Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais
Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

RESULTADOS PRELIMINARES DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO RADIANTE CAPACITIVO[1]

GONZALEZ CRUZ, Eduardo Manuel (1); KRÜGER, Eduardo (1); FERNANDES, Leandro (2); TRENTO, Daniel (1)

(1) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, eduardocruz@utfpr.edu.br; ekruger@utfpr.edu.br; trento.daniel@gmail.com
(2) Universidade Federal do Paraná, fernandes.ufpr@gmail.com

RESUMO

O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho térmico de um sistema de aquecimento e resfriamento passivo com baixo consumo de energia, composto por um módulo de aquecimento e resfriamento radiante capacitivo, o qual é alimentado por um coletor solar/radiador noturno. São apresentados os resultados preliminares de uma avaliação experimental do sistema, realizado com células-teste em Curitiba, PR. São analisadas as temperaturas características, o potencial de resfriamento médio do sistema e sua capacidade de reduzir a demanda por resfriamento no verão. O potencial de resfriamento radiante noturno da localidade é representado pela depressão da temperatura do céu (ou seja, a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura do céu). A capacidade de resfriamento do sistema foi confirmada, atingindo-se valores médios de até 220 Wh/m².dia. O sistema foi capaz de reduzir o sobreaquecimento em até 97% do tempo, com um consumo de energia muito baixo.

Palavras-chave: *sistema radiante-capacitivo, resfriamento radiante noturno, sistema de baixa energia, estudo experimental.*

ABSTRACT

The aim of this study is to assess the thermal performance of a passive heating and cooling system, composed of a radiant-capacitive heating and cooling module powered by a sky radiator/solar collector. The preliminary experimental results of the system, carried out with small test-cells in Curitiba, PR, are presented. We analyze characteristic temperatures, mean cooling potential and the system's ability to offset the need for cooling in summer. The local potential for night-time radiant cooling is evaluated in terms of the sky temperature depression (difference between ambient and sky temperature). The mean cooling potential of the system was confirmed, reaching average values of up to 220 Wh/m².day. The system reduced overheating by up to 97% with very low energy consumption.

Keywords*: radiant-capacitive system, night-time radiant cooling, low-energy system, experimental study.*

---

[1] GONZALEZ CRUZ, Eduardo Manuel (1); KRUGER, Eduardo (1); FERNANDES, Leandro (2); TRENTO, Daniel (1). Resultados preliminares do desempenho térmico de um sistema de resfriamento radiante capacitivo. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18, 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global traz consigo uma necessidade de aplicar medidas que limitem as emissões de carbono à atmosfera. Aliado a isso, a demanda energética crescente em áreas urbanas requer o desenvolvimento de construções que combinem estratégias bioclimáticas com aplicação de técnicas passivas de aquecimento e resfriamento. Uma forma de resfriamento passivo baseia-se na dissipação de calor para poços térmicos naturais (por exemplo, a abóbada celeste desobstruída) - usando o resfriamento noturno por radiação de onda longa. O resfriamento radiante noturno e sua aplicação no condicionamento térmico de edifícios têm sido extensivamente investigados nos últimos 50 anos, tanto nos aspectos físicos envolvidos quanto à sua aplicabilidade em condições climáticas diversas (HAY E YELLOTT, 1969; MARTIN E BERDAHL, 1984; GIVONI, 1994; SANTAMOURIS E ASIMAKOPOULOS, 1996; ERELL E ETZION, 2000; ERELL, 2007). Na última década, deram-se importantes avanços no desenvolvimento de materiais para aproveitar o resfriamento radiante, mesmo durante o dia (RAMAN et al., 2014; ZHAO D. et al., 2019; ZHAO B. et al., 2019).

