

Temperatura Radiante média obtida via termômetro de globo: análise crítica de dados de um estudo de campo

Mean radiant temperature calculated from globe thermometer data: critical data analysis of a field study

Leandro Carlos Fernandes(1); Eduardo L. Krüger(2)

1 Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, PR, Brasil.

E-mail: fernandes.ufpr@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4393-7322>

2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, PR, Brasil.

E-mail: ekruger@utfpr.edu.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2895-5530>

Revista de Arquitetura IMED, Passo Fundo, vol. 8, n. 1, p. 147-163, Janeiro-Junho, 2019 - ISSN 2318-1109

[Recebido: 30 julho 2019; Aceito: 13 agosto 2019]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2019.v8i1.3456>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editor-chefe: Marcos L. S. Oliveira

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

A temperatura radiante média (T_{rm}) é uma das principais variáveis utilizadas em estudos sobre percepção térmica e desempenho térmico de edificações. Usualmente, é obtida indiretamente, com procedimento apoiado em dados de termômetros de globo. Em certas situações, esse procedimento pode retornar resultados imprecisos. O objetivo deste estudo foi verificar a confiabilidade da T_{rm} obtida considerando dados de termômetro de globo que utilize bola de tênis de mesa. T_{rm} obtidas considerando esse equipamento foram comparadas com as obtidas quando utilizados fator de forma e temperaturas superficiais. Analisaram-se diferentes contextos ambientais internos de uma edificação-teste: a) Sem resfriamento e sem ventilação forçada; b) Com resfriamento passivo e sem ventilação forçada; c) Com resfriamento passivo e com ventilação forçada; d) Com resfriamento mecânico e com ventilação forçada. Em todos os contextos analisados ficou evidente que a temperatura de globo está mais relacionada com a temperatura do ar do que com a temperatura radiante média. Nos casos 'a' e 'b', os resultados indicaram pequenas diferenças entre os resultados obtidos pelos dois procedimentos. No caso 'c', as diferenças foram significativas, e no caso 'd', foram ainda maiores, gerando incerteza sobre o uso do equipamento.

Palavras-chave: Temperatura radiante média. Termômetro de globo. Temperatura de globo. Temperaturas superficiais. Método fator de forma.

Abstract

The mean radiant temperature (T_{mrt}) is one of the main variables used in studies on the perception and thermal performance in/of buildings. Usually, it is obtained indirectly, with procedure based on data from globe thermometers. In certain situations, this procedure may return inaccurate results. The aim of this study was to verify the reliability of T_{mrt} obtained considering data of globe thermometer using ping-pong ball. T_{mrt} obtained considering this equipment were compared with those obtained when using form factor and surface temperatures. Different environmental contexts of a test building were analyzed: a) Without cooling and without forced ventilation; b) With passive cooling and without forced ventilation; c) With passive cooling and forced ventilation; d) With mechanical cooling and forced ventilation. In all the analyzed contexts it became evident that the globe temperature is more related to the air temperature than to the average radiant temperature. In cases 'a' and 'b', the results indicated small differences between the results obtained by the two procedures. In case 'c', the differences were significant, and in case 'd', were even greater, generating uncertainty about the use of the equipment.

Keywords: Mean radiant temperature. Globe thermometer. Globe temperature. Surface temperatures. Method of angle factor.

Lista de Símbolos

D	Diâmetro do globo [m].
ε_g	Emissividade do globo [adimensional].
F	Fator de forma.
T_{ar}	Temperatura do ar [°C].
T_{globo}	Temperatura de globo [°C].
$T_{in\ ar}$	Temperatura interna do ar [°C].
$T_{ex\ ar}$	Temperatura externa do ar [°C].
T_{rm}	Temperatura radiante média [°C].
$T_{rm\ fator\ de\ forma}$	Temperatura radiante média obtida via fator de forma e temperaturas superficiais [°C].
$T_{rm\ globo}$	Temperatura radiante média obtida considerando dados de termômetro de globo [°C].
T_s	Temperatura superficial [°C].
UR	Umidade relativa [%].
v_{ar}	Velocidade do ar [m/s].
Ω	Ângulo sólido dado pela superfície em relação ao ponto de interesse [esferorradiano].

1 Introdução

Usualmente, para avaliação do desempenho térmico de edificações, tomam-se como parâmetros os modelos de percepção térmica. Tais modelos consideram, principalmente, dois tipos de variáveis: individuais (vestimenta e nível de isolamento do vestuário) e ambientais (temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do ar e temperatura radiante média) (SZOKOLAY, 2008). A temperatura radiante média (T_{rm}) é a variável mais complexa para se obter (WALIKIEWITZ *et al.*, 2015). É definida como “a temperatura uniforme de um invólucro imaginário no qual a transferência de calor radiante do corpo humano é igual à transferência de calor radiante no invólucro não uniforme real” (ISO, 1998).

Dentre os procedimentos para o cálculo da temperatura radiante média destacam-se dois métodos indiretos: obtenção a partir do fator de forma e das temperaturas superficiais (T_s); e obtenção a partir do termômetro de globo (ISO, 1998). O método utilizando termômetro de globo é o mais usado (RUIZ *et al.*, 2017). Trata-se do procedimento relativamente simples e de menor custo em relação aos demais métodos recomendados pela ISO 7726 (ISO, 1998). Segundo a ISO 7726, o termômetro de globo consiste em um globo negro em cujo centro é colocado um sensor de temperatura. O globo pode ter diâmetros variados, pois as fórmulas usadas

no cálculo da T_{rm} incluem a variável diâmetro, possibilitando o ajuste. Quanto menor o diâmetro, menor a precisão, devido à maior influência dos efeitos da temperatura do ar e da velocidade do ar (ISO, 1998). No entanto, diversos autores advogam o uso de termômetros com globos de pequenos diâmetros (como uma bola de tênis de mesa de 38 mm, por exemplo), citando como principal vantagem o curto tempo de resposta. É importante observar que boa parte dos estudos compararam dados de diferentes termômetros de globo e não diferentes procedimentos para o cálculo da T_{rm} (HUMPHREYS, 1977; DE DEAR, 1987; BECEGATO *et al.*, 2007; HIRASHIMA; ASSIS, 2011; RUIZ *et al.*, 2017).

