradas nos dois (SPAGNOLO e DE DEAR, 2003). Por outro lado, mesmo que haja uma diversidade nesses estudos quanto aos materiais, diâmetros de globos testados e aos métodos de pesquisa aplicados - que variam basicamente em termos de tipos de sensores e registradores de dados usados, de fonte de calor a que são expostos os globos, de tempo de exposição e período de medição e dos procedimentos de análise estatística adotados – todos apontam que o globo de cobre de 0.15m de diâmetro é passível de ser substituído de forma eficiente por globos de diâmetros e materiais diversos, dependendo das condições onde será usado.

Os resultados do presente artigo demonstraram que tanto o globo de metal (GA) quanto o globo de plástico (GP) de 0.15m de diâmetro são adequados para medição da temperatura de globo, condicionando-se a escolha de uso de um destes a magnitude da intensidade de radiação a ser exposto e ao tempo de resposta desejado. O globo de PVC (GP) de 0.15m de diâmetro apresentou-se como uma solução mais adequada em um cenário onde se exige um tempo de resposta mais rápido – como em situações em que variações de cobertura de céu ao longo do dia, com obstrução temporária da radiação solar direta, possam gerar oscilações nas temperaturas superficiais internas – e as diferenças entre a temperatura do ar e a temperatura de globo sejam em média de até 3.0 °C. Esta restrição em relação ao uso de um globo de plástico, e outras limitações encontradas nos estudos apresentados, geralmente não se aplicam nas condições frequentemente encontradas em espaços internos climatizados artificialmente: de baixa velocidade do ar, direcionalidade do movimento do ar menos errática e variações dos fluxos de radiação de onda longa das superfícies mais lentas do que as encontradas no espaço externo. Por outro lado, é preciso aprofundar as investigações considerando-se medições próximas a fachadas envidraçadas, principalmente para Leste e Oeste, onde as temperaturas superficiais podem implicar em temperaturas radiantes médias maiores.

O globo de alumínio (GA) mostrou-se mais eficaz quando houve uma diferença média de mais de 4.0 °C entre temperatura do ar e a temperatura de globo, com registro de temperaturas mais próximos do medidos no globo de cobre (GC). Entretanto, o GA apresentou coeficiente de correlação R^2 menor do que o GP em função principalmente do menor tempo de resposta. O tempo de resposta mais longo do GA provavelmente explique-se pela maior espessura do alumínio, de 02mm, que resultou em maior inércia na transferência de calor e consequente alteração tardia das condições térmicas no interior do globo. Recomenda-se então a realização de novas avaliações, usando globos metálicos de alumínio de menor espessura que hipoteticamente seriam a melhor opção alternativa tanto para espaços internos como externos. Por fim, salienta-se que o presente estudo considerou apenas condições ambientais internas climatizadas artificialmente, com baixa velocidade do ar. Assim, outros estudos são necessários para se verificar a aplicabilidade destes materiais alternativos em condições ambientais distintas, como em espaços naturalmente ventilados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações.** Rio de Janeiro: ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR15220-2: 21 p. 2005.

_____. **Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 2: Parâmetros de conforto térmico.** Rio de Janeiro: ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16401-2: 11 p. 2008.

ASHRAE. **ASHRAE 2013 Fundamentals Handbook: Indoor Environmental Quality - F09 - Thermal Comfort.** New York: American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers. 2013.

_____. **ASHRAE Standard 55: 2013 - Thermal environmental conditions for human occupancy.** New York: American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers.: 220 p. 2016.