O resfriamento radiante é baseado no princípio físico segundo o qual dois corpos a temperaturas diferentes trocam calor por radiação até atingir equilíbrio térmico. Assim, se determinada superfície for constituída por um componente que possa dissipar facilmente o calor fornecido pelo ambiente interno, condições de conforto térmico poderão ser alcançadas (com temperaturas operativas dentro da faixa de conforto adaptativo, podendo estas ser obtidas pela média entre a temperatura radiante média e a temperatura do ar - velocidade do ar é inferior a 0,1 m/s).

O sistema passivo desenvolvido e avaliado no presente estudo envolve o resfriamento radiante de um fluido (água) durante o período noturno, o resfriamento radiante do espaço interior e o uso de massa térmica efetiva de forma a se obter maior eficiência energética e estabilidade térmica (massa térmica ativada) (LEHMANN, 2011). Assim, consegue-se obter conforto térmico com menor demanda de energia primária em ambientes providos de sistemas de condicionamento radiante comparativamente a sistemas que operam com condicionamento de ar convencional (KARMANN, 2017).

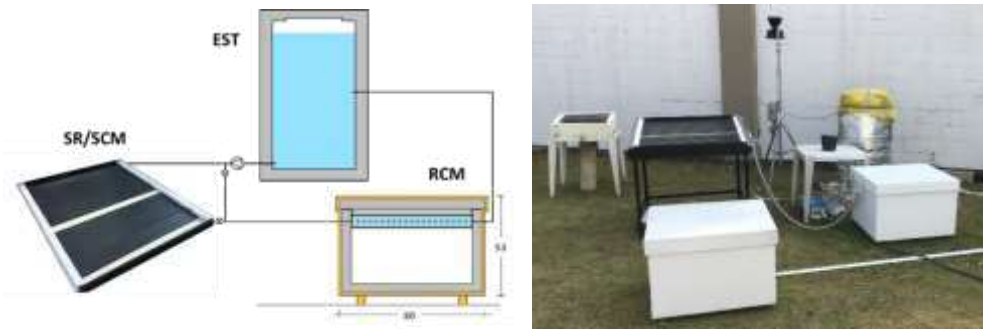
O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho térmico de um sistema de aquecimento e resfriamento passivo composto por um módulo de aquecimento e resfriamento radiante capacitivo interno, o qual é alimentado por um coletor solar/radiador noturno e um tanque de armazenamento de energia (Figura 1a). A partir de um estudo inicial em células-teste (Figura 1b), o sistema deverá ser aplicado futuramente a um ambiente-teste em escala real.

2 O SISTEMA RC-HCS

O conceito básico do sistema denominado *Radiant-Capacitive Heating and Cooling System* (RC-HCS), envolve o resfriamento radiante noturno utilizando-se de um corpo radiante voltado para a abóbada celeste, para resfriamento, que também serve como coletor solar, em sistema dual, para aquecimento (denominado *Sky Radiator/Solar Collector Module* –SR/SCM). No modo de resfriamento noturno, uma pequena bomba faz circular água pelo SR/SCM através de canaletas metálicas, passando por um módulo radiante-capacitivo (*Radiant Capacitive Module* –RCM), localizado no ambiente interno, e retornando para um tanque de água, usado para armazenamento de energia (*Energy Storage Tank* – EST), nesse caso, água resfriada (Figura 1a-b). A água resfriada no EST pode

também ser aproveitada durante o dia para resfriar o RCM, que, assim, atuará como um dissipador de calor para o ambiente interno.

Figura 1: (a) Esquema com os três componentes do RC-HCS, (b) arranjo experimental.



Fonte: Os autores

3 MÉTODO

O sistema foi avaliado experimentalmente usando duas células-teste (uma célula de controle –CC e uma célula experimental –CE), estando o local a 25°26'33,6"S e 49°21'14,14"W e a uma altitude aproximada de 953 metros acima do nível do mar. O clima local é predominantemente mesotérmico com verão fresco (Cfb), segundo a classificação de Köppen-Geiger.

