2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais

Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

AVALIAÇÃO DO PONTENCIAL DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO INDIRETO NO CLIMA QUENTE E ÚMIDO E SEMI-ÁRIDO

Amorim, Rafael P. L. (1); Leder, Solange M. (2); González-Cruz, Eduardo (3)

(1) IFPB, rafael.ponce@ifpb.edu.br
(2) UFPB, solangeleder@yahoo.com.br
(3) UTFPR, edugoncruz@gmail.com

RESUMO

O resfriamento evaporativo indireto é uma estratégia bioclimática que permite a redução da temperatura sem o aumento do conteúdo de vapor de água nos ambientes internos, constituindo uma solução adequada até mesmo para regiões com clima quente e úmido. Neste sentido, esta pesquisa avaliou a aplicabilidade do resfriamento evaporativo indireto como estratégia de climatização passiva em edifícios nas três diferentes zonas climáticas paraibanas (Aw, BSh e As). Inicialmente foi realizada a análise descritiva das variáveis climáticas a partir dos arquivos EPW referentes ao Ano Meteorológico Típico - TMY das cidades de João Pessoa, Cabaceiras e São Gonçalo. Em um segundo momento foi avaliado o desempenho de um Sistema Passivo de Resfriamento Evaporativo Indireto (SPREI) a partir do modelo preditivo proposto por Givoni e Gonzalez (2009). Os resultados demonstraram que a adoção do SPREI como estratégia de condicionamento térmico passivo foi suficiente para eliminar completamente o desconforto térmico por calor nas três cidades estudadas. As temperaturas médias internas foram reduzidas em até 1,5°C em relação as médias externas, enquanto as temperaturas máximas médias foram reduzidas em até 5,7°C.

Palavras-chave: *Arquitetura passiva, teto reservatório, modelo preditivo.*

ABSTRACT

The indirect evaporative cooling is a bioclimatic design strategy that reduces the temperature without increasing the water vapor in indoor environments, it is a worthy solution even for regions with hot and humid climate. This research analyzed the applicability of indirect evaporative cooling as a passive cooling strategy in three different climatic zones of Paraiba (Aw, BSh and As). At first, a descriptive analysis of the climatic variables was carried out from the EPW files, using data from a Typical Meteorological Year (TMY) of the following cities: João Pessoa, Cabaceiras e São Gonçalo. Then, the performance of a Passive Indirect Evaporative Cooling System (SPREI) was analyzed using the predictive formulas proposed by Givoni and Gonzalez (2009). The results showed that the use of SPREI as a passive cooling strategy was sufficient to eliminate the warm discomfort in the three cities investigated. The means indoors temperatures were up to 1.5 ° C lower than the means outdoors temperatures, while the means maximums outdoors temperatures were up to 5.7 ° C lower.

***Keywords**: passive architecture, roof pond, predictive formulas.*

1 INTRODUÇÃO

A compreensão da dinâmica das trocas térmicas entre o ambiente externo e o interno é essencial para a concepção da envoltória do edifício adaptada ao clima. É necessário analisar as variações sazonais do clima, as alterações horárias dos fluxos de calor, as características térmicas dos materiais empregados e as necessidades do conforto humano.

Em edifícios predominantemente horizontais, a coberta é o componente da envoltória com maior exposição a abóbada celeste e consequentemente desempenha maior influência nas trocas de calor entre o ambiente interno e externo. De acordo com Tang e Etzion (2005) a coberta pode ser responsável por até metade do ganho térmico do edifício durante o dia devido à maior incidência de radiação solar, a noite o fluxo de calor se inverte em consequência da maior perda de calor por radiação.

Neste sentido, o teto reservatório surge como uma alternativa de condicionamento passivo. A água é um material de baixo custo e possui vantagens em relação aos materiais construtivos convencionais em razão da dinâmica do seu comportamento térmico, pois tem maior calor específico, o movimento convectivo característico dos fluídos resulta em aumento do atraso térmico, além de se beneficiar com o processo de evaporação que implica no resfriamento da lâmina d'água (SPANAKI, 2007).

O teto reservatório consiste em uma estratégia de resfriamento evaporativo indireto, pois o processo evaporativo ocorre na camada externa da envoltória retirando calor do ambiente interno sem aumentar o seu conteúdo de vapor de água. Dessa forma, a adoção dessa estratégia é indicada também em regiões com clima quente e úmido.

