

## **ESTUDO DO POTENCIAL DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO INDIRETO NO CLIMA DE CURITIBA**

**Leandro C. Fernandes (1); Sérgio C. Lange (2); José Mario V. Grzybowski (3)  
Eduardo L. Krüger (4).**

(1) Arquiteto, Doutorando do PPGTE-UTFPR, Professor da UFPR, fernandes.ufpr@gmail.com.

(2) Eng. Mecânico, Mestrando do PPGTE-UTFPR, sc\_lange@hotmail.com.

(3) Matemático, Doutor, Professor do PPGCTA-UFFS, jose.grzybowski@uffs.edu.br.

(4) Eng. Civil, Doutor, Professor do PPGTE-UTFPR, ekruger@utfpr.edu.br.

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Sete de Setembro, 3165, Rebouças, Curitiba – PR, CEP 80230-901, Tel.: (41) 3082-0065.

### **RESUMO**

A preocupação com a eficiência energética das edificações tem estimulado o desenvolvimento de estratégias passivas para condicionamento térmico. Dentre estas alternativas cita-se: o Resfriamento Evaporativo Direto (RED), baseado na aspersão de água sob a forma de gotículas no interior dos ambientes; e o Resfriamento Evaporativo Indireto (REI), caracterizado pela umidificação de coberturas e por produzir resfriamento sem aumentar a umidade relativa do interior da edificação. Este estudo tem por objetivo avaliar a aplicação de uma forma particular de REI (que alia o resfriamento evaporativo à inércia térmica propiciada por um reservatório d'água) para o condicionamento térmico de ambientes em meses relativamente quentes do clima de Curitiba, cidade inserida na Zona Bioclimática 1. Foram confeccionados, monitorados e comparados dois protótipos em escala reduzida: um Módulo de Controle (MC) e um Módulo Experimental (ME), sendo que o ME foi dotado de uma cobertura estanque constituída de um reservatório d'água sujeita à evaporação. O estudo mostrou a efetividade do sistema para o período testado, indicando que oferece alto potencial de resfriamento, superior ao esperado e ao verificado em experimento realizado em Florianópolis, Zona Bioclimática 3. Também mostrou-se que os resultados positivos não são devidos exclusivamente à evaporação, e sim à combinação com a massa térmica propiciada pelo reservatório d'água.

Palavras-chave: resfriamento passivo, resfriamento evaporativo indireto, arquitetura bioclimática.

### **ABSTRACT**

The need for energy efficiency in buildings has encouraged the development of passive strategies for indoor air-conditioning. Among the alternatives are the direct evaporative cooling (DEC) based on sprinkling water indoors in the form of droplets and the indirect evaporative cooling (IEC), characterized by the use of wetted roof or wall surfaces for cooling without increasing the indoor air moisture. This study aims to evaluate the use of a particular form of IEC (which combines evaporative cooling and thermal mass brought about by a water reservoir) for indoor thermal control in relatively warm months in Curitiba, located within Bioclimatic Zone 1. Two scale models were built, monitored and compared between each other: a control module (CM) and an experimental module (EM), the latter provided with a water container for promoting evaporation. The study showed the effectiveness of the system for the test period, indicating that it offers a higher than expected cooling potential and more promising results than those obtained for Florianópolis, Bioclimatic Zone 3. Results suggest that thermal benefits are not only from evaporative cooling but due to the combined effect with thermal mass.

Keywords: passive cooling, indirect evaporative cooling, bioclimatic architecture.

## 1. INTRODUÇÃO

Parte significativa do consumo energético de uma edificação ocorre para satisfazer necessidades humanas de aquecimento, resfriamento e iluminação (CUNHA, 2006). O consumo pode ser maior ou menor conforme o projeto arquitetônico tira partido do clima no qual a edificação está inserida e utiliza tecnologias de baixo consumo energético. Olgyay (2008, p.10), quando relaciona arquitetura, clima e necessidades humanas, argumenta que “o processo lógico é trabalhar com as forças da natureza e não contra elas, aproveitando suas potencialidades para criar condições de vida adequadas”.

