APLICABILIDADE DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO RADIANTE CAPACITIVO EM CIDADES BRASILEIRAS

Eduardo Manuel González-Cruz (1); Eduardo L. Krüger (2)
(1) Dr. Professor Visitante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), eduardocruz@utfpr.edu.br, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Curitiba - Sede Ecoville, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900 - 81280-340 Curitiba, Tel.: +55 (41) 99876 4625.
(2) Dr. Engenheiro Civil, ekruger@utfpr.edu.br, PPGEC – UTFPR, Campus Curitiba - Sede Ecoville, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900 - 81280-340 Curitiba, Tel. +55 (41) 3279 6821.

RESUMO
Neste trabalho, são apresentadas estimativas de temperatura interna de um protótipo com sistema de aquecimento e resfriamento radiante-capacitivo (RC-HCS), supondo sua aplicação, no modo de resfriamento, em seis cidades brasileiras localizadas nas Zonas Bioclimáticas 5, 6, 7 e 8: Brasília, Campo Grande, Monteiro, Barreiras, Palmas e João Pessoa. O potencial de resfriamento do sistema foi estudado experimentalmente em Curitiba, PR. Com base nos dados de temperatura registrados durante monitoramento, desenvolveram-se e validaram-se fórmulas preditivas para as temperaturas internas máxima, média e mínima. Aplicaram-se então as fórmulas de forma a analisar o desempenho térmico do sistema em condições climáticas diferentes daquelas que permitiram sua geração. Como base para o estudo, o potencial de resfriamento radiativo noturno de cada cidade foi avaliado em termos da depressão da temperatura do céu (DT_{sky}). A eficiência do sistema de resfriamento é avaliada em termos da redução das temperaturas internas máximas e médias em relação ao exterior e da redução percentual do somatório de graus-dia de resfriamento quanto à faixa de conforto térmico adaptativo. Os resultados mostram potenciais de redução da temperatura interna variando entre 1,6 ºC (em Monteiro, PB) e 2,2 ºC (em Barreiras, BA) com uma redução entre 83% (Palmas, TO) e 99% (Brasília, DF) do somatório de graus-dia de aquecimento.

Palavras-chave: Resfriamento radiativo noturno, resfriamento radiante, previsões de temperatura interna, sistema radiante-capacitivo, sistema de baixa energia.

ABSTRACT
This work presents indoor temperature predictions of a radiant-capacitive heating and cooling system (RC-HCS) applied, in cooling mode, in six Brazilian cities located in the Bioclimatic Zones 5, 6, 7 and 8. The cooling potential was experimentally studied in Curitiba, PR. Based on monitored temperature data, predictive formulas for the maximum, average and minimum indoor temperatures were developed and validated. Such formulas were then applied in order to analyze the thermal performance of the system in climatic conditions different from those that allowed their generation. The potential of nocturnal radiative cooling in each city was evaluated in terms of the sky temperature depression (*DTsky*). The performance of the cooling system is evaluated in terms of its ability to reduce the maximum and average indoor temperatures relative to outdoors and of percent reductions of cooling degree-days with respect to the adaptive thermal comfort range. Results show potentials of indoor temperature reductions ranging between 1.6ºC (in Monteiro, PB) and 2.2ºC (in Barreiras, BA), with corresponding drops in cooling degree-days ranging 83% - 99%, for Palmas, TO and Brasília, DF, respectively.

Keywords: night-sky cooling, radiant cooling, indoor temperature predictions, radiant-capacitive system, low energy system.

1. INTRODUÇÃO

Embora a crise global de saúde causada pela COVID-19 tenha colocado as Mudanças Climáticas em segundo plano, o principal desafio que a humanidade enfrenta hoje é o aquecimento global causado pelas emissões de gases de efeito estufa, incluindo o CO_2. A cada ano, os recordes de acúmulo de CO_2 são superados, sendo que uma de suas causas deve-se à produção de energia para uso-final em edificações. Globalmente, as edificações consomem mais de um terço do total da energia primária (YOSHINOA *et al.,* 2017). O uso de energia em edificações atualmente é responsável por mais de 40% do consumo total de energia primária nos EUA e União Europeia (CAO *et al.,* 2017). Por outro lado, a maior parte da energia utilizada em edificações é para o seu condicionamento artificial, incluindo aquecimento, ventilação e resfriamento, além da iluminação artificial (ÜRGE-VORSATZ *et al.,* 2015). Embora no Brasil a produção de energia elétrica ainda seja em grande parte renovável, essa parcela vem caindo lentamente nos últimos anos (BRASIL, 2020), sendo relevante qualquer iniciativa que contribua para a redução do consumo de energia em condicionamento artificial.

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 radiativo 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; YELLOTT, 1969; MARTIN; BERDAHL, 1984; GIVONI, 1994; SANTAMOURIS; ASIMAKOPOULOS, 1996; ERELL; ETZION, 2000; ERELL, 2007). Na última década, deram-se importantes avanços no desenvolvimento de materiais para aproveitar o resfriamento radiativo, mesmo durante o dia (RAMAN *et al.*, 2014; ZHAO *et al.*, 2019).

O sistema passivo aplicado no presente estudo envolve o resfriamento radiativo de um fluido (água) durante a noite, e o uso de resfriamento radiante e massa térmica efetiva no espaço interno para que se obtenha maior eficiência energética e estabilidade térmica, de forma semelhante a sistemas construtivos ativados termicamente (*Thermally Activated Buildings Systems* –TABS, LEHMANN *et al.,* 2011). A obtenção de conforto térmico se dá, neste caso, com menor demanda de energia primária do que sistemas que operam com ar condicionado convencional (KARMANN *et al.*, 2017).

