

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE EDIFICAÇÃO-TESTE COM SISTEMA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO INDIRETO ACOPLADO A PAINÉIS RADIANTES¹

FERNANDES, L., Universidade Federal do Paraná (UFPR), e-mail: fernandes.ufpr@gmail.com, KRÜGER, E., Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: ekruger@utfpr.edu.br

ABSTRACT

The study was carried in a test-building, which was cooled by a roof pond coupled to radiant cooling panels. The location is arid and monitoring took place during summer 2017. Different configurations were compared to a base-case without any passive strategies. Configurations encompassed: shading, use of a roof-pond with or without floating insulation, coupling with radiant cooling panels, use of sprinklers. Results allowed us to determine the best configuration of the roof-pond/radiant cooling system.

Keywords: roof pond, passive cooling, radiant cooling.

1 INTRODUÇÃO

Uma tecnologia para condicionamento passivo aplicada em coberturas e ainda pouco explorada no Brasil é o Teto-Reservatório (TR). O termo denomina sistemas que incorporam sobre a cobertura um tanque d'água para estocar, trocar ou dissipar calor (ERELL; YANNAS; MOLINA, 2006). O TR pode estar em contato direto com o ambiente abaixo ou separado deste. Propicia inércia térmica nos períodos de grande amplitude térmica diária e ainda pode atuar no resfriamento em períodos quentes e no aquecimento em situação de frio.

O acoplamento de TR à utilização de painéis radiantes no ambiente interno por sistema de tubulação traz vantagens em relação ao uso da própria estrutura na regulação do ambiente térmico, uma vez que se reduzem as perdas por distribuição do resfriamento gerado (LI et al., 2015). Ao contrário dos sistemas de ar condicionado padrão, o principal mecanismo de trocas térmicas é a transferência de calor por radiação, sem convecção forçada. De fato, a vantagem de sistemas de resfriamento radiantes é a redução do desconforto sem grande movimentação de ar. Imanari et al. (1999) compararam o desempenho do conforto térmico de dois modos de operação de resfriamento de uma sala de reuniões: a partir de painel radiante no teto e por sistema convencional de refrigeração a ar. As respostas dos usuários mostraram que o modo de resfriamento radiante trouxe maior porcentagem de votos em conforto comparativamente ao ar-condicionado, embora as condições térmicas tenham sido equivalentes.

¹ FERNANDES, L.; KRÜGER, E. Avaliação do Desempenho de Edificação-Teste com Sistema de Resfriamento Evaporativo Indireto acoplado a Painéis Radiantes. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

Recentemente, Meggers et al. (2017) apresentaram o conceito do Thermoheliodome, um pavilhão experimental localizado na Universidade de Princeton que “esfria sem ar condicionado”. O sistema opera usando resfriamento evaporativo indireto acoplado a painéis de resfriamento radiante. Uma enquete de conforto no verão mostrou que, apesar de diferenças não significativas na temperatura do ar dentro e fora da área teste, a maioria dos participantes estimou temperaturas mais baixas dentro da instalação, o que reflete o frescor percebido devido ao resfriamento radiante.

O presente trabalho avalia a eficiência de sistema TR implantado sobre edificação-teste sob condições de verão em região de clima árido. O TR possui acoplamento a painéis radiantes suspensos sob o teto.