CC e CE têm as mesmas características construtivas, diferindo apenas na configuração do "teto" de cada uma. CE (800 mm x 800 mm x 530 mm de altura), onde está localizado o RCM, é feita de compensado naval com 18 mm de espessura com uma camada de isolamento térmico de EPS com 50 mm na parte interna das paredes e do piso. Em CE, como elemento de teto, é utilizado o RCM, composto por um recipiente de metal de 670 mm x 670 mm x 65 mm, repleto de água, com um trocador de calor interno (serpentina de alumínio), o qual é isolado por uma camada de EPS de 85 mm e pela tampa de compensado na parte externa. CC é usada como condição de referência para calcular o potencial de resfriamento ou aquecimento do sistema e analisar suas temperaturas características. Diferente de CE, o teto de CC é feito de compensado naval com 18 mm de espessura com uma camada de EPS de 150 mm por debaixo.

O SR/SCM utiliza fontes naturais de energia, no caso, a radiação solar para aquecimento e o céu para resfriamento noturno, alimentando o RCM no teto de CE. O SR/SCM é composto por 10 perfis extrudados de alumínio medindo 895 mm × 95 mm × 8,3 mm, resultando em uma área de superfície de 0,85 m^2. Cada um dos perfis, interconectados para circulação da água, é pintado com acabamento preto fosco e possui três canais internos através dos quais se faz circular água durante a noite, com uma bomba de 32W de potência. Nesse período, a água é resfriada por uma combinação de perdas por radiação de onda longa para o céu e por convecção natural. O tanque de armazenamento de água (EST) é de polietileno com 560 mm de diâmetro e 1220 mm de altura, sendo forrado com uma dupla camada de lã de PET e contendo aproximadamente 240 litros de água.

Os resultados se referem a uma série experimental realizada entre 19/12/2019 e 20/01/2020. Durante esse período, o sistema trabalhou com circulação contínua de água durante a noite. O fluxo de água foi de 30 lts/h, a partir de programação realizada com um *timer* para o período entre 19h e 6h.

4 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RESFRIAMIENTO RADIANTE NOTURNO

A avaliação do potencial de resfriamento radiante noturno foi realizada de acordo com os métodos propostos por Martin e Berdahl (1984) e Artmann *et al*. (2007), com base em dados climáticos disponíveis na estação meteorológica mais próxima de Curitiba em arquivos EPW do banco de dados http://climate.onebuilding.org/.

O potencial de resfriamento radiante de um determinado local pode ser expresso em termos da depressão da temperatura do céu (DTsky)(°C), ou seja, a diferença entre a temperatura ambiente (Ta) e a temperatura do céu (Tsky) (BERDAHL E MARTIN, 1984). O valor horário de Tsky pode ser calculado em função da temperatura ambiente, temperatura de ponto de orvalho (Tdp), ambos em graus Celsius (°C), hora do dia no horário solar (t) e pressão atmosférica local (P, dada em mbar). Quanto maior o valor de DTsky, maior o potencial de resfriamento radiante em W/m^2. A temperatura efetiva do céu é obtida pela equação:

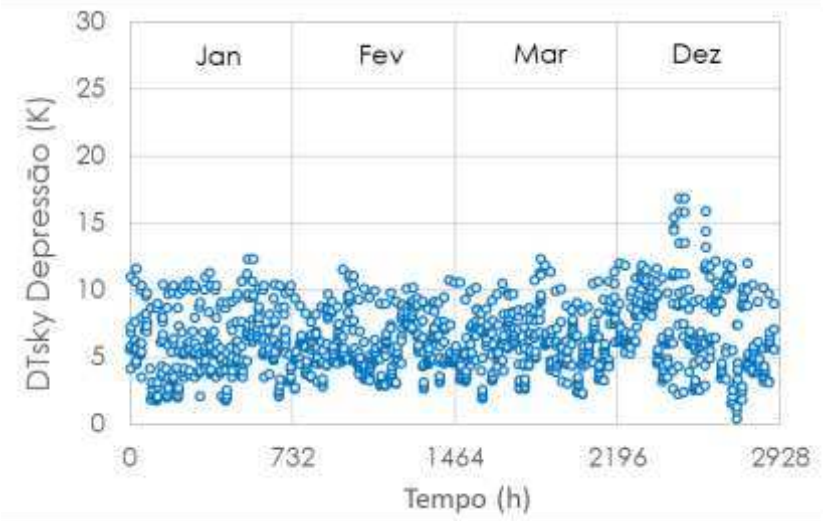
$$T_{sky} = Ta\,\{[0.711 + 0.56\left(\frac{T_{dp}}{100}\right) + 0.73\left(\frac{T_{dp}}{100}\right)^2 + 0.013\cos\left(2\pi\left(\frac{t}{24}\right)\right) + 0.00012\cos(P - 1000)\,]\,C\,\}^{0.25} \quad (1)$$