O comportamento térmico do sistema, denominado RC-HCS, no modo de resfriamento, pode ser determinado pela aplicação de fórmulas preditivas desenvolvidas a partir de dados resultantes de monitoramento térmico do sistema. Com elas, é possível estimar o comportamento térmico do sistema em condições climáticas diferentes daquelas utilizadas para gerar as fórmulas preditivas que o caracterizam (KRÜGER *et al.,* 2010, GONZÁLEZ; KRÜGER; 2015). Etapa anterior da pesquisa consistiu na aplicação das fórmulas preditivas do RC-HCS na cidade de Madrid, Espanha, em um estudo de reabilitação habitacional (GONZÁLEZ *et al.,* 2020).

2. OBJETIVO

Tem-se como objetivo determinar a aplicabilidade do sistema de resfriamento radiante-capacitivo de baixo consumo de energia (RC-HCS) como estratégia de condicionamento passivo em localidades específicas do território nacional, onde haja necessidade de resfriamento ao longo do ano ou em determinados períodos do ano e onde possa haver potencial para resfriamento radiativo noturno. Assim, com aplicação das equações preditivas do RC-HCS, analisam-se seis cidades brasileiras: Brasília, DF, Campo Grande, MS, Monteiro, PB, Barreiras, BA, Palmas, TO, e João Pessoa, PB (arquivos climáticos com o Ano Meteorológico Típico - TMY). A eficiência do sistema de resfriamento é avaliada em termos da redução da temperatura interna em relação à externa, e da redução percentual do somatório de graus-dia para resfriamento, considerando o limite superior da faixa de conforto térmico adaptativo, em relação às condições climáticas locais.

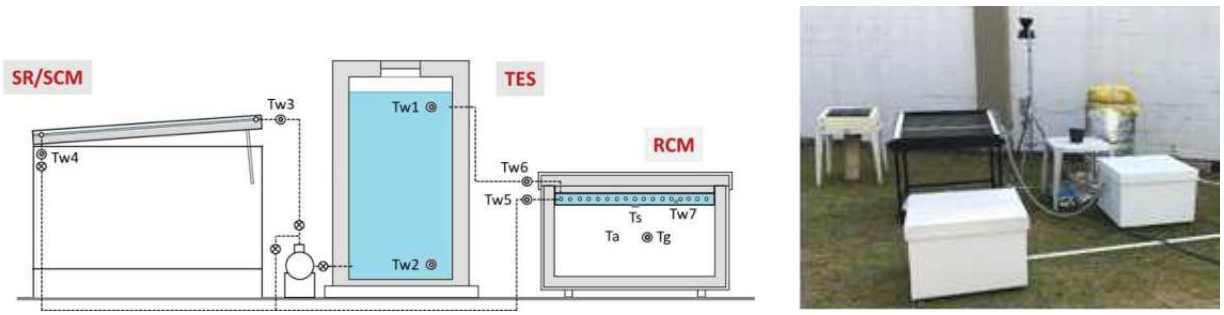
3. MÉTODO

As etapas do método procuraram atingir os seguintes objetivos específicos, a saber: a) avaliação do potencial climático para resfriamento radiativo noturno de cada localidade face suas temperaturas máximas diárias ao longo do ano e suas necessidades de resfriamento; b) análise do potencial de redução das temperaturas internas médias e máximas diárias, em comparação com as externas; c) avaliação das potencialidades do sistema, em termos de redução do somatório de graus-dia de resfriamento, acima do **L**imite **S**uperior de **C**onforto **A**daptativo (ºCD > LSCA).

3.1. Descrição do RC-HCS e das condições experimentais em Curitiba, PR

O sistema de condicionamento térmico de baixo consumo de energia é denominado sistema de aquecimento e resfriamento radiante-capacitivo (*Radiant-Capacitive Heating and Cooling System* -RC-HCS). Possui três componentes (Figura 1a-1b): um módulo radiante capacitivo (*Radiant-Capacity Module* -RCM) dentro do espaço a acondicionar, um radiador/coletor (*Sky Radiator/Solar Collector Module* -SR/SCM) exposto ao céu e um tanque de armazenamento de água (*Thermal Energy Storage* -TES).

Trata-se de um sistema que pode atender às necessidades de aquecimento ou resfriamento. No modo de resfriamento noturno, uma pequena bomba circula a água a partir do TES através do SR/SCM durante a noite, onde ela é resfriada ao atravessá-lo, circulando também pelo RCM de modo a resfriar o ambiente interno e retornando ao TES. A água resfriada no TES pode também ser aproveitada durante o dia para resfriar o RCM, que, assim, atuará como um dissipador de calor para o ambiente interno.



(a) (b)

Figura 1 – (a) Componentes do RC-HCS e (b) configuração experimental.

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. Mais detalhes e características construtivas dos componentes do sistema em sua fase experimental podem ser encontrados em González *et al.* (2020).

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. O tanque de armazenamento de água é de polietileno sendo forrado com uma dupla camada de lã de PET e contendo aproximadamente 220 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 l/h, a partir de programação realizada com um timer para o período entre 19h e 6h.

3.2. Análise do potencial climático de resfriamento radiativo noturno (PRRN)

Inicialmente, apresenta-se o método de caracterização do PRRN aplicado aos dados meteorológicos de Curitiba, a fim de se tomar tal dado como referência na comparação com os resultados das cidades selecionadas. Em seguida, é apresentada a avaliação do PRRN em cada uma das localidades.