2 MÉTODO

2.1 Clima local

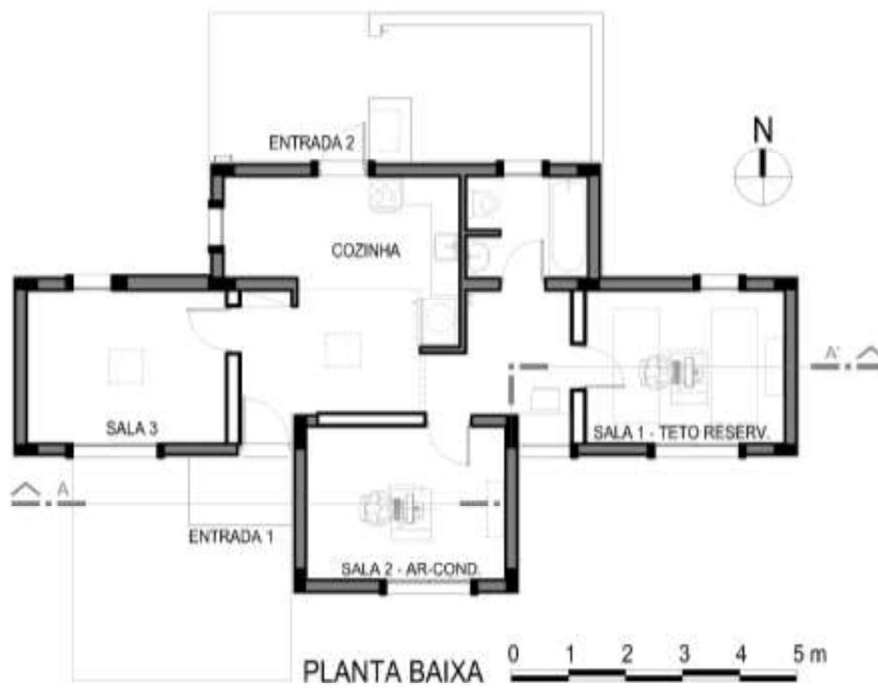
Sde Boqer está localizada a 478 metros acima do nível do mar e ao sul de Israel (Latitude 30,8°N). O clima caracteriza-se por fortes flutuações térmicas diárias e sazonais, ar seco e céu limpo com radiação solar intensa. No verão, a temperatura máxima média diária é de 32°C e a mínima média diária é de 17°C. A irradiância global é de 7,7kWh/m² por dia durante junho e julho (BITAN; RUBIN, 1991). Na classificação de Köppen-Geiger, a região é uma área de transição entre os climas BWh e BSh (KOTTEK et al., 2006).

2.2 Edificação Experimental

O estudo foi conduzido em uma edificação experimental localizada no Campus Sde Boqer da Ben-Gurion University of the Negev. Foi construída em 1991 para experimentos em resfriamento passivo e controle solar (ERELL; KAFTAN; MOTZAFI-HALLER, 2011).

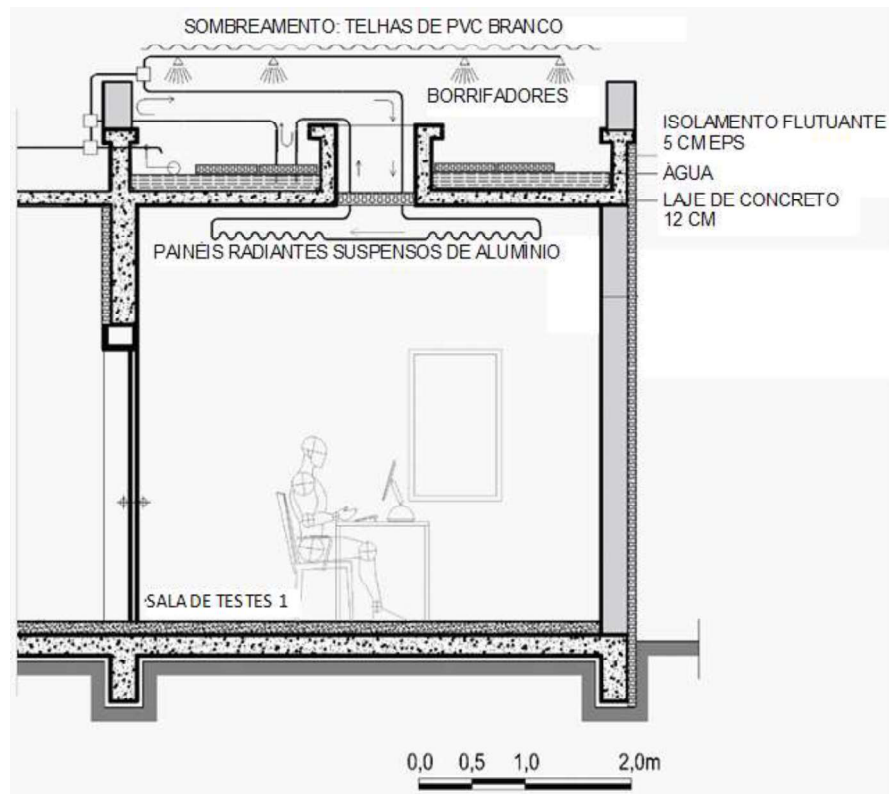
Na edificação-teste (Figura 1), um dos ambientes apresenta sistema teto-reservatório (Sala 1), tendo orientação sul e sendo bem isolado termicamente (ERELL et al., 1993) (Figura 2). O teto (laje de concreto com aproximadamente 10 cm de espessura) e as faces internas das paredes foram pintados de branco (refletância 0,75) e o piso tem refletância 0,45. Uma janela em alumínio com 1,34 m de largura por 1,76 m se localiza no centro da parede, com orientação sul (ERELL; KAFTAN; GARB, 2014), a qual foi mantida parcialmente fechada de modo a propiciar iluminação natural.