na qual C representa o fator de correção da emissividade do céu (ε_{sky}) que, de acordo com Clark (1981), pode ser calculado a partir da nebulosidade (n) em décimas a partir da equação seguinte:

$$C = 1 + 0.0224n - 0.0035n^2 + 0.00028n^3 \quad (2)$$

A partir do arquivo EPW disponível para Curitiba (conjunto de dados BRA_PR_Curitiba-Bacacheri.AP.838420_TMYx2.epw), a temperatura do céu foi calculada a cada hora, considerando os efeitos de altitude e nebulosidade. A partir desses valores, foi estimada a depressão da temperatura do céu noturno (DTsky) para os meses de verão em Curitiba (Figura 2).

Figura 2: DTsky para os meses de verão em Curitiba-Bacacheri.



Fonte: Os autores

Os valores horários de DTsky em Curitiba variaram entre 0 °C e 16,8 °C, com um valor médio de DTsky de 6,2 ° C. A soma do DTsky para o período é 249,6 Kh.

Um segundo indicador para avaliar o potencial de resfriamento radiante é a

depressão da temperatura de uma placa metálica exposta ao céu noturno (DTr), ou seja, a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura da placa metálica (Tr). Foi montado um dispositivo para medir a temperatura de superfície de uma placa metálica com 1 mm de espessura, pintada de preto fosco e exposta ao céu noturno. A superfície inferior desta placa recebeu isolamento térmico de EPS com 50 mm e a placa oi envolta lateralmente por perfis de EPS com 100 mm de altura x 50 mm de espessura, recobertos com *foil* de alumínio polido. O dispositivo foi inclinado 10% para o norte. Tais medições de Tr serviram continuamente como referência para se avaliar o potencial de resfriamento radiante.

A DTr média encontrada para os 32 dias da série experimental foi de 2,1 °C, chegando a valores de até 4.8 °C como média para determinada noite e, em valor absoluto, a um máximo de 12,5 °C, em determinada hora da noite, sob condições de céu claro.

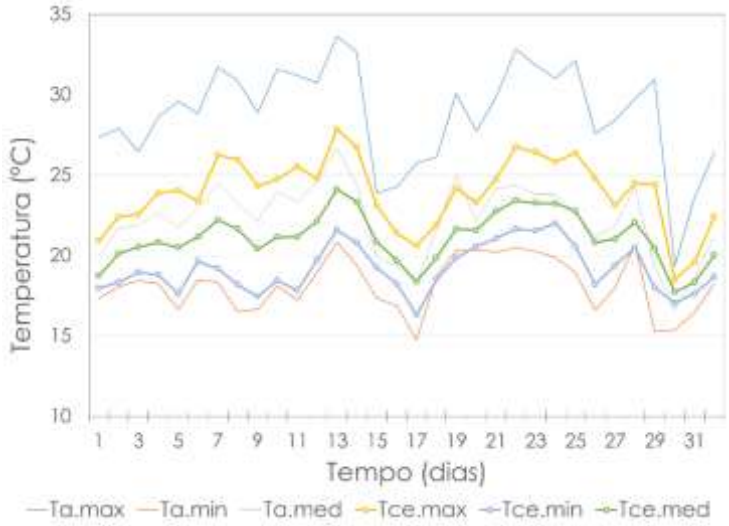
5 DESEMPENHO TÉRMICO DO RC-HCS

5.1 Análise de temperaturas características

A Figura 3 apresenta as temperaturas máximas, médias e mínimas em CE comparativamente ao exterior, por dia, durante toda a série experimental.