Porém, apesar dos benefícios para o controle do ambiente térmico, os sistemas com teto reservatório ainda são pouco estudados. Em revisão realizado por Sharif e Yamagata (2015), foram identificados setenta estudos com teto reservatório distribuídos por 17 países. Apenas 10 estudos foram realizados nos climas equatoriais, sendo oito em clima do tipo As e dois em clima do tipo Aw.

No Brasil, as pesquisas sobre resfriamento evaporativo indireto utilizando teto reservatório são recentes. Os estudos iniciais foram realizados com base no método preditivo proposto por Givoni e Gonzalez (2009) aplicado inicialmente aos dados climáticos de quatro cidades do Nordeste brasileiro: Teresina, Petrolina, Fortaleza e Natal por Cruz e Krüger (2013) e em seguida, aos dados dos 411 municípios brasileiros que dispõem de arquivos climáticos por González Cruz, Krüger e Giordano (2014). Apenas dois estudos experimentais foram realizados no território brasileiro, o primeiro desenvolvido na cidade de Florianópolis/SC por González Cruz et al. (2014) e o segundo na cidade de Curitiba/PR por Krüger et al (2016).

Neste sentido, o presente estudo pretende contribuir com a discussão sobre a viabilidade da aplicação do teto reservatório como estratégia passiva de condicionamento térmico. Resulta da etapa inicial de um estudo que visa avaliar a aplicabilidade do resfriamento evaporativo indireto como estratégia de climatização passiva em edifícios nas diferentes zonas climáticas paraibanas. Para este estudo, adotou-se o modelo preditivo proposto por Givoni e Gonzalez (2009) para avaliar o

desempenho de um Sistema Passivo de Resfriamento Evaporativo Indireto (SPREI) em três cidades paraibanas.

2 A "VIVIENDA BIOCLIMÁTICA PROTOTIPO"

A "*Vivienda Bioclimática Prototipo*" VBP-1 é uma habitação térrea projetada para famílias de baixa renda na cidade de Maracaibo/ Venezuela como parte de uma pesquisa realizada pela Universidade de Zulia em parceria com o setor privado com o objetivo integrar diversas estratégias bioclimáticas e de resfriamento passivo (GONZÁLEZ et al.,2000).

Com uma área construída de 87m^2, a habitação é composta por uma cozinha, uma sala de estar, um banheiro e dois dormitórios. O sistema construtivo utilizado foi o concreto armado, cobertura com vigas e elementos pré-fabricados em concreto leve. As vedações verticais são compostas por blocos de concreto leve e por blocos vazados. Os dois dormitórios são cobertos por um Sistema Passivo de Resfriamento Evaporativo Indireto (SPREI) composto por um teto-reservatório com lâmina d'água entre 3 e 4 cm de espessura, confeccionada em chapa metálica.

A partir do monitoramento térmico do ambiente externo e dos dormitórios foi possível estabelecer equações preditivas do desempenho térmico do SPREI de acordo com o procedimento descrito por Givoni e Gonzalez (2009). Estas equações constituíram a base metodológica das avaliações realizadas por Cruz e Krüger (2013) e González Cruz, Krüger e Giordano (2014) e embasam o presente estudo.

3 METODOLOGIA

Este estudo foi realizado em duas etapas sequenciais com o objetivo de avaliar o potencial da adoção do resfriamento evaporativo indireto como estratégia de adequação térmica dos edifícios nas diferentes zonas climáticas paraibanas.

A primeira etapa consiste na análise descritiva das variáveis: temperatura do ar, umidade relativa do ar, potencial de resfriamento evaporativo e percentual de horas em conforto e desconforto térmico considerando o modelo adaptativo proposto pela ASHARE 55 (2017). Teve como ponto de partida o tratamento dos dados climáticos disponibilizados por Roriz (2012) em formato EPW referente ao Ano Meteorológico Típico - TMY das cidades de João Pessoa, Cabaceiras e São Gonçalo, representativas das três diferentes zonas climáticas existentes na Paraíba.

Na segunda etapa foi realizada a análise do resfriamento evaporativo indireto a partir do método proposto por Givoni e Gonzalez (2009) que consiste na aplicação de equações preditivas desenvolvidas para o SPREI com base nos dados monitorados durante nove meses em um experimento realizado na cidade de Maracaibo/ Venezuela.