Figura 1 - Edificação-Teste



Fonte: os autores

Figura 2 – Corte AA' com detalhamento do sistema TR



Fonte: os autores

2.3 Configurações testadas

As configurações testadas partiram de uma cobertura convencional (Controle), à qual foram acrescentadas paulatinamente medidas visando à melhoria de desempenho térmico.

Configuração 1 (Controle): A cobertura é constituída por laje de concreto com aproximadamente 10 cm de espessura, regularizada e impermeabilizada, revestida com 6 cm de EPS coberto por camada de 3 cm de brita.

Configuração 2: Acrescentou-se à cobertura telhas de PVC, com 2 mm de espessura, sustentadas por uma estrutura de tubos de aço a 1,5 m acima da laje. A área entre as telhas e a laje não possuía vedações laterais, permitindo livre circulação do ar.

Configuração 3: A cobertura recebeu uma “piscina” de plástico branco (o TR) com área de 8,64 m² e uma camada d’água com cerca de 9 cm de profundidade, cuja quantidade evaporada era repostada periodicamente. A circulação da água foi realizada por uma pequena bomba d’água, a partir do TR para dois painéis radiantes de alumínio, cada qual com 1,60 m² de área, os quais estiveram suspensos sob o teto.

Configuração 4: Foram adicionadas sobre a lâmina d’água placas flutuantes de EPS (Poliestireno Expandido Moldado) medindo 50 × 100 cm e com 6 cm de espessura. A área total do TR coberta pelo EPS era de aproximadamente 8,0 m², permanecendo uma área residual de aproximadamente 0,64 m² de água exposta à evaporação.

Configuração 5: Nessa configuração, foram acionados sprinklers sobre o conjunto (TR + placas flutuantes de EPS) durante a noite, borrifando água com ângulo de abertura de aproximadamente 45°, a cerca de 1,0 m da lâmina d’água.

Configuração 6: Idêntica à configuração anterior, porém com borrifadores funcionando ininterruptamente.

Configuração 7: Difere da anterior, pois a circulação d’água entre o reservatório e os trocadores de calor sob o teto foi desligada.

Configuração 8: Foi retirada a camada de EPS flutuante, aumentando a área da superfície de água exposta à evaporação, e reiniciada a circulação de água contínua pelos trocadores de calor.

A Tabela 1 apresenta os períodos de monitoramento, para cada configuração.

Tabela 1 – Períodos e duração dos monitoramentos

Configuração	Período	Total de dias
Configuração 1	De 16/06 a 24/06/2017	9
Configuração 2	De 26/06 a 5/07/2017	10
Configuração 3	De 10/07 a 18/07/2017	9
Configuração 4	De 20/07 a 25/07/2017	6
Configuração 5	De 26/07 a 28/07/2017	3
Configuração 6	De 29/07 a 07/08/2017	10
Configuração 7	De 28/08 a 04/09/2017	8
Configuração 8	De 10/09 a 14/09/2017	4

Fonte: os autores

2.4 Aquisição de dados

Os dados relativos às condições externas foram obtidos da estação meteorológica local. Neste artigo, avaliam-se apenas os dados de temperatura ambiente. A instalação dos equipamentos e sensores na edificação-teste seguiu orientações da norma ISO 7726 (1998). Os dados foram registrados por um datalogger CR23X da Campbell Scientific, ao qual foram conectados 18 sensores de temperatura (termopares Tipo T). Neste artigo, apenas um deles, localizado a 0,6 m do piso (correspondente a uma pessoa sentada) foi avaliado.

2.5 Escolha dos dias de análise

Foi dada preferência para dias de céu claro, em períodos de relativa estabilidade térmica e com grande amplitude térmica diária. Para a escolha destes dias, calculou-se um coeficiente denominado Dia Padrão (DP). Os dias com maior DP foram os adotados para as comparações. O valor DP é calculado pela Equação 1.

$$DP = (Ta_{7h} - Ta_{14h}) - Abs(Ta_{7h} - Ta_{31h}) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Ta_{7h} é a temperatura do ar às 7 horas daquele dia.

Ta_{14h} é a temperatura do ar às 14 horas daquele dia.

Ta_{31h} é a temperatura do ar às 7 horas do dia seguinte.