Romana *et al.* (2013), tendo por base os procedimentos propostos pela ISO 7726 (1998), em uma sala-teste especial, com velocidade máxima do ar interno de 0,1 m/s, comparam quatro métodos para obtenção da T_{rm} : I) método indireto, baseado no cálculo dos fatores de forma e na medição das temperaturas superficiais do ambiente por meio de termopares; II) método indireto, baseado no cálculo dos fatores de forma e na medição das temperaturas superficiais por meio de um termômetro infravermelho e uma câmera térmica; III) método direto, usando dois globos com diferentes emissividades; IV) método indireto, baseado na medição das temperaturas radiantes planas. Não foi avaliado o método utilizando termômetro de globo. Os resultados apontaram: a) que as T_{rm} obtidas são aproximações, mesmo se atendidos os requisitos de precisão especificados pela ISO 7726; b) que os métodos I e II (indiretos e baseados em fatores de forma) foram os mais precisos; c) que há necessidade de discutir em profundidade os protocolos de medição e mesmo os resultados de avaliações levadas a cabo utilizando o método de Fanger (PMV), devido ao impacto de imprecisões.

Não se pode admitir insegurança em relação aos dados fornecidos por termômetros de globo, pois são largamente utilizados. Além das áreas de percepção térmica e desempenho térmico de edificações, para as quais existe um projeto de norma que prevê a utilização de termômetros de globo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016), cita-se a área de segurança do trabalho, que adota o Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo (IBUTG) (BRASIL, 1978).

Em resumo, pesquisas em ambientes internos e com baixa velocidade do ar indicam que, para um mesmo ambiente, as temperaturas obtidas com globos de diferentes diâmetros resultam semelhantes e, por consequência, em T_{rm} também semelhantes. Resta saber se as T_{rm} obtidas a partir de termômetros de globo são compatíveis com as obtidas por outros métodos, considerados mais seguros, como o método utilizando o fator de forma.

2 Objetivo

O objetivo deste estudo foi verificar a confiabilidade da T_{rm} obtida considerando dados de termômetro de globo que utilize bola de tênis de mesa.

3 Método

Os dados aqui analisados foram obtidos de experimentos sobre percepção e desempenho térmico realizados em duas salas de uma edificação-teste: uma sala equipada com teto-reservatório (Sala TR) acoplado a painéis radiantes; e a outra, com uma unidade evaporadora de ar-condicionado (Sala AC).

Resultados de dois métodos para o cálculo da T_{rm} foram analisados: método A, utilizando termômetro de globo (40 mm); e método B, utilizando fator de forma e temperaturas superficiais.

Dadas as características dos experimentos originais, quatro diferentes contextos ambientais foram analisados:

- a. Sem resfriamento e sem ventilação forçada;
- b. Com resfriamento passivo e sem ventilação forçada;
- c. Com resfriamento passivo e com ventilação forçada;
- d. Com resfriamento mecânico e com ventilação forçada.

Para cada contexto ambiental, tomaram-se dados de um dia completo para análise. Primeiramente, verificou-se se alterações no contexto térmico (acionamento do resfriamento passivo ou mecânico e da ventilação forçada) geravam impactos sobre as temperaturas superficiais (T_s) e sobre a T_{rm} fator de forma. Posteriormente, comparou-se a T_{rm} fator de forma com as variáveis $T_{in\ ar}$, T_g e $T_{rm\ globo}$.

3.1 Salas utilizadas no estudo

Os dados deste estudo foram obtidos de experimento realizado no Campus Sde Boqer, da Ben-Gurion University of the Negev (BGU), em Midreshet Ben Gurion, Israel (Latitude 30,8 ° N, Longitude 34,8 ° L e 478 m de altitude). O clima local apresenta grandes amplitudes térmicas diárias e anuais. No verão, a média das temperaturas máximas diárias é 32 °C e a média das temperaturas mínimas diárias é 17 °C. A médias da radiação solar horizontal global é 7,7 kWh/m² por dia durante junho e julho (BITAN; RUBIN, 1991).

As salas utilizadas fazem parte de uma edificação-teste (Figura 1) construída em 1991 (ERELL *et al.*, 1993; ERELL; ETZION, 1999). A edificação possui três salas semelhantes, pintadas de branco e medindo 2,70 m de largura por 3,50 m de comprimento e 3,05 m de altura. Todas possuem aberturas para o lado sul (Figura 2),

com 1,34 m de largura, constituídas de três partes: uma seção central de correr (1,14 m de altura), uma seção inferior com vidros fixos (0,42 m de altura) e uma seção superior, também fixa (0,62 m de altura). A profundidade do peitoril é de 0,25 m. Durante o experimento, as duas partes superiores foram bloqueadas por persianas externas e o vidro da parte inferior ficou exposto ao ambiente externo.



Figura 1. Fachada sul da edificação-teste.

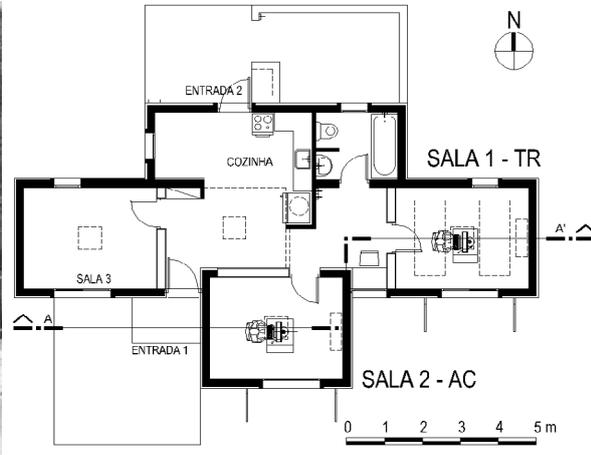


Figura 2. Planta baixa da edificação-teste.

A sala na extremidade leste da edificação (sala TR) recebeu o teto-reservatório em sua cobertura (Figura 2), enquanto a sala no centro (sala AC) foi equipada com um aparelho de ar-condicionado do tipo *split*, de parede. Na sala TR, a unidade *split* funcionava apenas com ventilador.