No estudo original foram propostas diferentes equações para os dormitórios sul (DS) e norte (DN), além da inclusão da variável "*use*", referente à presença ou ausência de usuários nos dormitórios, da variável "*water*" referente à presença ou ausência de água no reservatório, e da variável "*fans*", referente ao acionamento de exaustores de ar. Para esta pesquisa adotou-se a equação relativa ao DN sem a presença de usuários e o teto reservatório com água, sem acionamento dos exaustores. Dessa forma, as equações utilizadas foram simplificadas:

$$Pond = 3{,}67 + 0{,}6449*WBT + 0{,}3261*T_{avg} - 0{,}0638*Swing - 1{,}68 \quad (1)$$

$$NB_Max = -1,8 + 0,1616*T_{avg} + 0,5455*Pond + 0,3732*Rn_{Avg} + 0,113*Swing \quad (2)$$

$$NB_Avg = -2,3 + 0,1744*T_{avg} + 0,5319*Pond + 0,381*Rn_{Avg} + 0,0011*Swing \quad (3)$$

$$NB_Min = 1 + 0,5414*Pond + 0,3298*R_{nAvg} + 0,0932*T_{min} - 0,0668*T_{drop} \quad (4)$$

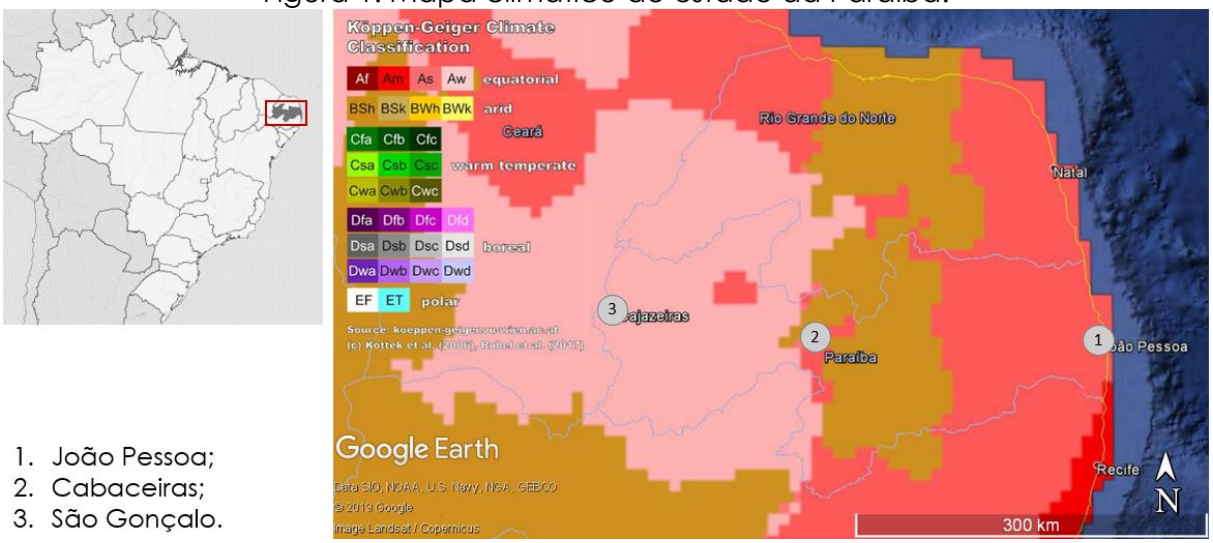
Fonte: Givoni e Gonzalez (2009)

Legenda:
WBT = Temperatura de bulbo úmido
T_{avg} = Temperatura média diária externa
T_{min} = Temperatura mínima diária externa
R_{nAvg} = Temperatura média externa de 10 dias anteriores
Swing = Amplitude da temperatura diária (T_{max}-T_{min})
Pond = Temperatura da água no sistema teto reservatório (1)
T_{drop} = $T_{max(n-1)}$-T_{min} – Diferença de temperatura entre máxima do dia anterior e mínima do dia atual

4 ANÁLISE CLIMÁTICA E DO POTENCIAL DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

Localizado na Região Nordeste brasileira, a Paraíba tem área aproximada de 56.500 km² e é composta por três diferentes zonas climáticas de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger: o Clima Savânico com estação mais seca no verão (As), o Clima Semiárido quente (BSh) e o Clima Savânico com estação mais seca no inverno (Aw). A distribuição dessas regiões climáticas pode ser visualizado na Figura 1, assim como os limites Leste com o oceano Atlântico, Norte com o Rio Grande do Norte, Oeste com o Ceará e Sul com Pernambuco.