2.6 Avaliação da estabilidade térmica

Para o clima local, com grande amplitude térmica diária, é importante que a edificação apresente inércia térmica. Para avaliar a capacidade das configurações de resistir às variações da variação térmica externa diária, foi adotado o índice Fator Decremental (FD), o qual pode ser descrito como a amplitude térmica diária relativa, ou seja, a razão entre as amplitudes térmicas diárias interna A_{int} e externa A_{ext} (Equação 2):

$$FD = \frac{A_{int}}{A_{ext}} \quad \text{Equação 2}$$

Quanto menor o FD, maior o potencial de estabilização da temperatura interna e mais alto o desempenho térmico da configuração.

2.7 Verificação de aquecimento e resfriamento

Para análise do desempenho das diversas configurações, foi desenvolvido o “coeficiente de dissemelhança das temperaturas diárias médias” (CD), o qual expressa o quanto a temperatura interna diária média ($T_{int\ méd}$) difere em relação à temperatura externa diária média ($T_{ext\ méd}$), tendo como referência a mínima externa diária ($T_{ext\ mín}$). O coeficiente de dissemelhança é calculado de acordo com a Equação :

$$CD = \left(\frac{T_{int\ méd} - T_{ext\ mín}}{T_{ext\ méd} - T_{ext\ mín}} \right) - 1 \quad \text{Equação 3}$$

Valores positivos denotam aquecimento, negativos resfriamento e próximos a zero uma forte semelhança entre as temperaturas interna e externa (situação de neutralidade térmica).

3 RESULTADOS

Ao todo, foram monitoradas oito diferentes configurações de cobertura, sendo seis caracterizadas como teto-reservatório. Em todas as configurações, o ambiente interno mostrou-se resistente às flutuações térmicas externas.

A média da amplitude térmica diária interna permaneceu sempre abaixo de 1 K e a máxima foi de apenas 1,4 K (Tabela 2). Tais valores contrastam com a média da amplitude térmica diária externa, que chegou a atingir 15,1 K, e, na máxima, 17,6 K. A alteração das configurações de TR mostrou-se irrelevante em relação ao controle da estabilidade térmica interna, pois a edificação, dadas suas características construtivas, atende o requisito de baixa amplitude térmica diária.

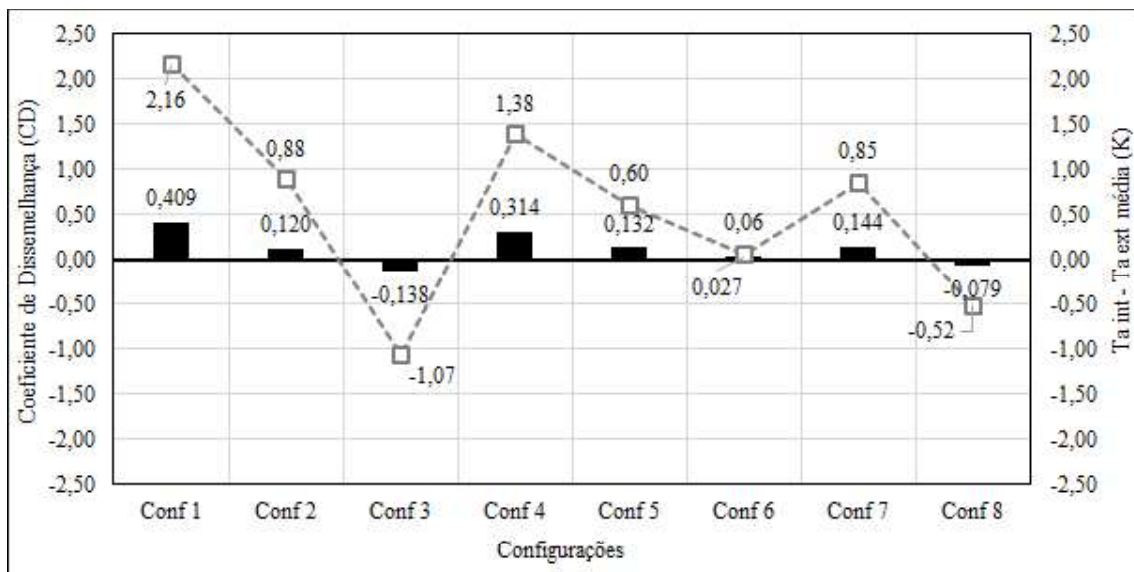
Tabela 2 – Fator decremental (FD) e amplitudes térmicas diárias internas e externas das diferentes configurações