3.1.1 Contextos analisados

Contexto a: sem resfriamento e sem ventilação forçada.

Neste contexto, a cobertura da sala TR era caracterizada por uma laje de concreto com 10 cm de espessura, regularizada e impermeabilizada, revestida com 6 cm de EPS (Poliestireno Expandido Moldado) sob uma camada de 3 cm de brita. Acrescentaram-se à cobertura telhas de PVC branco (policloreto de vinil), com 2 mm de espessura, a 1,5 m acima da laje, provendo sombra e livre ventilação. Os dados analisados são do dia 4 de julho de 2017.

Contexto b: com resfriamento passivo e sem ventilação forçada.

Neste momento, a cobertura da sala TR havia recebido uma “piscina” de plástico branco, caracterizando o TR, preenchida com 755 litros de água, camada com 8,7 cm de profundidade e 8,64 m² de área exposta à evaporação. A água evaporada era repostada diariamente, pela manhã. Também foi instalada uma bomba d’água, forçando a circulação entre o reservatório e dois painéis radiantes de alumínio com serpentinas, colocados no interior do ambiente de testes, medindo 2,0 × 0,8 m cada (1,6 m²). A absorção do calor ambiente ocorria por convecção e por absorção da radiação de ondas longas. Os dados analisados são do dia 15 de julho de 2017.

Contexto c: com resfriamento passivo e com ventilação forçada.

Ainda na sala TR, sobre a água do teto-reservatório, foi disposta uma camada flutuante de EPS, constituída de placas medindo $50 \times 100 \times 6$ cm, cobrindo área de $8,0 \text{ m}^2$, restando $0,64 \text{ m}^2$ de água exposta à evaporação. Sobre o reservatório e abaixo das telhas, acrescentou-se um sistema de sprays, acionado no período noturno (das 17:45 até as 8:30 do dia seguinte). Os *sprays* borrifavam água, formando cones com abertura de aproximadamente 45° . Os dados avaliados são do dia 01 de agosto de 2017.

Neste contexto, por um curto período de tempo, das 13:30 às 15:10 (1:40 horas), foi acionado o modo ventilação do aparelho *split* de parede, mas sem acionar o modo resfriamento do ar.

Contexto d: com resfriamento mecânico e com ventilação forçada.

Ocorreu na sala AC, que mantinha a configuração original da cobertura, com laje de concreto com 10 cm de espessura, regularizada e impermeabilizada, revestida com 6 cm de EPS coberto por camada de 3 cm de brita. Não possuía telhas para sombreamento e nem TR. Os dados avaliados são do dia 21 de agosto de 2017.

3.2 Monitoramento

O monitoramento de dados foi iniciado em 16/06/2017 e concluído em 14/09/2017.

Os dados relativos às condições externas foram obtidos da estação meteorológica do campus (instalada 800 m ao norte da edificação-teste). Foram utilizadas apenas as temperaturas externas do ar ($T_{\text{ex ar}}$).

Na edificação-teste, a instalação dos equipamentos e sensores (Figura 3 e Figura 4) seguiu orientações da norma ISO 7726 (1998). Os dados foram registrados em uma central *data logger* (Campbell Scientific Datalogger CR23X), dotada de tela de cristal líquido (LCD) para checagem de valores, à qual foi conectada uma interface (Campbell Scientific Multiplexer AM-32) para ampliar o número de entradas. Da sala TR, foram conectados à interface 18 sensores de temperatura (termopares Tipo T, com incerteza de $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$). Destes, 15 foram instalados no ambiente dotado de teto-reservatório: 4 medindo temperatura do ar (T_a) em diferentes alturas (0,1 m, tornozelo; 0,6 m, abdômen; 1,1 m, cabeça; e 2,8 m, próximo ao teto), 1 medindo a temperatura de globo (T_g) a 0,6 m de altura e 10 medindo temperaturas superficiais (T_s) (6 para teto, piso e paredes, 2 para os painéis radiantes e 2 para os vidros da janela principal). Sobre a cobertura, foram instalados 3 sensores Tipo T: 2 para monitorar a temperatura da água e 1 para medir a T_a . Na sala AC, foram conectados à interface 10 sensores: 4 para T_a , 1 para T_g e 5 para T_s (teto, piso e 3 paredes). Cada sala também recebeu um sensor de temperatura (T_a) e umidade relativa (UR) (modelo Vaisala HMP-60 Temperature/Relative Humidity, com incerteza de $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C} / \pm 3\% \text{ UR}$) instalado a 0,6 m de altura. As leituras ocorreram a cada 30 segundos e foram gravadas as médias para cada 10 minutos. A V_a foi medida com anemômetro portátil de fio quente (Kurz Portable

Air Velocity Meter Series-441, com incerteza de $\pm 0,05$ m/s). Essa medição aconteceu somente no início dos experimentos, pois os aparelhos de ar-condicionado foram preparados para trabalhar sempre com a mesma velocidade.

Para construção do termômetro de globo, utilizou-se uma bola de tênis de mesa, branca, fosca, com aproximadamente 3 g, posteriormente pintada de preto fosco. No interior desta, foi introduzido um sensor de temperatura (termopar Tipo T, com incerteza de $\pm 0,2$ °C). O orifício no qual foi introduzido o termopar foi vedado com uma gota de silicone. A opção pela bola de tênis de mesa levou em consideração recomendações e estudos de diversos autores (DE DEAR, 1987; DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997; AULICIEMS; SZOKOLAY, 2007; SZOKOLAY, 2008; LI *et al.*, 2015; RUIZ *et al.*, 2017).