Figura 1: Mapa climático do estado da Paraíba.



Fonte: Imagem adaptada pelos autore de imagem gerada no Google Earth (2019) a partir de arquivo de dados climáticos disponibilizado em http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/applications.htm

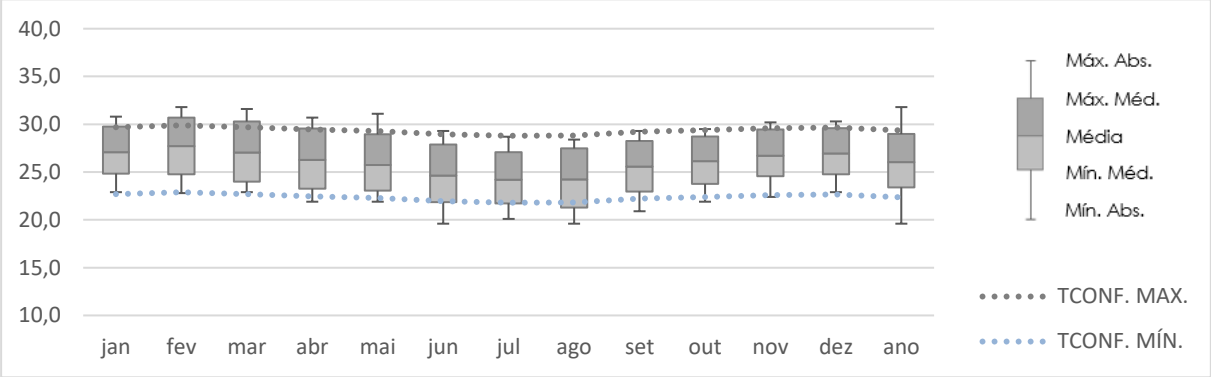
Com intuito de caracterizar as três zonas climáticas existentes, optou-se por avaliar três cidades paraibanas, João Pessoa, Cabaceiras e São Gonçalo, representativas respectivamente dos climas As, BSh e Aw.

4.1 João Pessoa

Representativa do clima do tipo As, João Pessoa está localizada no litoral paraibano, latitude 7°16'S, a uma altitude de 34 metros acima do nível do mar. Na Figura 2 observa-se a variação da temperatura do ar ao longo do ano, destacando-se os valores mensais referente à máxima absoluta, média máxima, média, média mínima

e mínima absoluta, além da delimitação dos limites da zona de sensação de conforto térmico. Observa-se que a variação de temperatura do ar é baixa durante todo o ano, os valores médios mensais variam entre 24,2°C (julho) e 27,7°C (fevereiro), com amplitudes médias entre 4,8°C e 6,3°C. A maior média máxima mensal de temperatura foi registrada em fevereiro, 31,8°C, e a mínima mensal mais baixa foi de 19,6°C ocorrendo nos meses de junho e agosto.

Figura 2: Variação de temperatura anual na cidade de João Pessoa/PB (máxima absoluta, média máxima, média, média mínima e mínima absoluta).



Fonte: Os autores

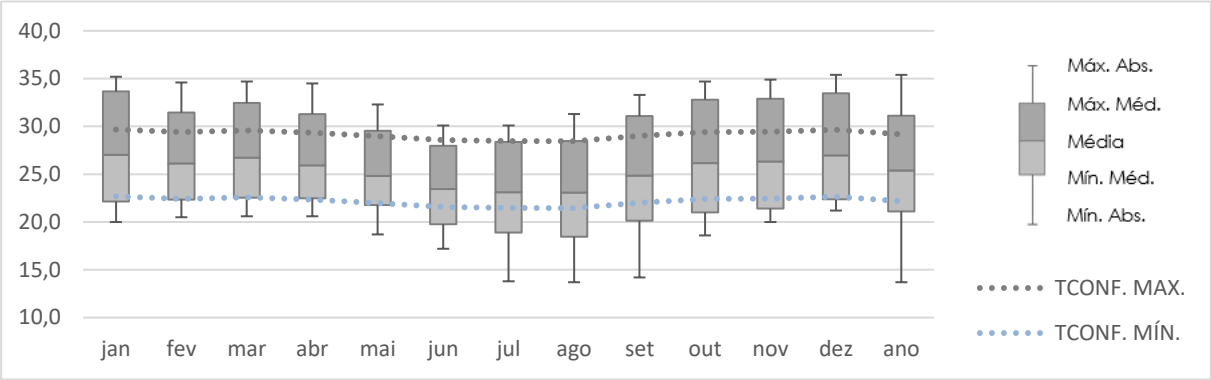
Considerando o modelo adaptativo proposto pela ASHARE 55 (2017), 91% dos horários analisados encontram-se dentro da zona de satisfação com o ambiente térmico, 5% na zona de desconforto por calor e 4% desconforto por frio. Fevereiro, março e abril formam o trimestre com maior percentual mensal de desconforto por calor (15%, 17% e 11%), enquanto junho, julho e agosto registram os maiores índices de desconforto por frio (9%, 12% e 16%). Quanto aos horários de ocorrência, têm-se que 97% dos horários em desconforto térmico por calor ocorrem no período entre 10:00h e 15:00h e 88% do desconforto térmico por frio ocorrem no período entre 1:00h e 6:00h.