3.2.1. Avaliação do potencial de resfriamento 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 de Curitiba.

O potencial de resfriamento radiante de um determinado local pode ser expresso em termos da depressão da temperatura do céu (DT_{sky} em K), ou seja, a diferença entre a temperatura ambiente (T_a) e a temperatura do céu (T_{sky}) (BERDAHL; MARTIN, 1984). O valor horário de T_{sky} pode ser calculado em função da temperatura ambiente, temperatura de ponto de orvalho (T_{dp}), ambos em graus Celsius (ºC), hora

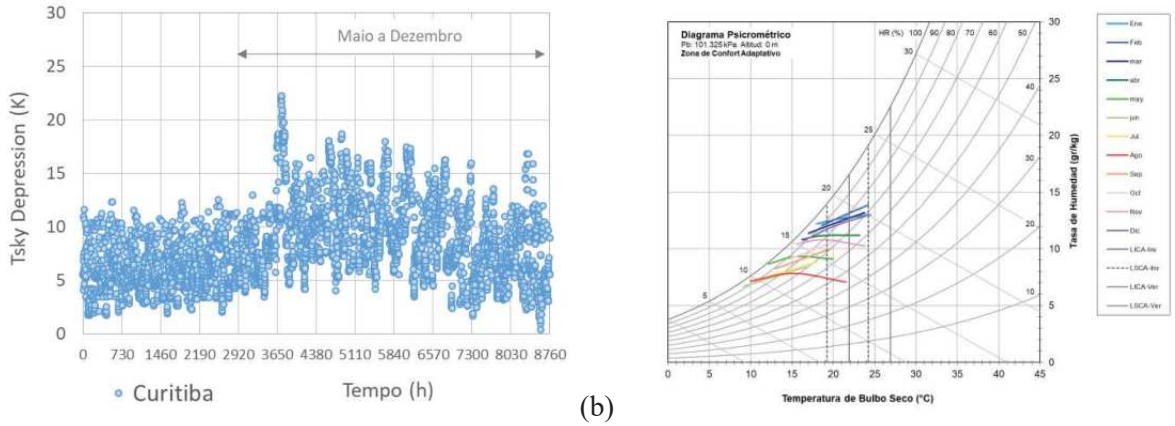
do dia no horário solar (t) e pressão atmosférica local (P, dada em mbar). Quanto maior o valor de DT_{sky}, maior o potencial de resfriamento radiante em W/m^2. A temperatura efetiva do céu é obtida pela equação:

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

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 segundo a equação seguinte:

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

A partir do arquivo BRA_PR_Curitiba-Bacacheri.AP.838420_TMYx2.epw, disponível em LabEEE/UFSC, 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 (DT_{sky}) para todos os meses do ano. A Figura 2 mostra esses resultados, assinalando o período do ano com o maior PRRN.



(a) (b)

Figura 2 – (a) Depressão da temperatura do céu e (b) temperaturas médias mensais horárias de Curitiba e relação com ZCA.

Os valores horários de DT_{sky} em Curitiba variaram entre 0 K e 22,3 K para o ano, com um valor médio anual de 8,2 K e entre 0 K e 16,8 K para o período de dezembro a março, com um valor médio de DT_{sky} de 6,4 K. A soma do DT_{sky} para o período dezembro a março é 255 Kh. Em Curitiba, em apenas 17,3% dos dias (63 dias), a temperatura ambiente máxima é superior à LSCA. A soma dos graus-dias em que isso ocorre é 111 °CD. Destes, apenas 56 ºCD se concentram nos quatro meses mais quentes. Na Figura 2b, pode-se observar como as temperaturas máximas médias dos meses mais quentes não ultrapassam o limite superior da faixa de conforto adaptativo. Um resumo desses resultados é apresentado na Tabela 1.

Um segundo indicador para avaliar o potencial de resfriamento radiante é a depressão da temperatura de uma placa metálica exposta ao céu noturno (DT_r), ou seja, a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura da placa metálica (T_r). 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 foi 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 em aproximadamente 9º (10%) para o norte. Tais medições de T_r serviram continuamente como referência para se avaliar o potencial de resfriamento radiante.

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

3.2.2. Avaliação do potencial de resfriamento radiativo noturno e graus-dia de desconforto pelo calor

As seis cidades brasileiras selecionadas (Figura 3) localizam-se em quatro diferentes Zonas Bioclimáticas, cada qual com determinada demanda por resfriamento: Brasília, DF, ZB-5; Campo Grande, MS, ZB-6; Monteiro, PB, ZB-6; Barreiras, BA, ZB-7; Palmas, TO, ZB-7 e João Pessoa, PB, ZB-8.

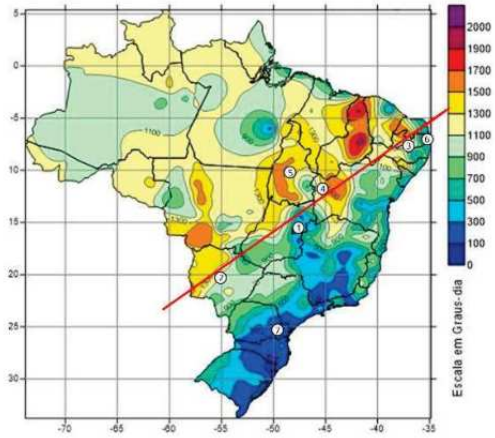


Figura 3 –. Localização das cidades estudadas com regiões com demanda por resfriamento (ºCD > LSCA) (GONZÁLEZ; KRÜGER; 2015). 1-Brasília, 2-Campo Grande, 3-Monteiro, 4-Barreiras, 5-Palmas, 6-João Pessoa e 7-Curitiba (referência)

Para analisar o potencial de resfriamento radiativo noturno (PRRN) nas seis cidades selecionadas, foram utilizados dados meteorológicos de arquivos TMY disponíveis no site do LabEEE/UFSC. Com esses dados, também foi calculado o somatório de graus-dia sobre o limite superior da faixa de conforto adaptativo (ASHRAE, 2017) considerando 90% de aceitabilidade [∑ °CD (T_{outmax}-LSCA)]. Ou seja, a soma das diferenças positivas entre a temperatura externa máxima diária e o limite superior de conforto adaptativo.