Quanto às médias diárias, observa-se uma redução da temperatura média na CE de 1,1 °C em relação à temperatura média externa, com uma diferença máxima de 3,8 °C. A inércia térmica do sistema afeta os resultados em dias com queda significativa de temperatura quando da entrada de frentes frias. O sistema também produz mudanças significativas nas máximas diárias, sendo a máxima em CE sempre inferior à externa. Em média, essa redução é de 4,9 °C, com uma diferença máxima atingindo 6,7 °C. Quanto às mínimas, os valores são sempre muito próximos das mínimas externas, em média 1,0 °C abaixo dessas.

Figura 3 – Temperaturas máxima, média e mínima em CE e no ambiente externo.

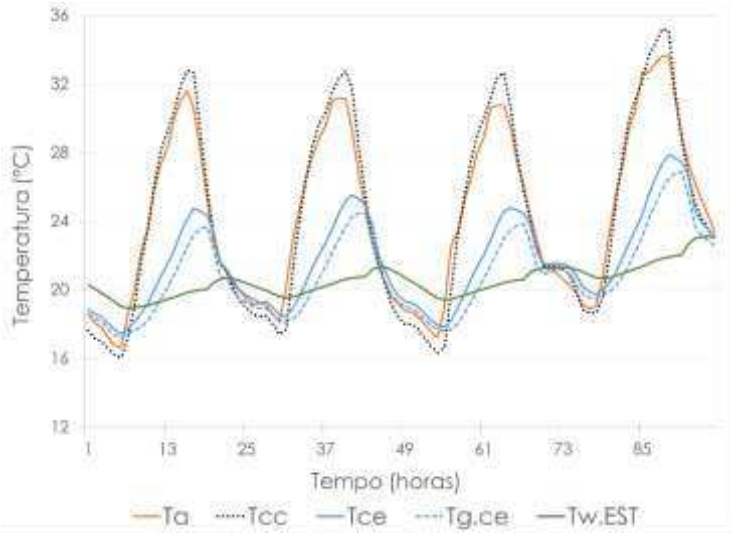


Fonte: Os autores

A amplitude térmica interna diária é reduzida pelo RCM em relação ao exterior. O fator decremental (relação entre a variação da temperatura interna e externa) obtido foi em média de 0,44, com valores flutuando entre 0,3 e 0,6. Enfatiza-se que,

diferentemente do caso de edificações em escala real com massa térmica significativa, CE tem sua massa térmica composta basicamente pelo RCM, a qual é termicamente ativada pela circulação da água na serpentina.

Figura 4 – Temperaturas medidas em CE, CC, EST e no ambiente externo entre 28 e 31/12/2019



Fonte: Os autores

A Figura 4 apresenta o conjunto de dados com a temperatura ambiente, e as temperaturas em CE, CC e EST, de 5 em 5 min, entre 28 e 31 de dezembro, juntamente com a temperatura de globo medida em CE. Nesses dias, com condições climáticas locais típicas de verão, o sistema de resfriamento implementado em CE reduz significativamente as máximas e médias, mantendo as mínimas muito próximas das externas. A temperatura de globo é sempre inferior à temperatura do ar em CE, o que representa uma temperatura operativa inferior à temperatura interna, uma vantagem do ponto de vista do conforto térmico. Destaca-se que CE poderia ter desempenho térmico ainda mais alto, caso a água armazenada em EST, resfriada à noite, fosse bombeada para o RCM durante o dia uma vez que a temperatura da água em EST é mais baixa que em CE nas horas mais quentes do dia, atingindo diferenças máximas entre 4 °C e 5 °C.