A umidade relativa do ar mensal média varia entre 71% (novembro) e 83% (maio). Em relação ao potencial de resfriamento evaporativo ou "*wet bulb temperature depression*" (DWBT), calculado pela diferença entre a temperatura de bulbo seco (TBS) e a temperatura de bulbo úmido (TBU), constatou-se que o valor médio anual foi 3,2°C, porém, se considerado apenas o período de maior desconforto térmico por calor, quando o resfriamento evaporativo se torna mais necessário, entre 10:00 e 15:00h, o valor médio de DWBT foi 4,9°C.

4.2 Cabaceiras

O município de Cabaceiras localiza-se na região do cariri paraibano, tem latitude de 7°48'S e altitude de 392 metros, é representativo do clima BSh e registra um dos menores índices pluviométricos do país. Na Figura 3 observa-se a variação de temperatura do ar durante o ano, os valores médios mensais variam entre 23,1°C (julho e agosto) e 27°C (janeiro e dezembro), com amplitudes médias entre 7,8°C (maio) e 11,8°C (outubro). A maior temperatura média máxima mensal obtida foi 35,4°C (dezembro) e a mínima mensal mais baixa foi 13,7°C (agosto).

Figura 3: Variação de temperatura anual na cidade de Cabaceiras/PB (máxima absoluta, média máxima, média, média mínima e mínima absoluta).



Fonte: Os autores

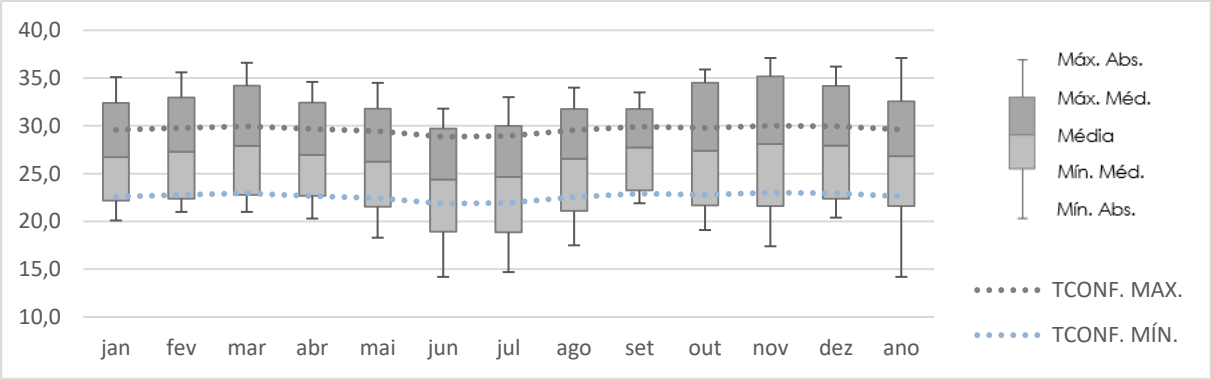
Em relação as condições de conforto térmico, constatou-se que 63% dos horários encontram-se dentro da zona de satisfação com o ambiente térmico, 19% na zona de desconforto por calor e 18% desconforto por frio. Novembro, dezembro e janeiro formam o trimestre com maior percentual mensal de desconforto por calor (28%, 29% e 30%), enquanto julho, agosto e setembro registram os maiores índices de desconforto por frio (35%, 38% e 30%). Quanto aos horários de ocorrência, têm-se que o período entre 10:00h e 15:00h corresponde a 77% dos horários em desconforto térmico por calor e o período entre 1:00h e 6:00h é responsável por 75% do desconforto térmico por frio.