Zona Bioclimática 5: Situada na ZB5, dados de ***Brasília**, DF (*BRA_DF_Brasília-Kubitschek.Intl.AP.833780_TMYx.2003-2017) para DT_{sky} chegam a atingir 22,5 K, com média anual de 10,9 K e no período de julho a fevereiro de 11,8 K (neste caso, com soma de DT_{sky} de 880 Kh). Valores médios diários variam de 51,6 Kh a 170,6 Kh. Na Figura 4a pode-se observar que o período de maio a outubro (assinalado no gráfico, como tendo maior potencial) apresenta o maior PRRN. Em 64% dos dias (235 dias), a temperatura ambiente máxima é superior ao LSCA. O somatório de graus-dia de resfriamento anual é de 517 ºCD, com 451ºCD nos meses mais quentes.

Zona Bioclimática 6: ***Campo grande**, MS (*BRA_MS_Campo.Grande.Intl.AP.868100_INMET) e ***Monteiro**, PB (*BRA_PB_Monteiro.819140_INMET) se localizam na ZB6. Em Campo Grande, os valores horários de DT_{sky} (Figura 4b) alcançam máximos de 23,4 K, com valor médio anual de 8,4 K e valor médio no período mais promissor de 8,3 K (com soma de DT_{sky} neste período de 916 Kh. Apresenta valores médios diários variando de 28,6 Kh a 147,8 Kh. Em Monteiro, os valores horários de DT_{sky} (Figura 4c) alcançam máximos de 15,4 K, com média anual de 5,6 K e média no período de maior potencial de 6.0 K (soma no período de 543 Kh). Apresenta valores médios diários variando de 26,5 Kh a 77 Kh.

Em termos de PRRN, Campo Grande mostra um potencial bem superior ao de Monteiro.

Quanto à demanda por resfriamento, ambas as cidades apresentam semelhante demanda: o somatório de graus-dia de resfriamento anual é de 867 ºCD em Campo Grande e de 879 ºCD em Monteiro. Nos meses mais quentes, Campo Grande apresenta 843ºCD e Monteiro 842 ºCD de resfriamento.

Zona Bioclimática 7: ***Barreiras**, BA (*BRA_BA_Barreiras.866520_INMET), na ZB7, mostra valores horários de DT_{sky} (Figura 4d) alcançando um máximo de 22,4 K, com média anual de 8,4 K e média no período mais promissor de 9,4 K (soma neste período de 944 Kh). A média diária varia de 27,0 Kh a 174,7 Kh. Nesse caso, os meses com maior necessidade de resfriamento coincidem com os de maior PRRN. Em 94,8% dos dias (346 dias), a temperatura ambiente máxima é superior ao LSCA. A demanda por resfriamento equivale a 1545 ºCD, com todos os meses em situação de calor.

Zona Bioclimática 7: ***Palmas**, TO (*BRA_TO_Palmas.866070_INMET), localizada na ZB7, apresenta um PRRN significativo, concentrado entre os meses de maio a setembro. No entanto, a necessidade de resfriamento ocorre o ano todo. Os valores horários de DT_{sky} (Figura 4e) alcançam máximos de 21,2 K, com valor médio de 5,7 K e no período de maio a setembro de 9,0 K (com soma para este período de 449 Kh). Valores médios diários variam de 25.7 Kh a 118,9 Kh. Quanto à demanda por resfriamento, em 92,1% dos dias (336 dias), a temperatura ambiente máxima é superior ao LSCA. A demanda por resfriamento equivale a 1409 ºCD, com todos os meses em situação de calor.

Zona Bioclimática 8: ***João Pessoa**, PB (*BRA_PB_Joao.Pessoa.819180_INMET), na ZB8, igualmente apresenta baixo PRRN. Só nos dois primeiros meses do ano e nos últimos quatro é que se tem algum potencial, porém baixo. Felizmente, neste caso, a necessidade de resfriamento também não é grande. Os valores horários de DT_{sky} (Figura 4f) chegam a 8,4 K, com média anual de 2,8 K. A média do período mais quente, de novembro a maio, é de 2,7 K e a soma para este período é 192 Kh. Valores médios diários variam de 7,8 Kh a 45,2 Kh. Embora em 71.8% dos dias (200 dias) a temperatura ambiente máxima exceda a LSCA, a demanda anual de resfriamento é de apenas 302 ºCD, com 268 ºCD nos meses mais quentes.