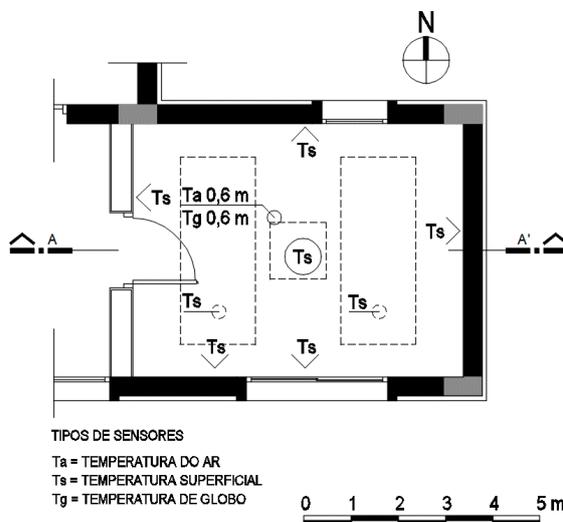


Figura 3. Planta baixa com as posições dos sensores.

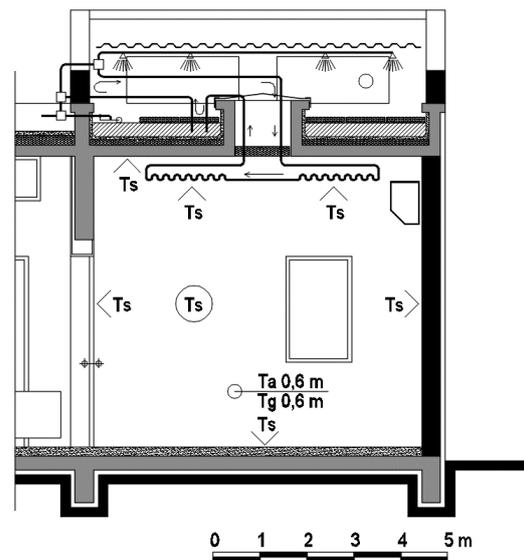


Figura 4. Corte com as posições dos sensores.

3.3 Procedimentos para cálculo da Temperatura Radiante Média (T_{rm})

A T_{rm} pode ser obtida por diferentes métodos, conforme procedimentos indicados pela norma ISO 7726 (1998). Os procedimentos são apresentados a seguir.

3.3.1 Obtenção da T_{rm} utilizando Termômetro de globo (A)

Neste método, cuja grandeza calculada foi denominada $T_{rm\ globo}$, consideraram-se a T_g , a T_a e a v_a .

Quando o ambiente apresenta ventilação natural, a $T_{rm\ globo}$ é obtida a partir da Equação 1.

$$T_{rm\ Globo} = \left[(T_g + 273.15)^4 + \frac{0.25 \times 10^8}{\epsilon_g} \times \left(\frac{|T_g - T_a|}{D} \right)^{1/4} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273.15 \quad \text{Equação 1}$$

Quando o ambiente apresenta ventilação forçada, a $T_{rm\ globo}$ é obtida a partir da Equação 2.

$$T_{rm\ Globo} = \left[(T_g + 273.15)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 v_a^{0.6}}{\varepsilon D^{0.4}} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273.15 \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

T_{rm_globo} = é a temperatura radiante média [°C];

T_{globo} = a temperatura de globo [°C];

v_{ar} = a velocidade do ar [m/s];

T_{ar} = a temperatura do ar [°C];

D = o diâmetro do globo [m];

ε_g = a emissividade do globo.

3.3.2 Obtenção da T_{rm} utilizando o fator de forma (ou fator de visão) e temperaturas superficiais (B)

Neste método, cuja grandeza foi aqui denominada $T_{rm\ \text{Fator de Forma}}$, considerou as temperaturas superficiais (T_s) e o fator de forma (F). O cálculo a partir do F leva em conta um ponto de interesse na sala (posição dos sensores) e dá mais importância para a temperatura das superfícies que apresentarem os maiores ângulos sólidos em relação ao ponto escolhido (ROMANA *et al.*, 2013). O ângulo sólido (Ω) é um conceito geométrico que dá uma ideia quantitativa da abertura com a qual uma superfície (ou objeto) determinada é vista a partir de um ponto. Corresponde à área da projeção da superfície ou objeto sobre uma esfera cujo centro é o ponto de interesse e mede o tamanho aparente do objeto visto a partir deste ponto (SOLDOVIERI; VILORIA, 2016). Dado um ponto de interesse em uma sala de planta retangular, a soma dos ângulos sólidos das superfícies que a delimitam será igual à área de uma esfera dada em esferorradianos (4π ou 12,566). Tomando-se o ponto de interesse como o vértice e uma superfície (parede, por exemplo) como a base de uma pirâmide, pode-se estimar o ângulo sólido dado por essa superfície com a Equação 3 (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ; COSTACHE, 2012):

$$\Omega = 4 \tan^{-1} \left(\frac{ab}{2d(4d^2 + a^2 + b^2)^{0.5}} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

Ω_i = é o ângulo sólido dado pela superfície em relação ao ponto de interesse;

a = o comprimento da base da pirâmide (comprimento da parede) [m];

b = a largura da base da pirâmide (altura da parede) [m];

d = a distância entre o centro da base e o topo da pirâmide [m].

O fator de forma (F) (Equação 4) corresponde ao ângulo sólido relativo em torno de um ponto (RORIZ, 2008).

$$F_i = \frac{\Omega_i}{4\pi} \text{ Equação 4}$$

Fonte: Fernández-González e Costache (2012, p. 6).

De acordo com a ISO 7726 (1998), a T_{rm} pode ser estimada por este método tendo em conta as temperaturas das superfícies internas e seus respectivos F utilizando a Equação 5:

$$T_{rm \text{ Fator de forma}} = \sum (F_i T_s) \text{ Equação 5}$$

Fonte: Fernández-González e Costache (2012, p. 6).

Na qual T_s é a temperatura de uma superfície e F_i seu fator de forma a partir de um ponto de interesse.

4 Resultados

Os resultados mostraram que, mesmo em ambientes fechados, as temperaturas internas (superficiais e do ar) oscilam em função das relações de cada elemento de vedação com os ambientes externo e interno, dinamicamente. Como resultado, a temperatura interna do ar ($T_{in a}$) e a temperatura radiante média (T_{rm}) são produtos dinâmicos, sensíveis e que variam de um ponto para o outro do ambiente. Como exemplo, apresenta-se o ambiente interno passivo, sem resfriamento e sem ventilação forçada (Figura 5). Mesmo para esse ambiente não ventilado, as expressivas diferenças entre as temperaturas superficiais e entre estas e a temperatura do ar fortalecem a ideia de Walikewitz *et al.* (2015) de que obter a T_{rm} é uma tarefa complexa.