A umidade relativa do ar mensal média variou entre 61% em janeiro e 81% em maio. O valor médio anual do DWBT foi 4,4°C, porém, quando considerado apenas o período entre 10:00 e 15:00h, o valor médio do DWBT foi 8,3°C. Quando considerado apenas o trimestre com maior percentual de desconforto térmico no período de 10:00 às 15:00 o valor médio do potencial de resfriamento evaporativo foi 10,8°C.

4.3 São Gonçalo

O município de São Gonçalo está inserido na região do alto sertão da Paraíba, tem latitude de 6°84'S e altitude de 237 metros, é representativo do clima Aw. Observa-se na Figura 4 a variação de temperatura do ar durante o ano, os valores médios mensais variam entre 24,4°C (junho) e 28,1°C (novembro), com amplitudes médias entre 8,5°C (setembro) e 13,6°C (novembro). A temperatura média máxima mensal é 37,1°C (novembro) e 14,2°C (junho) a mínima mensal.

Figura 4: Variação de temperatura anual na cidade de São Gonçalo/PB (máxima absoluta, média máxima, média, média mínima e mínima absoluta).



Fonte: Os autores

Ao avaliar as condiões do ambiente térmico, constata-se que 63% dos horários analisados encontram-se dentro da zona de satisfação com o ambiente térmico, 25% na zona de desconforto por calor e 12% desconforto por frio. Outubro, novembro e dezembro compõem o trimestre com maior percentual mensal de desconforto por calor (31%, 33% e 31%), enquanto maio, junho e julho registram os maiores índices de desconforto por frio (14%, 23% e 23%). Quanto aos horários de ocorrência, têm-se que o período entre 10:00h e 15:00h corresponde a 72% dos horários em desconforto térmico por calor e o período entre 1:00h e 6:00h é responsável por 83% do desconforto térmico por frio.

A umidade relativa do ar mensal média variou entre 52% (setembro) e 76% (abril). O valor médio anual do potencial de resfriamento evaporativo foi 5.3°C. Considerando apenas o período das 10:00 às 15:00h, o valor médio anual de DWBT foi 9,0°C e 11,1°C se considerado apenas o trimestre com maior percentual de desconforto térmico.

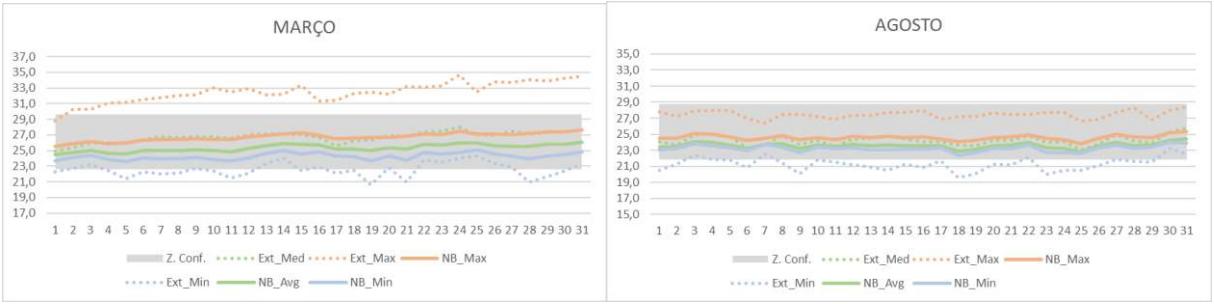
5 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO RESFRIAMENTO

A análise da eficiência do resfriamento evaporativo indireto foi realizada a partir da aplicação das equações preditivas do SPREI desenvolvidas por Givoni e Gonzalez (2009) aos dados climáticos de três cidades paraibanas. Para cada dia do ano foram calculados os valores de temperatura média da água no teto reservatório (Pond) e das temperaturas máximas, média e mínimas no dormitório (NB). Visando a verificação da eficiência do sistema foram calculadas as diferenças entre as temperaturas externas e internas.

Entre as cidades analisadas, João Pessoa obteve o menor potencial de resfriamento evaporativo devido ao clima predominantemente quente e úmido. Ainda assim, a utilização do SPREI demonstrou ser uma estratégia eficiente na mitigação dos extremos climáticos. A temperatura média interna anual foi cerca de 0,7°C inferior à média externa. A diferença média entre os valores máximos de temperatura do ar foi 2,7°C, e a diferença máxima absoluta alcançou 4,3°C. A amplitude térmica diária média interna foi 1,5°C e a externa 5,6°C (fator decremental = 0,26).