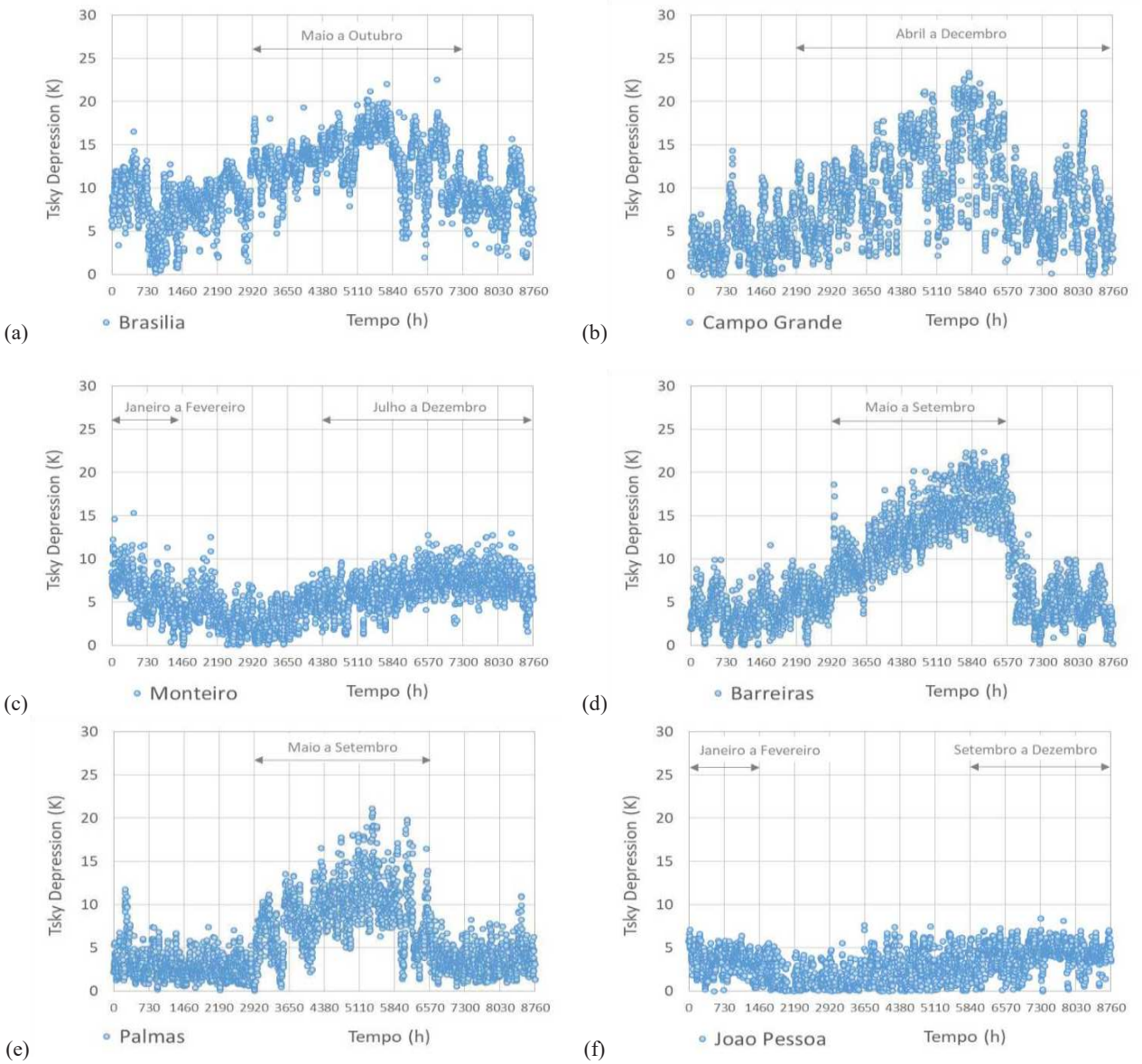


Figura 4 – Depressão da temperatura do céu e temperaturas médias mensais horárias e relação com RCA (a) Brasília –ZB-5; (b) Campo Grande –ZB-6; (c) Monteiro –ZB-6; (d) Barreiras –ZB-7; (e) Palmas –ZB-7; (f) João Pessoa –ZB-8.

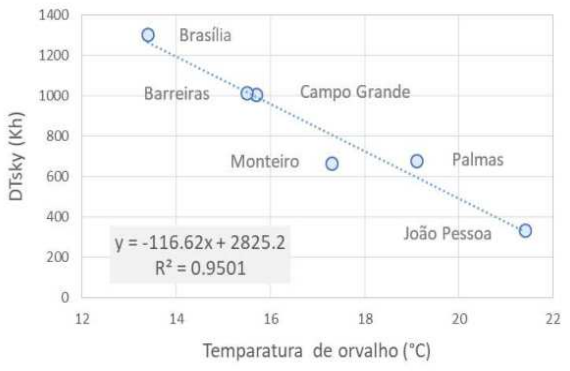


Figura 5 – Correlação entre Temperatura de Orvalho e PRRN.

A quantidade de vapor de água precipitável na atmosfera é a principal variável da qual depende o resfriamento radiativo noturno, uma vez que a emissividade atmosférica aumenta com esse fator e a presença de vapor d'água reduz o potencial de resfriamento radiativo (ZHAO *et al.*, 2019). Essa relação foi analisada em termos da temperatura do ponto de orvalho e DT_{sky}. A Figura 5 mostra uma forte correlação entre os dois parâmetros (R= 0,97; R^2 = 0.95), sugerindo que o potencial de resfriamento radiativo noturno é tanto maior quanto menor for o teor de umidade do ar, expresso neste caso como temperatura do ponto de orvalho. Em síntese, o PRRN é maior em locais e meses em que a umidade do ar é mais baixa.

A Tabela 1 apresenta o PRRN de cada localidade em termos de DT_{sky}, expresso como a soma total de Kh de todas as noites do ano. (Total/max), a média da soma de DT_{sky} de cada mês (Por mês) e a média diária (Diário). As médias referentes ao período mais quente (média*) também são apresentadas.

Tabela 1 - Dados das cidades avaliadas: zona bioclimática (ZB); Latitude e longitude de localização; Depressão da temperatura do céu (*DTsky*) - PRRN e demanda por resfriamento (°CD > LSCA).