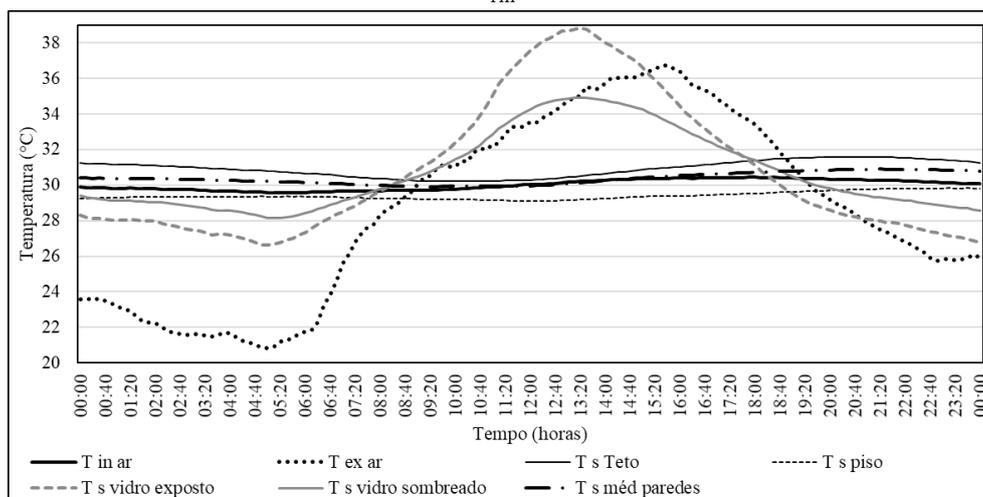


Figura 5. Temperaturas internas (superficiais e do ar) no contexto 'a', ambiente interno passivo, sem resfriamento e sem ventilação forçada.

4.1 Sem resfriamento e sem ventilação forçada (a)

Neste caso, as temperaturas superficiais médias das paredes, do teto e do piso, permaneceram próximas, destoando das temperaturas superficiais dos vidros da janela (Figura 6).

Se observadas apenas a T_{globo} , a $T_{\text{rm fator de forma}}$, a $T_{\text{rm globo}}$ e a $T_{\text{in ar}}$ (Figura 7), observa-se que as três primeiras apresentaram valores próximos aos valores da última ($T_{\text{in ar}}$). No entanto, a $T_{\text{rm globo}}$ concordou mais com a $T_{\text{in ar}}$ do que com a $T_{\text{rm fator de forma}}$, especialmente no período noturno. As diferenças máximas entre a $T_{\text{rm fator de forma}}$ e a $T_{\text{rm globo}}$ são pouco expressivas, da ordem de 0,2 °C. Apenas um pouco maiores que as diferenças máximas entre a $T_{\text{rm fator de forma}}$ e a $T_{\text{in ar}}$. No entanto, neste caso, são suficientes para indicar que há uma dependência maior da $T_{\text{rm globo}}$ em relação à $T_{\text{in ar}}$ que em relação à $T_{\text{rm fator de forma}}$.

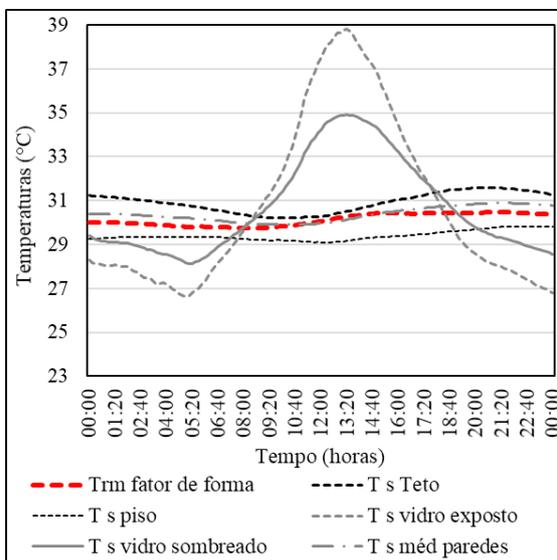


Figura 6. Temperaturas superficiais e $T_{\text{rm fator de forma}}$ para o ambiente ‘sem resfriamento e sem ventilação forçada’.

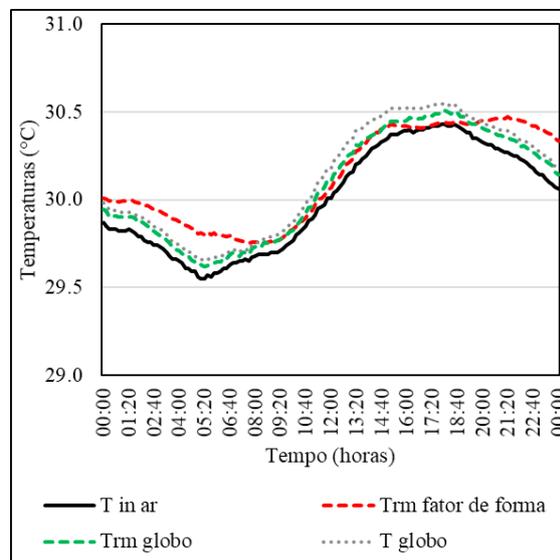


Figura 7. $T_{\text{in ar}}$, T_{globo} , $T_{\text{rm fator de forma}}$ e $T_{\text{rm globo}}$ para o ambiente ‘sem resfriamento e sem ventilação forçada’.

4.2 Com resfriamento passivo e sem ventilação forçada (b)

No ambiente com resfriamento passivo e sem ventilação forçada (Figura 8), o resfriamento passivo alterou a dinâmica das temperaturas superficiais. As temperaturas superficiais do teto e dos painéis radiantes passaram a ser mais baixas que as do piso. Ou seja, verticalmente, houve inversão nas temperaturas superficiais. Outro efeito foi a redução da $T_{\text{in ar}}$ e da $T_{\text{rm fator de forma}}$, que passaram a se posicionar em patamares inferiores àqueles do contexto anterior.