A redução da amplitude diária da temperatura foi uma contribuição importante para o alcance do conforto térmico, observa-se na Figura 5 as temperaturas máximas, médias e mínimas diárias nos meses de maior desconforto térmico por calor (março) e por frio (agosto). As temperaturas máximas internas ficaram próximas às médias externas, registrando valores compatíveis com a zona de conforto térmico.

Figura 5: Temperatura máxima, média e mínima no DN e no ambiente externo nos meses com maior desconforto por calor (março) e por frio (agosto), com limites da zona de conforto de referência, em João Pessoa.

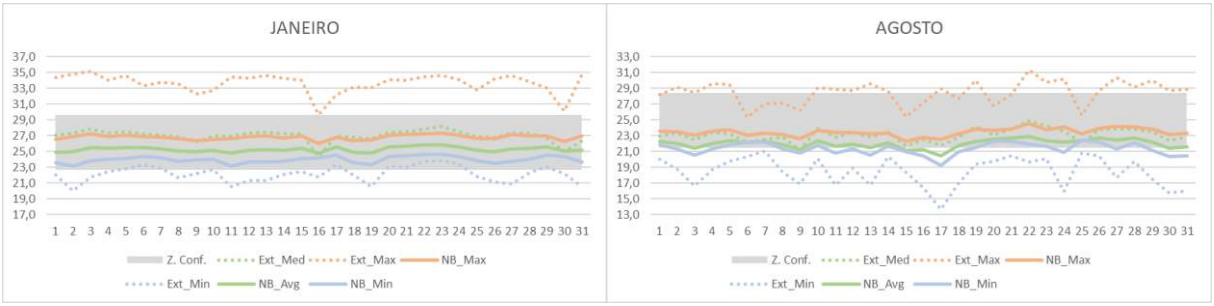


Fonte: Os autores

Na cidade de Cabaceiras, o efeito do resfriamento evaporativo promovido pelo SPREI foi mais acentuado. A temperatura média interna anual foi aproximadamente 1,2°C inferior à média externa. A diferença média entre os valores máximos de temperatura do ar foi 5,6°C e a diferença máxima absoluta alcançou 7,3°C. A amplitude térmica diária média interna foi 2,3°C e a externa 11,8°C (fator decremental = 0,23).

Observa-se na Figura 6 que os valores máximos e mínimos de temperatura foram neutralizados. Até mesmo em janeiro, mês que registrou o maior percentual em condições de desconforto para o calor, 31%, a utilização do SPREI possibilitou condições térmicas de conforto em 100% dos horários avaliados.

Figura 6: Temperatura máxima, média e mínima no DN e no ambiente externo nos meses com maior desconforto por calor (janeiro) e por frio (agosto), com limites da zona de conforto de referência, em Cabaceiras.

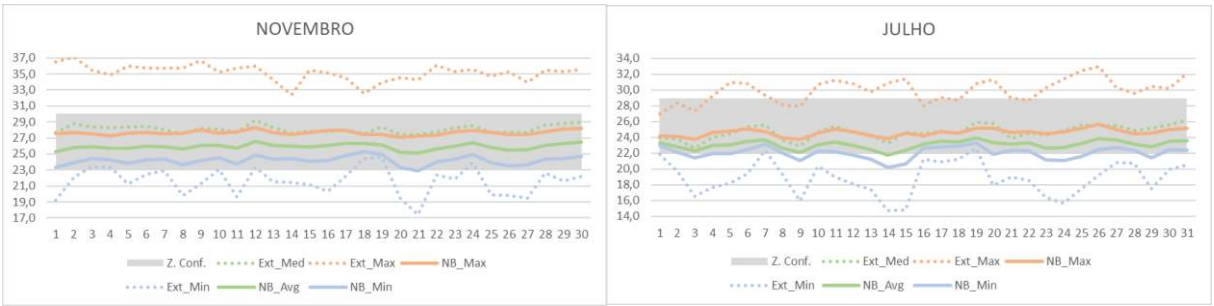


Fonte: Os autores

Por fim, na cidade de São Gonçalo o SPREI demonstrou ser bastante eficiente em reduzir os extremos climáticos e propiciar condições de conforto térmico. A temperatura média interna anual foi aproximadamente 1,5°C inferior à média externa. A diferença média entre os valores máximos de temperatura do ar foi 5,7°C e a diferença máxima absoluta alcançou 9,4°C. A amplitude térmica diária média interna foi 2,8°C e a externa 11,0°C (fator decremental = 0,25).