Cidade	ZB	Altitude	Latitude	Longitude		*DTsky (PRRN)*		*°CD**
						(Kh) Por mês	*(K)* Diário	Tmax > LSCA
Brasilia, DF	5	1160	-15,78	-47,92	Total/max	1306	22,5	517
					Média*	118,4	11,8	60
					Média	108,9	10,9	43,1
Campo Grande, MS	6	530	-20,44	-54,65	Total/max	1005	23,4	867
					Média*	88	8,8	85
					Média	83,7	8,4	72,3
Monteiro, PB	6	604	-7,89	-37,06	Total/max	666	15,4	879
					Média*	60,4	6	94
					Média	55,5	5,6	73,2
Barreiras, BA	7	439	-12,17	-45	Total/max	1014	22,4	1545
					Média*	94,4	9,4	140
					Média	84,5	8,4	128,8
Palmas, TO	7	280	-10,17	-48,28	Total/max	681	21,2	1409
					Média*	66,4	6,6	133
					Média	56,8	5,7	117,4
Joao Pessoa, PB	8	7	-7,11	-34,89	Total/max	337	8,4	302
					Média*	27,4	2,7	38
					Média	28	2,8	25,2
Curitiba (Referência)	1	930	-25,4	-49,23	Total/max	986	22,3	111
					Média*	63,8	6,4	14
					Média	82,2	8,2	9,3

3.3. Fórmulas preditivas do comportamento térmico do RC-HCS experimental

Equações preditivas foram desenvolvidas a partir de dados empíricos. Para tanto, foi empregado o método originalmente proposto por Givoni (1999) e utilizado em estudos semelhantes (KRÜGER; GIVONI, 2008; KRÜGER *et al.*, 2010; GONZÁLEZ *et al.*, 2020). As fórmulas foram desenvolvidas por análise de regressão linear múltipla para estimar os máximos, mínimos e médios diários internos a partir de dados meteorológicos externos disponíveis. Uma vez que o desempenho do RC-HCS se deve principalmente ao resfriamento radiativo noturno, a predição das temperaturas internas também levou em consideração a temperatura da chapa de metal exposta (T_r) como variável independente relevante.

Para obter a temperatura noturna média $T_{r(nt)}$, uma combinação de quatro variáveis climáticas (temperaturas externas mínimas e médias, temperatura média do ponto de orvalho e temperatura média do bulbo úmido) rendeu a predição mais precisa:

$$T_{r(nt)} = -3.9601 + 0.7171 \times T_{out\text{-}min} - 1.6734 \times T_{dp} + 3.6043 \times WBT_{avg} - 1.4312 \times T_{out\text{-}avg} \quad (2)$$

O coeficiente de correlação foi de 0,9452 (com $R^2 = 0,8934$).

No entanto, como a célula teste experimental é resfriada apenas durante a noite pela circulação de água e, durante o dia, sua temperatura interna é afetada pela temperatura ambiente, foi introduzido um fator de correção para avaliar a temperatura superficial efetiva da folha de metal ao longo de um ciclo de 24 horas, denominado "Temperatura de superfície condicional de 24 horas" ($T^*_{r(24h)}$). $T^*_{r(24h)}$ foi, portanto, utilizado como uma das variáveis na geração das fórmulas preditivas.

$T^*_{r(24h)}$ foi inicialmente calculado de hora em hora usando T_r medido e dados de temperatura ambiente T_{out}. Para cada hora da série experimental, apenas quando $T_r < T_{out}$, T^*_r foi igualado a T_r,, caso contrário, T^*_r foi assumido como igual a T_{out}. Um valor médio diário ($T^*_{r(24h)}$) foi então determinado por análise de regressão múltipla, incluindo a temperatura externa média medida ($T_{out\text{-}avg}$) e o $T_{r\ (nt)}$ estimado, como segue:

$$T^*_{r(24h)} = -0.2352 + 0.6871 \times T_{out\text{-}avg} + 0.3497 \times T_{r(nt)} \quad (3)$$

O coeficiente de correlação foi de 0,9944 (com $R^2 = 0,9888$).

As fórmulas preditivas para as temperaturas internas foram geradas por análise de regressão múltipla dos dados monitorados durante os primeiros 14 dias da série experimental e, como uma etapa de validação,

dados estimados pelas fórmulas obtidas foram comparados para os 19 dias restantes contra os dados medidos. As fórmulas obtidas para as temperaturas internas máxima, mínima e média e respectivos coeficientes de correlação e determinação após a validação são os seguintes:

$$T_{in\text{-}max} = -0.9667 + 0.4593 \times T_{out\text{-}max} + 0.8103 \times T_{out\text{-}avg} + 0.2193 \times Swing - 0.3867 \times T_{drop} + 0.1011 \times Rn_{avg} - 0.3295 \times T^*_{r(24h)} \quad (4)$$

$R = 0.9649$ ($R^2 = 0.9310$)

$$T_{in\text{-}min} = 0.8801 + 0.6487 \times T_{out\text{-}min} - 0.214 \times T_{out\text{-}avg} - 0.076 \times T_{drop} + 0.0988 \times Rn_{avg} + 0.4601 \times T^*_{r(24h)} \quad (5)$$

$R = 0.9636$ ($R^2 = 0.9286$)

$$T_{in\text{-}avg} = 0.694 + 0.3104 \times T_{out\text{-}avg} + 0.2737 \times T_{out\text{-}max} - 0.0231 \times Swing - 0.2603 \times T_{drop} + 0.0942 \times Rn_{avg} + 0.303 \times T^*_{r(24h)} \quad (6)$$

$R = 0.9821$ ($R^2 = 0.9645$).