- BARBOSA, M. J.; LAMBERTS, R.; GUTHS, S. Uso de barreiras de radiação para minimizar o erro no registro das temperaturas do ar em edificações. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 8, p. 117-136, 2008.
- CAMERINI, N. L. C.; MENDES, L. B. M.; MOTA, J. K. D. M.; NASCIMENTO, J. W. B. N.; FURTADO, D. A. Avaliação de instrumentos agrometeorológicos alternativos para o monitoramento da ambiência em galpões avícolas. **Engenharia na Agricultura**, v. 19, n. 2, p. 125-131, 2011.
- CIBSE. **CIBSE Guide A: Environmental design 2015**. London: The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE): 402 p. 2015.
- COELHO, R. B.; PAULA, M. O. D.; RAMIREZ, M. A.; CAETANO, S. P.; VIEIRA, D. F. D. Estudo de materiais alternativos empregados na confecção do termômetro de globo negro utilizado para cálculo de ITGU e CTR. **Engenharia na Agricultura**, v. 21, n. 6, p. 597-604, 2013.
- DE DEAR, R. Ping-pong globe thermometers for mean radiant temperatures. **H and V Engineer**, v. 60, n. 681, p. 2, 1998.
- HELLON, R. F.; CROCKFORD, G. W. Improvements to the globe thermometer. **Journal of Applied Physiology**, v. 14, n. 4, p. 649-650, 1959. Disponível em: < <http://jap.physiology.org/content/jap/14/4/649.full.pdf> >.
- HUMPHREYS, M. A. The optimum diameter for a globe thermometer for use indoors. **Annals of Occupational Hygiene** v. 20, n. 2, p. 135-140, 1977.
- INSTRUTHERM. Medidor de Stress Térmico - Termômetro Globo c/ Cálculo IBUTG. 2016. Disponível em: < http://www.instrutherm.com.br/instrutherm/product.asp?template_id=60&old_template_id=60&partner_id=&tu=b2c&dept%5Fid=350&pf%5Fid=05911&nome=Medidor+de+Stress+T%99rmico+Digital+com+fun%7%E3o+de+Anem%F4metro+mod%2ETGD%2D400&dept%5Fname=Medidor+de+Stress+T%99rmico >. Acesso em: 11 fev. 2017.
- ISO. **ISO 7726:1998 - Ergonomics of the thermal environment -- Instruments for measuring physical quantities**: International Organization for Standardization: 51 p. 1998.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO. **Norma Regulamentadora N° 15 - Atividades e Operações Insalubres**. 2015.
- NAVARINI, F. C.; KLOSOWSKI, E. S.; TORRES, A. C.; ROCKENBACH, E. K.; EYNG, C.; M., L. Avaliação de diferentes diâmetros e materiais para confecção de globos negros para estimativa de índice de conforto térmico em condições de pasto. Zootec 2007 - XVII Congresso Brasileiro de Zootecnia, 2007, Londrina. Associação Brasileira de Zootecistas - ABZ.
- NIKOLOPOULOU, M.; BAKER, N.; STEEMERS, K. Improvements to the globe thermometer for outdoor use. **Architectural Science Review**, v. 42, n. 1, p. 27-34, 1999/03/01 1999. ISSN 0003-8628. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/00038628.1999.9696845> >.
- OMAR, L. G.; MIRANDA, S. A. D.; CARVALHO, B. C.; APOLONIO, R. Proposta alternativa de globo negro para obtenção de temperatura radiante em ambientes internos. XIII Encontro nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2010, Canela. p.4.
- PURSWELL, J. L.; DAVIS, J. D. **Construction of a low-cost black globe thermometer**. p.379-381. 2008
- SAMPAIO, C. A. D. P.; TEREZO, R. F.; ANDRADE, L. D. B.; BORGES, L. K. **Inércia térmica e histerese de globos-termômetros**. XLV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2016. Florianópolis 2016.
- SOUZA, C. F.; TINÓCO, I. F. F.; BAËTA, F. C.; FERREIRA, W. P. M.; SILVA, R. S. Avaliação de materiais alternativos para confecção do termômetro de globo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 26, n. 1, p. 157-164, 2002.
- SPAGNOLO, J.; DE DEAR, R. A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. **Building and Environment**, v. 38, n. 5, p. 721-738, 5// 2003. ISSN 0360-1323. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132302002093> >.
- SZOKOLAY, S. V. **Introduction to architectural science: the basis of sustainable design**. Bullington, Great Britain: Architectural Press, 2004. 328 ISBN 0750658495.
- THE UNIVERSITY OF SYDNEY. ASHRAE RP-884 Adaptive Model Project. 2017a. Disponível em: < http://sydney.edu.au/architecture/staff/homepage/richard_de_dear/ashrae_rp-884_appendc.shtml#1 >. Acesso em: 01 Fev. 2017.
- _____. ASHRAE RP-884 Adaptive Model Project - Data Downloader. 2017b. Disponível em: < http://sydney.edu.au/architecture/staff/homepage/richard_de_dear/ashrae_rp-884.shtml >. Acesso em: 01 Fev. 2017.
- WALIKIEWITZ, N.; JÄNICKE, B.; LANGNER, M.; MEIER, F.; ENDLICHER, W. The difference between the mean radiant temperature and the air temperature within indoor environments: A case study during summer conditions. **Building and Environment**, v. 84, p. 151-161, 1// 2015. ISSN 0360-1323. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132314003576> >.
- WANG, S.; LI, Y. Suitability of acrylic and copper globe thermometers for diurnal outdoor settings. **Building and Environment**, v. 89, p. 279-294, 7// 2015. ISSN 0360-1323. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315001055> >.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CAPES pela concessão de bolsa do programa PDSE para Alexandre Oliveira para realização de estágio de doutorado-sanduiche na Universidade de Sydney, na Austrália, e à Universidade de Fortaleza (UNIFOR).