Na Figura 7 pode-se observar que a temperatura máxima diária durante o mês de novembro supera constantemente 35°C no ambiente externo, registrando máxima absoluta de 37,1°C. Porém, apesar dos valores elevados de temperatura em que 33% dos horários corresponde às condições climáticas de desconforto por calor, o SPREI demonstrou ser capaz de propiciar um ambiente térmico confortável em 100% dos horários.

Figura 7: Temperatura máxima, média e mínima no DN e no ambiente externo nos meses com maior desconforto por calor (novembro) e por frio (julho), com limites da zona de conforto de referência, em São Gonçalo.



Fonte: Os autores

6 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou inicialmente o potencial do resfriamento evaporativo em três cidades representativas das diferentes zonas climáticas paraibanas. Constatou-se que o potencial do resfriamento evaporativo ou "*wet bulb temperature depression*" (DWBT) anual na cidade de João Pessoa foi de 3,2°C, porém quando considerado apenas o trimestre com maior percentual de horários em desconforto térmico por calor, esse valor foi de 4,9°C. Nas cidades de Cabaceiras e São Gonçalo, os valores de DWBT anuais foram respectivamente 8,3°C e 9,0°C e 10,8°C e 11,1°C quando considerado apenas o trimestre com maior percentual horário em desconforto térmico.

Em seguida, as fórmulas preditivas desenvolvidas para o SPREI utilizado no VBP-1 foram aplicadas aos dados climáticos das cidades estudadas. Foi constatada a capacidade do sistema em reduzir as temperaturas médias internas em relação às externas, que foi de 0,8°C em João Pessoa, 1,2°C em Cabaceiras e 1,5°C em São Gonçalo. Considerando os valores máximos médios de temperatura, obteve-se uma redução de 2,7°C em João Pessoa, 5,6°C em Cabaceiras e 5,7°C em São Gonçalo.

A análise de conforto térmico permite concluir que a aplicação do SPREI no território paraibano é bastante indicada. O sistema estudado possibilitou a eliminação completa da ocorrência de desconforto térmico para o calor, restando apenas alguns momentos em desconforto para o frio entre 0:00 e 5:00, porém, observa-se que devido à magnitude e ao horário de ocorrência, a sensação de conforto térmico pode ser facilmente restaurada por adaptações simples dos usuários ao ambiente térmico.

REFERÊNCIAS

ASHRAE Standard 55 (2017). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA, 2017.

CRUZ, E. M. G.; KRUGER, E. L. Enfriamento evaporativo indirecto: predicción del comportamiento térmico en ciudades brasileñas. ENCAC. Brasília: v.12, p.45-54, 2013.

GONZÁLEZ CRUZ, E. et al. Estudo experimental com sistemas de resfriamento passivo em Florianópolis. ENTAC, Maceió: v.15, 2014.

GONZÁLEZ CRUZ, E.; KRUGER, E.; GIORDANO, D. E. Estudo da aplicabilidade de um sistema de resfriamento evaporativo indireto para otimização do conforto térmico em residências no território brasileiro. ENTAC, Maceió: v.15, 2014.

GONZÁLEZ E, MACHADO MV, RODRÍGUEZ L, LEÓN G, SOTO MP, ALMAO N. VBP-1: A Sustainable Urban House for Low-Income Family in a Tropical Climate. PLEA 2000. Cambridge, UK, 2000.

GIVONI, B.; GONZALEZ, E. Thermal perfomance of indirect evaporative cooling in a tropical climate. ASES CONFERENCE. Buffalo, Buffalo, Nova Iorque. 2009

KRÜGER, E. et al. Avaliação do potencial de resfriamento de um sistema teto reservatório para condições subtropicais. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 107-125, 2016.

RORIZ, M. Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros. São Carlos: ANTAC, 2012.

SPANAKI, A. Comparative studies on different type of roof ponds for cooling purposes: literature review. 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century. Grécia, p. 1009-1015, 2007.

TANG, R.; ETZION, Y. Cooling performance of roof ponds with gunny bags floating on water surface as compared with a movable insulation. Renewable energy, v. 30, n. 9, p. 1373-1385, 2005.