As relações entre a $T_{\text{rm globo}}$, $T_{\text{rm fator de forma}}$, T_{globo} e $T_{\text{in ar}}$ (Figura 9) permaneceram similares às verificadas anteriormente, indicando maior similaridade entre $T_{\text{rm globo}}$ e

$T_{in\ ar}$ do que entre $T_{rm\ globo}$ e $T_{rm\ fator\ de\ forma}$. Ou seja, novamente, a $T_{rm\ globo}$ calculada não representava de maneira precisa os valores esperados para a T_{rm} .

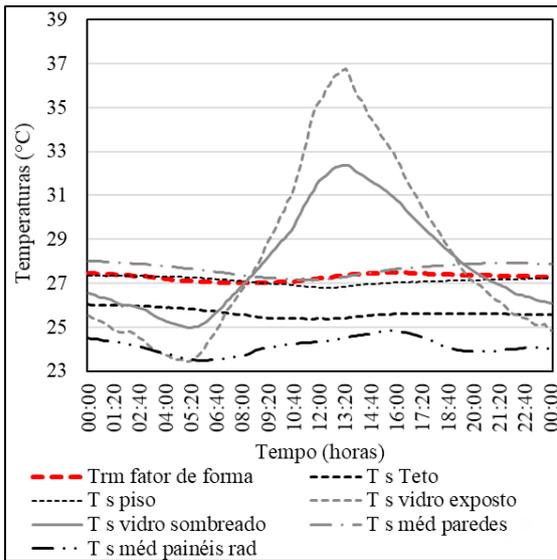


Figura 8. Temperaturas superficiais e $T_{rm\ fator\ de\ forma}$ para o ambiente ‘com resfriamento passivo e sem ventilação forçada’.

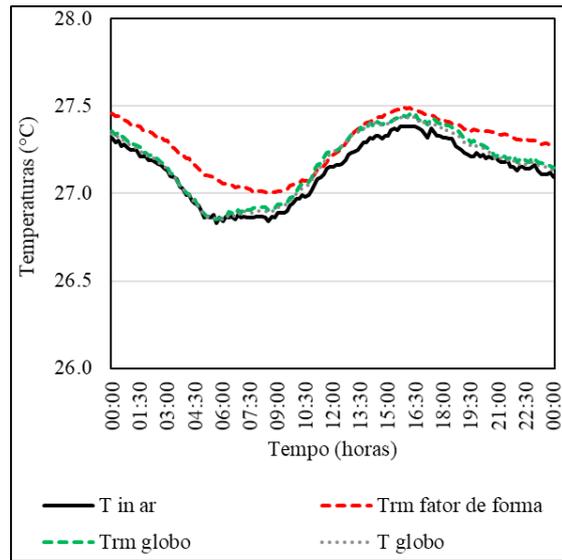


Figura 9. $T_{in\ ar}$, $T_{rm\ globo}$, $T_{rm\ fator\ de\ forma}$ e $T_{rm\ globo}$ para o ambiente ‘sem resfriamento e sem ventilação forçada’.

4.3 Com resfriamento passivo e com ventilação forçada (c)

No dia 01 de agosto, o ambiente estava dotado de resfriamento passivo e a ventilação forçada foi acionada das 13:30 às 15:10 (1:40 horas). A movimentação forçada intensificou as trocas térmicas entre a massa de ar e as superfícies do ambiente. Essa intensificação das trocas resultou em pouco efeito sobre as temperaturas superficiais e, por consequência, em pouco efeito sobre a $T_{rm\ fator\ de\ forma}$ (Figura 10), calculada a partir das T_s . No entanto, o acionamento da ventilação gerou alteração expressiva na $T_{in\ ar}$, na T_{globo} e na $T_{rm\ globo}$, que oscilaram para cima aproximadamente 0,5 °C (Figura 11). Por outro lado, poucos minutos após a ventilação forçada ser desativada, houve nova oscilação nos valores das referidas temperaturas, desta vez para baixo, adequando-se ao novo contexto. Se nos contextos ‘a’ e ‘b’ era possível falar em ‘alguma’ relação das variáveis T_{globo} e $T_{rm\ globo}$ com a $T_{in\ ar}$, no contexto ‘c’ ficou claro que se tratava de uma relação forte.

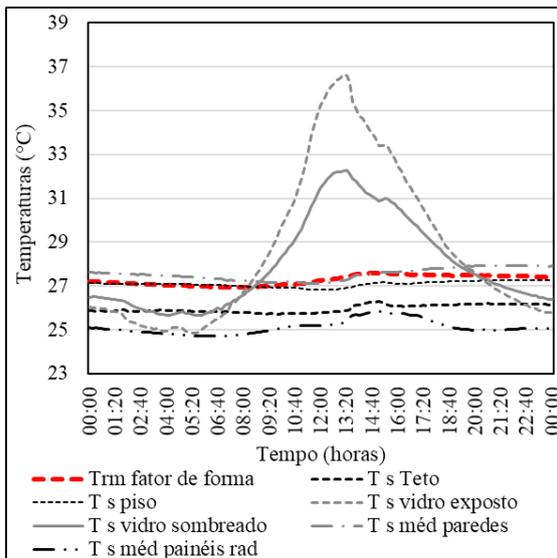


Figura 10. Temperaturas superficiais e $T_{rm \text{ fator de forma}}$ para o ambiente 'com resfriamento passivo e com ventilação forçada (entre 13:30 e 15:10)'.