Todas as fórmulas levaram em consideração dados de temperatura externa, a queda de temperatura noturna (T_{drop}), representando a queda da temperatura máxima do dia anterior para a temperatura mínima do dia, a temperatura média dos três dias anteriores (Rn_{avg}) e a temperatura condicional 24- hora da temperatura da superfície da chapa de metal preta exposta ($T^*_{r(24h)}$). As fórmulas preditivas para as temperaturas internas máximas e mínimas tiveram, adicionalmente, como variável independente, a oscilação diária da temperatura exterior (*Swing*).

4. RESULTADOS – ANÁLISE DE COMPORTAMENTO TÉRMICO

As equações preditivas do sistema de resfriamento foram aplicadas às seis cidades já mencionadas. Para isso, foram utilizadas as mesmas bases de dados utilizadas para calcular o potencial de resfriamento radiativo noturno. O procedimento permitiu determinar as temperaturas características médias e máximas utilizadas nesta análise.

4.1. Diferenças nas temperaturas máximas e médias entre o exterior e o interior

O desempenho térmico do sistema de resfriamento é analisado em termos da capacidade de redução das temperaturas médias e máximas internas em relação às temperaturas externas média e máxima, ou seja, DT_{med} e DT_{max}. A diferença entre as temperaturas médias caracteriza sua capacidade de resfriamento, enquanto a diferença entre as temperaturas máximas expressa a capacidade do sistema de reduzir o sobreaquecimento.

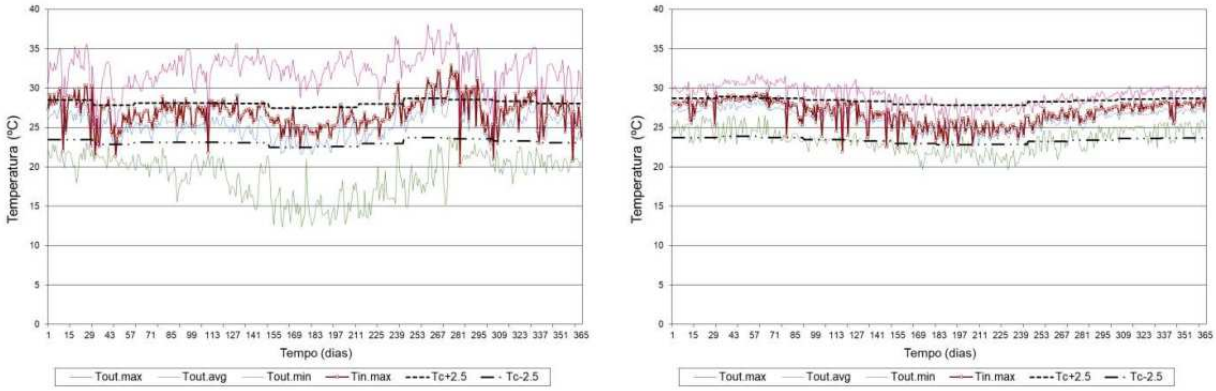
A Tabela 2 mostra o resumo dos resultados da aplicação das fórmulas preditivas. As diferenças entre as temperaturas média e máxima podem ser vistas nas primeiras quatro colunas. Em ambos os casos, são apresentados o valor médio e o valor máximo dessas diferenças. As duas colunas a seguir mostram os fatores decrementais (oscilação diária da temperatura interna / oscilação diária da temperatura externa) médios e o máximo registrado. Por fim, esta tabela mostra a demanda de resfriamento para cada cidade e o percentual de redução desse valor alcançado em cada local.

A maior depressão na temperatura média é observada em Barreiras (2,2 ºC), com diferenças máximas de até 4 ºC. Correspondentemente também em Barreiras, observam-se as maiores diferenças entre as temperaturas máximas, 5,4 ºC em média anual, podendo atingir valores até 8,3 ºC. Em contraste, João Pessoa apresenta a menor depressão da temperatura média e a menor redução da máxima diária em termos de média e valor máximo encontrados (Tabela 2). As Figuras 6a e 6b mostram, para ambas as cidades, as temperaturas máximas diárias calculadas para o sistema relativamente às condições externas, com limites da faixa de conforto adaptativo para uma aceitabilidade térmica de 90%. A diferença nas condições climáticas é notável nas amplitudes térmicas de cada local e pela maior ou menor distância entre a temperatura externa e a LSCA, o que indica o desconforto térmico devido ao calor.

Observa-se uma correlação média ($R = 0,74$; $R^2 = 0,55$) entre as necessidades de resfriamento (ºCD > LSCA) e a capacidade de resfriamento do sistema (DT_{med}). Como esperado, também é observada uma alta correlação entre o nível de umidade das cidades, expresso em termos da temperatura do ponto de orvalho e os valores de PRRN e DT_{med}. A análise de correlação entre o PRRN (DT_{sky} total e médio*) de cada cidade e o DT_{med} correspondente indica um coeficiente de correlação ($R = 0,84$; $R^2 = 0,70$).

Tabela 2 - Diferenças de temperatura média e máxima, fator decremental e percentual de redução de sobreaquecimento.

	DT med (Tout-Tin)		*DT max (Tout-Tin)*		*Fator decremental*		*°CD > LSCA*	*Redução do °CD > LSCA*
	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima	Total anual	%
Brasilia, DF	1,8	**4,5**	4,8	**9.0**	0,47	0,68	517	99,4
Campo Grande, MS	1,9	3,8	5.0	8,3	0,48	0,7	867	89,6
Monteiro, PB	1,6	3.0	4,4	6,1	0,47	0,6	879	98,0
Barreiras, BA	**2,2**	4.0	**5,4**	8,3	0,5	0,68	1545	94,1
Palmas, TO	1,5	3,5	4,1	6,5	0,47	0,77	1409	83,5
João Pessoa, PB	0,8	1,7	2,2	3,6	0,45	0,63	302	98,0
Curitiba (Ref.)	0,9	5,2	3,4	7,9	0,28	0,91	111	88,0



(a) Barreiras (b) João Pessoa

Figure 6: Temperaturas internas máximas diárias estimadas e temperaturas ambientes correspondentes, e faixa de conforto (LSCA - Limite Superior; LICA - Limite Inferior de Conforto Adaptativo).