5.2 Potencial de Resfriamento Médio (PRM)

O potencial de resfriamento do sistema pode ser avaliado pela redução da temperatura em CE em relação à temperatura de CC. Quanto maior essa diferença, maior o potencial de resfriamento. A diferença entre a temperatura média nas duas células-teste permite quantificar o potencial de resfriamento médio (PRM - Wh/m^2 por dia) (GONZÁLEZ E GONZÁLEZ, 2013). O PRM é definido como "a quantidade de energia por unidade de tempo e de área que pode ser retirada pelo sistema como valor médio durante um período de 24 horas" e pode ser calculado segundo a equação abaixo:

$$PRM = (UAg \times (T_{CC} - T_{CE}) \times 24)/A \quad (3)$$

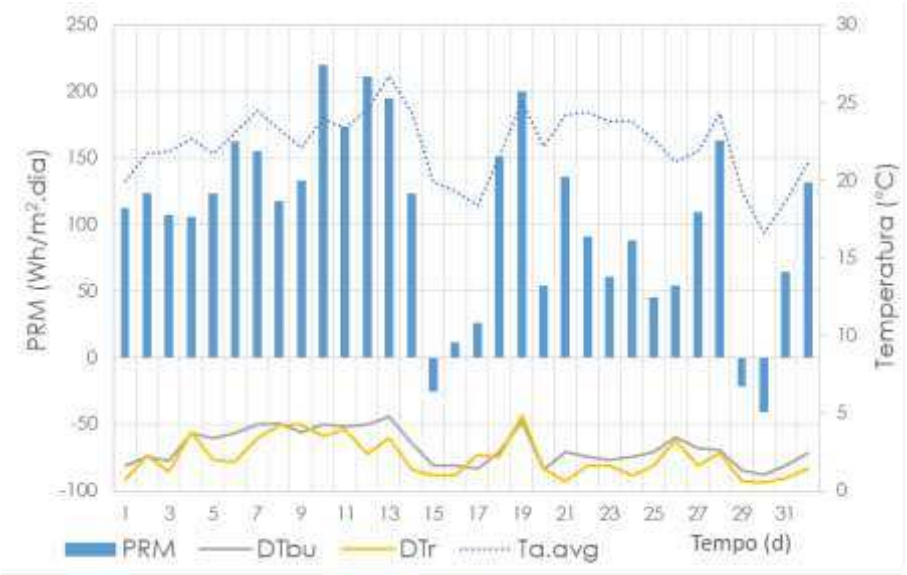
Onde UAg é a transmitância térmica global do módulo de controle (W/K) e que, neste caso, é 1,5 W/K, uma vez que o módulo de controle e o módulo experimental

possuem as mesmas dimensões e características construtivas do usado por Gonzalez e Gonzalez (2013), T_{CC} e T_{CE} são as temperaturas médias diárias nas células-teste e A é a área efetiva do RCM ou a área do teto (m^2).

Nos 32 dias de monitoramento, PRM variou entre 220,3 Wh/m^2dia e -40,6 Wh/m^2dia, com média de 105,2 Wh/m^2dia (Figura 5). Valores negativos significam que não houve resfriamento, nesse caso, sempre na entrada de uma frente fria, quando a temperatura ambiente e de CC caem mais rapidamente que em CE.

Na Figura 5, apresentam-se valores diários de PRM e das principais variáveis que influenciam o potencial de resfriamento: depressão da temperatura de bulbo úmido (DTbu), temperatura média ambiente (Ta.med) e depressão da temperatura da placa metálica (DTr).

Figura 5 – Potencial de resfriamento médio diário relativamente à depressão da temperatura de bulbo úmido e da temperatura da placa metálica versus temperatura média ambiente.