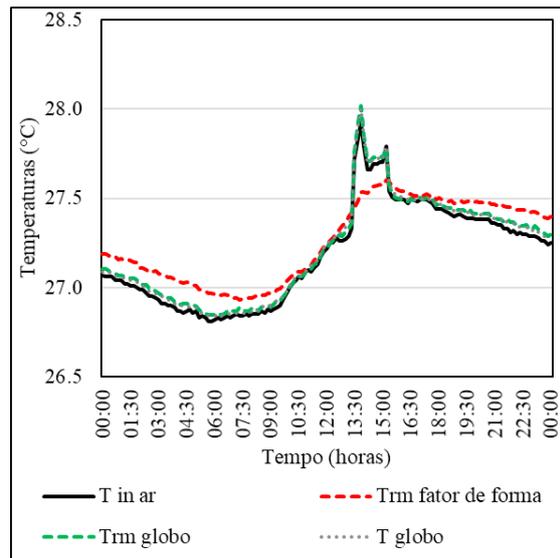


Figura 11. $T_{in \text{ ar}}$, T_{globo} , $T_{rm \text{ fator de forma}}$ e $T_{rm \text{ globo}}$ para o ambiente 'sem resfriamento e com ventilação forçada (entre 13:30 e 15:15)'.

4.4 Com resfriamento mecânico e com ventilação forçada (d)

Como última situação, analisaram-se as temperaturas quando eram acionados o resfriamento mecânico e a ventilação forçada. Observaram-se alterações nas temperaturas superficiais monitoradas (nesta configuração as placas para resfriamento radiante não estavam instaladas) e na $T_{rm \text{ fator de forma}}$ (Figura 12). No entanto, os efeitos foram muito maiores sobre a $T_{in \text{ ar}}$, a T_{globo} e sobre a $T_{rm \text{ globo}}$ (Figura 13). Ficou evidenciado que, para o contexto e equipamentos testados, o termômetro de globo não é equipamento adequado para a obtenção de dados para a estimativa da temperatura radiante média em ambientes condicionados mecanicamente.

Para um panorama geral, a Tabela 1 apresenta as diferenças médias e máximas entre $T_{rm \text{ globo}}$ e $T_{rm \text{ fator de forma}}$ e as diferenças médias e máximas entre $T_{rm \text{ globo}}$ e $T_{in \text{ ar}}$ para cada contexto ambiental. Concordando com a análise dos gráficos, a $T_{rm \text{ globo}}$ manteve-se mais próxima da $T_{in \text{ ar}}$ do que da $T_{rm \text{ fator de forma}}$.

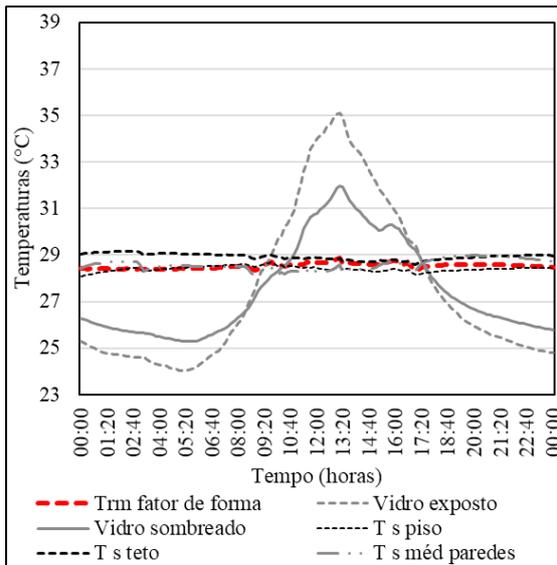


Figura 12. Temperaturas superficiais e $T_{rm \text{ fator de forma}}$ para o ambiente 'com resfriamento mecânico e com ventilação forçada'.

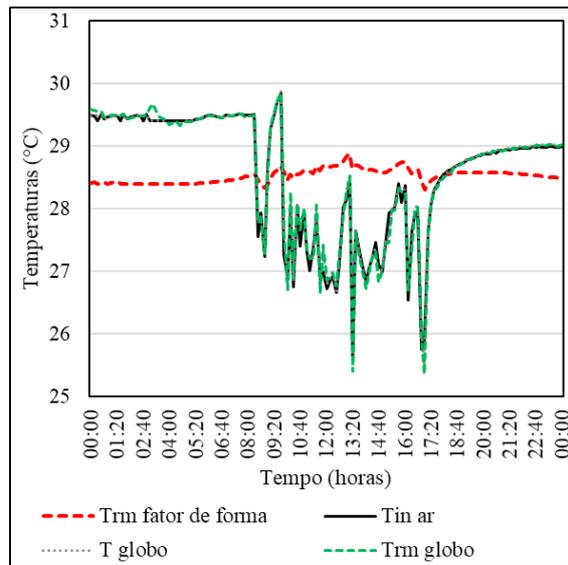


Figura 13. $T_{in \text{ ar}}$, T_{globo} , $T_{rm \text{ fator de forma}}$ e $T_{rm \text{ globo}}$ para o ambiente 'com resfriamento mecânico e com ventilação forçada'.

Tabela 1 – Diferenças médias e máximas entre $T_{rm \text{ globo}}$ e $T_{rm \text{ fator de forma}}$ para cada contexto ambiental

Contexto ambiental	Diferença média entre $T_{rm \text{ globo}}$ e $T_{rm \text{ fator de forma}}$ (°C)	Diferença máxima entre $T_{rm \text{ globo}}$ e $T_{rm \text{ fator de forma}}$ (°C)	Diferença média entre $T_{rm \text{ globo}}$ e $T_{in \text{ ar}}$ (°C)	Diferença máxima entre $T_{rm \text{ globo}}$ e $T_{in \text{ ar}}$ (°C)
(a) Sem resfriamento e sem ventilação forçada	0,08	0,19	0,07	0,12
(b) Com resfriamento passivo e sem ventilação forçada	0,09	0,24	0,05	0,11
(c) Com resfriamento passivo e com ventilação forçada	0,08	0,49	0,03	0,10
(d) Com resfriamento mecânico e com ventilação forçada	0,90	3,23	0,07	0,50

5 Conclusões

Este estudo teve por objetivo verificar a confiabilidade da T_{rm} obtida considerando dados de termômetro de globo que utilize bola de tênis de mesa. Compararam-se as temperaturas radiantes médias obtidas pelo método A, utilizando termômetro de globo, com as obtidas pelo método B, utilizando fator de forma e temperaturas superficiais, em quatro contextos: a) Sem resfriamento e sem ventilação forçada; b) Com resfriamento passivo e sem ventilação forçada; c) Com resfriamento passivo e com ventilação forçada; e d) Com resfriamento mecânico e com ventilação forçada.