4.2. Análise de conforto térmico - Capacidade de redução de sobreaquecimento

A análise comparativa dos valores de temperatura externa de cada localidade para a referência adotada, ou seja, a zona de conforto adaptativo, permitiu estabelecer a demanda por resfriamento de cada local.

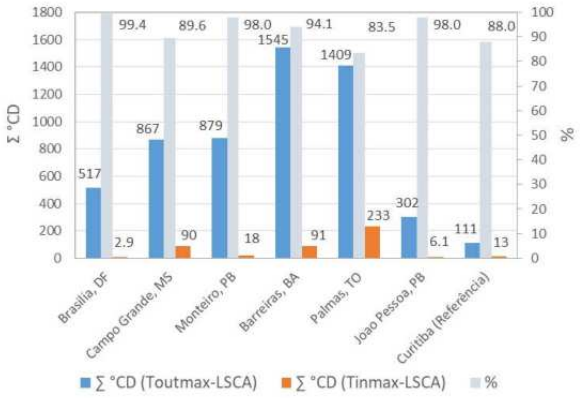


Figura 7 – Somatório de graus-dia de resfriamento (ΣºCD Toutmax-Tinmax) e redução percentual de sobreaquecimento face as condições externas.

Dependendo das características climáticas, a aplicação do RC-HCS resultou em diferentes percentuais de redução da demanda por resfriamento. A mais baixa redução percentual foi para Palmas. Em contraste, os maiores potenciais de redução do sobreaquecimento anual ocorrem em Brasília, Monteiro e João Pessoa, com 99,4%, 98% e 98% respectivamente. O caso de João Pessoa é particularmente curioso porque embora o potencial climático (PRRN) seja muito baixo, quase todas as necessidades de resfriamento são atendidas.

5. CONCLUSÕES

Como ponto de partida para este estudo, avaliou-se o potencial de resfriamento radiativo noturno que o clima dessas cidades oferece, visto que o desempenho térmico do sistema aplicado depende desse potencial climático. Foi constatado nesta análise, como esperado, que os climas menos úmidos, ou as épocas mais secas do ano (umidade absoluta mais baixa) são aqueles com os maiores PRRN. A análise dos resultados em relação à faixa de conforto adaptativo permite concluir que o sistema de resfriamento aplicado nessas cidades é capaz de reduzir entre 83% e 99,4% da demanda por resfriamento.

Um comentário adicional deve ser feito sobre os resultados analisados neste trabalho, pois esses se referem a um sistema avaliado em célula teste, de dimensão reduzida, que não pode ser considerada um edifício e cujos resultados não podem ser generalizados. No entanto, estudos anteriores (GONZÁLEZ *et al.*, 2020) mostram que os resultados, ao se ampliar a escala para um edifício, são ainda mais evidentes, devido a três fatores: aumento da relação volume/superfície; aumento do fator decremental com o aumento da inércia térmica e controle do funcionamento do sistema e melhoria das características térmicas da envolvente do edifício em relação ao módulo experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Standard 55 - thermal environmental conditions for human occupancy. **ASHRAE Handbook – Fundamentals,** 2017, Atlanta.

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

CAO, X.; DAI, X.; LIU, J. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. **Energy and Buildings** 128 (2016) 198–213

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. Minimum climatic information needed to predict performance of passive buildings in hot climates. In: **Proceedings of PLEA conference**; Brisbane, Australia. 1999.

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

GOBIERNO DO BRASIL. https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/. Publicado em 21/01/2020. Accesado em 24/03/2021.

GONZÁLEZ, E; KRÜGER, E.; FERNANDES, L.; TRENTO, D. 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.

GONZÁLEZ, E.; KRÜGER, E.; OTEIZA, I.; ALONSO, C.R.; FERNANDO, M.C. Applicability of a passive radiant-capacitive heating and cooling system in the rehabilitation of residential buildings-Case study: Colonia de San Carlos, Madrid (Spain). **Proceedings PLEA Conference**, A Coruña, Spain. 2020.

GONZÁLEZ, E.; KRÜGER, E. Evaluating the potential of an indirect evaporative passive cooling system for Brazilian dwellings. **Building and Environment** 87, 2015, pp. 265-273.

HAY, H.R.; YELLOTT, J.I. International aspects 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.

KRÜGER, E.; GIVONI, B. Thermal monitoring and indoor temperature predictions in passive solar building in an arid environment. **Building and Environment** 43, 2008, pp. 1792-1804.

KRÜGER, E.; GONZÁLEZ, E.; GIVONI, B. Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate. **Building and Environment** 45, 2010, pp. 1422–1433.

LABEEE. https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos

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.

ÜRGE-VORSATZ, D.; CABEZA, L.; SERRANO, S.; BARRENECHE, C.; PETRICHENKO, K. Heating and cooling Energy trends and drivers in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 41 (2015) 85–98.

YOSHINOA, H.; HONGB, T.; NORDC, N. IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings - Analysis and evaluation methods. **Energy and Buildings** 152 (2017) 124–136.

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.

AGRADECIMIENTOS

Esta pesquisa é realizada no âmbito do EDITAL Nº 11/2018 - PROPPG - Professor Visitante (PV) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, Brasil. A pesquisa recebeu também financiamentos internos da universidade (Edital 4K) e utilizou recursos do Edital Universal CNPq 2016.