Fonte: Os autores

5.3 Redução do tempo de sobreaquecimento

Aplicando-se o modelo de conforto adaptativo estabelecido pela norma ASHRAE 55-2017, para um grau de aceitabilidade térmica de 90% (com ± 2,5 °C da temperatura de conforto Tconf calculada), em apenas um dia a temperatura em CE esteve acima do limite superior da faixa de conforto adaptativo (Tconf = 27,2 °C, para o período analisado), excedendo-o apenas em 0,7 °C. O sistema atingiu temperaturas abaixo do limite superior de conforto em 97% do tempo. Em contraste, CC e o ambiente externo apresentaram, respectivamente, 81% e 75% dos dias com temperaturas acima do limite de conforto.

6 CONCLUSÕES

Apresentaram-se resultados preliminares do desempenho térmico do RC-HCS em experimento com células-teste em Curitiba.

A capacidade de resfriamento do sistema foi verificada tanto nas temperaturas médias como nas máximas internas, com potenciais de resfriamento médio do sistema de até 220 Wh/m²dia.

O potencial de resfriamento do sistema depende especialmente do conteúdo de umidade da atmosfera, das condições noturnas de nebulosidade e da temperatura do ambiente externo. Considerando que as condições de céu e umidade em Curitiba não são as mais favoráveis para um maior aproveitamento de resfriamento radiante noturno, o desempenho do RC-HCS pode ser considerado vantajoso. Este seria potencialmente ainda mais elevado em locais com condições de verão mais secas e com menor grau de nebulosidade.

REFERÊNCIAS

ARTMANN, N.; MANZ, H.; HEISELBERG, P. Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. **Applied Energy**, 2007 84, 187–201.

ASHRAE Standard 55 - **thermal environmental conditions for human occupancy**, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017, Atlanta

BERDAHL, P.; MARTIN, M. **Emissivity of clear skies**. Solar Energy 32, 1984, pp. 663-664.

CLARK, E. Passive/hybrid comfort cooling by thermal radiation, in: **Proc. Int, Passive Cooling Conf**. Miami Beach, FL, 1981, pp. 682-714.

Erell, E. Radiative cooling. Book chapter in Santamouris, M. (Ed.) **Advances in passive cooling**. James & James Science Publishers, London. 2007, 303p.

ERELL, E.; ETZION, Y. Radiative cooling of buildings with flat-plate solar collectors, **Building and Environment** 35 (4) 2000, 297–305.

GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of buildings**. John Wiley and Sons, Inc. New York. 1994.

GONZÁLEZ, E.; GONZÁLEZ, S. Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estanque para el enfriamiento pasivo en clima húmedo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, Vol. 13, No. 4, 2013, pp. 149-171, out./dez.

HAY, H.R.; YELLOTT, J.I. International aspecs of air conditioning with movable insulation. **Solar Energy** 12, 427. 1969.

KARMANN, C.; SCHIAVON, S.; BAUMAN, F. Thermal comfort in buildings using radiant vs. all-air systems: A critical literature review. **Building and Environment**. 2017 111, 123-131.

LEHMANN, B.; DORER, V.; GWERDER, M.; RENGGLI, F.; J. TÖDTLI, J. Thermally activated building systems (TABS): Energy efficiency as a function of control strategy, hydronic circuit topology and (cold) generation system. **Applied Energy**, 2011, 88 pp. 180–191.

MARTIN, M.; P. BERDAHL, P. Characteristics of infrared sky radiation in the United States. **Solar Energy** 1984 Vol. 33, No. 3/4, pp. 321-336.

RAMAN, A. P.; MA ANOMA, M.A.; ZHU, L.; REPHAELI, E. FAN, S. Passive Radiative Cooling Below Ambient Air Temperature Under Direct Sunlight. **Nature** 515, 540-544, 2014.

SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. N. **Passive Cooling of Buildings**, James & James, 1996.

ZHAO, B.; HU, M.; AO, X.; CHEN, N.; PEI, G. Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects. **Applied Energy** 236, 2019 489–513.

ZHAO, D.; AILI, A.; ZHAI, Y.; XU, S.; TAN, G.; YIN, X.; YANG, R. Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications. **Applied Physics Reviews** 6 2019, 021306.