Os ambientes térmicos analisados apresentaram situações em que ocorreram diferenças significativas entre as temperaturas do ar e das superfícies. Entre as temperaturas superficiais também foram observadas diferenças ao longo das horas dos dias. Esse quadro, conforme já apontado pela literatura, torna a temperatura radiante média uma variável difícil de ser obtida.

Nos contextos 'a' e 'b', observou-se que a $T_{rm\ globo}$ tendeu a acompanhar as variações da $T_{in\ ar}$. Mesmo assim, a $T_{rm\ globo}$ apresentou valores próximos aos da $T_{rm\ fator\ de\ forma}$, pois não havia grandes diferenças entre os valores desta variável e os da $T_{in\ ar}$. Sendo assim, poderiam ser utilizados como valores para a temperatura radiante média tanto os obtidos via termômetro de globo, quanto os obtidos via fator de forma e temperaturas superficiais. Poderiam até serem tomados os valores da temperatura do ar como equivalentes aos da temperatura radiante média.

No entanto, no caso 'c', com resfriamento passivo, quando acionada a ventilação forçada, as diferenças entre a $T_{rm\ globo}$ e a $T_{rm\ fator\ de\ forma}$ foram da ordem de 0,5 °C. Essa diferença fragilizou o uso do termômetro de globo nos momentos em que ocorreram alterações na vazão de ar.

Em se tratando do caso 'd', quando acionado o resfriamento mecânico com ventilação forçada, as diferenças entre a $T_{rm\ globo}$ e a $T_{rm\ fator\ de\ forma}$ foram ainda maiores que no caso anterior.

Em se tratando dos experimentos aqui descritos, as diferenças observadas nos casos 'c' e 'd' geraram incerteza sobre a confiabilidade do instrumento termômetro de globo com bola de tênis de mesa nas situações em que ocorreram variações na velocidade do ar, especialmente em se tratando da Sala AC, climatizada mecanicamente.

Essa conclusão não pode ser generalizada para contextos de outros experimentos e pesquisas. No entanto, no entender dos autores, justifica estudos futuros quanto à adequação do uso do instrumento termômetro de globo com bola de tênis de mesa em experimentos sobre percepção e desempenho térmico em ambientes sujeitos a variações na velocidade do ar.

Agradecimentos

Agradecimentos: ao Swiss Institute for Dryland Environmental & Energy Research (SIDEER), pela seção dos dados relativos ao ambiente externo; ao Bona Terra Department of Man in the Desert, da Ben-Gurion University of the Negev (BGU), pelo empréstimo dos equipamentos e da edificação-teste; ao professor Evyatar Erell e ao técnico Wolfgang Mutsafi-Haller, pela colaboração prestada; e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

ABNT/CB-055 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS / COMITÊ DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO - CB-55. 3º Projeto Revisão ABNT NBR 16401-2. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. *ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. USA, Atlanta, 2013.

AULICIEMS, A.; SZOKOLAY, S. V. *PLEA Note 3: Thermal Comfort*. Passive and Low Energy Architecture International, 2007.

BECEGATO, V. A. *et al.* Avaliação de termômetros de globo negro alternativos. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA 2007, Aracaju. *Anais...* Aracaju, 2007.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. *NR 15 - Atividades e operações insalubres*. Portaria n.º 3.214, de 08 de junho de 1978 - anexo 3. Brasília, 1978.

DE DEAR, R. Ping-pong globe thermometers for mean radiant temperatures. *Heating and Ventilating Engineer*, v. 60, n. 81, p. 10-11, 1987.

DE DEAR, R.; BRAGER, GS; COOPER, Donna. *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference - Final Report on RP-884*. Sydney: 1997.

ERELL, Evyatar *et al.* *A Passive Cooling Laboratory Building for Hot-Arid Zones*. Midreshet Ben Gurion: 1993.

ERELL, Evyatar; ETZION, Y. Analysis and experimental verification of an improved cooling radiator. *Renewable Energy*, v. 16, p. 700-703, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - CEN. *EN 15251 - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. Brussels: CEN, 2007.

FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, A.; COSTACHE, Florin Iulian. Cooling Performance of a Wet Roofpond System in Las Vegas, Nevada. In: WORLD RENEWABLE ENERGY FORUM (WREF), 2012, Denver. *Proceedings...* Denver: C. Fellows, 2012.

HIRASHIMA, S. Q. da S.; ASSIS, E. S. De. Confecção e aferição de termômetro de globo e abrigo ambientes externos. In: XI ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2011, Buzius. *Anais...* Buzius: ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2011.

HUMPHREYS, M. A. The Optimum Diameter for a Globe Thermometer for Use Indoors. *Building*, v. 20, p. 135-140, 1977.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 7730 - Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria* Switzerland, 2005. Seção Third edition 2005-11-15, p. 45.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 7726, Ergonomics of the Thermal Environment, Instruments for Measuring Physical Quantities*. Geneva: International Standard Organization, v. 1998, n. Second edition 1998-11-01, p. 51, 1998.

LI, Rongling *et al.* Field evaluation of performance of radiant heating/cooling ceiling panel system. *Energy and Buildings*, v. 86, p. 58-65, 2015.

ROMANA, F. *et al.* On the measurement of the mean radiant temperature and its influence on the indoor thermal environment assessment. *Building and Environment*, v. 63, p. 79-88, 2013.

RORIZ, M. *Apostila da Disciplina Conforto e Desempenho Térmico de Edificações*. São Carlos.

RUIZ, Á. *et al.* The globe thermometer in comfort and environmental studies in buildings. *Revista de la construcción*, v. 15, n. 3, p. 57-66, 2017.

SOLDOVIERI, Terenzio; VILORIA, Tony. *El Angulo Sólido y algunas de sus aplicaciones*. 1a ed. Maracaibo: 2016.

SZOKOLAY, Steven.V. *Introduction to architectural science: the basis of sustainable design*. 2 ed.: Elsevier Ltd., 2008.

WALIKIEWITZ, N. *et al.* 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, 2015.