	Amplitude interna média (K)	Amplitude interna máxima (K)	Amplitude externa média (K)	Amplitude externa máxima (K)	FD médio
Configuração 1	0.8	1.0	13.1	17.6	0.06
Configuração 2	0.8	0.9	15.1	16.1	0.05
Configuração 3	0.7	0.9	14.1	17.5	0.05
Configuração 4	0.6	0.6	11.6	12.1	0.05
Configuração 5	1.0	1.4	12.3	13.5	0.08
Configuração 6	0.8	1.2	12.6	14.6	0.06
Configuração 7	0.6	0.9	11.7	14.1	0.05
Configuração 8	0.7	0.9	14.0	15.4	0.05

Fonte: os autores

Quanto ao CD (Figura 3), cinco configurações (1, 2, 4, 5 e 7) resultaram em aquecimento; a Configuração 6, com valor próximo a 0, não resultou nem em aquecimento nem em resfriamento; e somente duas configurações testadas (3 e 8) resultaram em resfriamento. A Figura 3 apresenta, além dos valores do CD para cada configuração, a diferença entre as temperaturas médias internas e as temperaturas médias externas. Destacam-se as diferenças entre as temperaturas médias internas das configurações 1 e 3.

Figura 3 – Coeficiente de dissemelhança (CD) e diferença entre temperaturas internas medidas nas configurações e as temperaturas externas



Fonte: os autores

As configurações com TR, mesmo aquelas menos eficientes, geram melhores condições internas que a cobertura convencional.

A melhor configuração encontrada foi para o TR preenchido e com circulação forçada de água, condições favoráveis associadas à grande superfície de água exposta à evaporação (Configuração 3). As configurações seguintes, com as placas isolantes flutuantes sobre a lâmina d'água, reduziram drasticamente a taxa de evaporação e as trocas térmicas por convecção com o ar externo.

Na última configuração testada, Configuração 8, eliminou-se o isolamento flutuante e mantiveram-se os sprays e a circulação d'água entre o reservatório e os trocadores de calor. Houve saldo de resfriamento, mas os resultados não foram superiores aos apresentados para a Configuração 3. O desempenho inferior deve-se à influência da temperatura da água borrifada sobre o TR, levemente afetada pela proximidade dos sprinklers à cobertura de sombreamento e à exposição da tubulação de água ao sol.

4 CONCLUSÕES

Observou-se que o sombreamento foi de fundamental importância para a redução dos ganhos de calor. É importante avaliar de maneira crítica as vantagens do resfriamento evaporativo frente às medidas disponíveis para simplesmente evitar o aquecimento.

Finalmente, o melhor desempenho foi obtido quando somados os efeitos do sombreamento, da ventilação natural e do resfriamento evaporativo combinado ao uso de trocadores de calor (painéis radiantes) sob o teto. Esta configuração resultou não apenas em maior resfriamento, mas também em um resfriamento estrutural. Ou seja, um ambiente interno com temperaturas superficiais e do ar próximas e com pequena oscilação, descolando-se das condições adversas do clima externo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela concessão de bolsa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE).

REFERÊNCIAS

- BITAN A.; RUBIN S. **Climatic Atlas of Israel for Physical Planning and Design**. Israel: Israel Meteorological Service and Ministry of Energy and Infrastructure, 1991.
- ERELL, E. *et al.* **A Passive Cooling Laboratory Building for Hot-Arid Zones**. Midreshet Ben Gurion: 1993
- _____; KAFTAN, E.; GARB, Y. Daylighting for Visual Comfort and Energy Conservation in Offices in Sunny Regions. In: PLEA2014 - 30th CONFERENCE, PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE. **Anais...** Ahmedabad: 2014
- _____; KAFTAN, E.; MOTZAFI-HALLER, W. **Daylighting for visual comfort and energy conservation in offices in sunny locations**. Midreshet Ben Gurion: BGU, 2011.
- _____; YANNAS, S.; MOLINA, J. L. **Roof cooling techniques: a design handbook**. London: Earthscan, 2006.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **International Standard ISO 7726**. Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities. Geneva, 1998.
- IMANARI T, OMORI T, BOGAKI K. Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system: Comparison with the conventional all-air system. **Energy and buildings**, 30(2), 167-175, 1999.
- KOTTEK, M. *et al.* World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.
- LI R.; YOSHIDOMI T.; OOKA R.; OLESEN B. W. Field evaluation of performance of radiant heating/cooling ceiling panel system. **Energy and Buildings**, 86, 58-65, 2015.

MEGGERS F *et al.* The Thermoheliodome-Air conditioning without conditioning the air using radiant cooling and indirect evaporation. **Energy and Buildings**, 157, 11-19, 2017.