A preocupação com a eficiência energética das edificações torna-se maior se considerarmos que a energia elétrica brasileira está cada vez mais “suja”. Devido às condições hidrológicas desfavoráveis, em 2012 e 2013 houve redução da oferta de energia hidráulica. Em 2012 o decréscimo foi de 1,9% (EPE, 2013) e em 2013 de 5,4% (EPE, 2014). A menor oferta hídrica explica o recuo da participação de renováveis (hidráulica + eólica + biomassa) na matriz elétrica, de 88,9% em 2011 para 79,3% em 2013, apesar do permanente incremento na potência instalada do parque hidrelétrico.

Esse contexto leva a pesquisa na área do ambiente construído a buscar alternativas tecnológicas de baixo consumo energético. Em se tratando do condicionamento térmico em edificações, o resgate e o aprimoramento das tecnologias passivas são uma aposta positiva.

Dentre as tecnologias de baixo consumo energético para condicionamento térmico cita-se o resfriamento evaporativo. Este possui duas vias, o resfriamento evaporativo direto e o indireto.

O Resfriamento Evaporativo Direto (RED) é cada vez mais conhecido e utilizado no Brasil. Baseia-se em dispositivos eletromecânicos de ventilação forçada com aspersão de água sob a forma de gotículas no interior dos ambientes. “O ar cede calor sensível e as gotículas de água passam do estado líquido para o gasoso no ambiente interno e, como consequência, há decréscimo da temperatura e acréscimo da umidade relativa do ar” (VECCHIA; MASIERO, 2006). Esta alternativa tecnológica vem se popularizando rapidamente e avançam estudos sobre seu potencial (SILVA, 2004; BATISTA e LAMBERTS, 2007).

O Resfriamento Evaporativo Indireto (REI), caracterizado pela umidificação de coberturas (telhas metálicas, de fibrocimento, cerâmica ou concreto) também vem ganhando espaço no mercado e sendo objeto de estudos que apontam bons resultados (CAVALCANTI e PRADO, 2001; CAVALCANTI, 2001; LABAKI, TEIXEIRA e TAVARES, 2005; NASCIMENTO, 2005; LABAKI e TEIXEIRA, 2006; RORIZ e RORIZ, 2008). Dentre as diferenças em relação ao RED, está o fato do sistema REI produzir resfriamento sem aumentar a umidade relativa do interior da edificação, com vantagens no trópico-úmido.

Buscando explorar as vantagens do REI convencional, agregar outras e verificar outros arranjos possíveis, GONZALEZ apresenta uma nova configuração para o sistema (GONZALEZ; GONZALEZ-GARCIA, 2013), que chama de “*Sistema Pasivo de Enfriamiento Evaporativo Indirecto*” (SPEEI). A ideia é, ao invés de uma cobertura convencional ser molhada, cobrirem-se os ambientes a serem resfriados com um teto estanque, o qual armazena água. Esta configuração permite aumentar a inércia térmica da edificação e explorar o resfriamento evaporativo, podendo inclusive se utilizar do resfriamento radioativo noturno. A proposta é resultado de uma série de experimentos passados, e, contrariando as expectativas, o SPEEI implantado apresentou bons resultados mesmo para o clima quente e úmido de Maracaibo, na Venezuela (GONZALEZ-GARCIA, 2010).

Dada a qualidade dos resultados, iniciaram-se investigações para a aplicação desta forma particular de REI nos climas brasileiros. A partir da análise do comportamento térmico e de dados do protótipo de uma habitação (*Vivienda Bioclimática Prototipo VBP-1*) construída em Maracaibo, foram desenvolvidas equações preditivas das temperaturas internas máximas, médias e mínimas. As equações foram aplicadas ao clima de quatro cidades do Nordeste brasileiro (Teresina, Petrolina, Fortaleza e Natal), as quais mostraram significativa capacidade de redução das temperaturas internas (GONZALEZ; KRÜGER, 2013). Recentemente, novo estudo teórico baseado nos dados da VBP-1 mostrou que o sistema adapta-se à maior parte do território brasileiro, possibilitando reduzir o consumo de energia em climatização e melhorar as condições de conforto (GONZALEZ; KRÜGER; GIORDANO, 2014). Experimentos com protótipos em escala reduzida também mostraram bons resultados para a diminuição da temperatura máxima e da amplitude térmica para a cidade de Florianópolis, de clima temperado subtropical e verão quente (Cfa), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (GONZALEZ *et al.*, 2014).

Sistemas passivos de resfriamento podem amenizar o desconforto térmico em edificações naturalmente ventiladas em cidades como Curitiba, cujo clima, com grande amplitude térmica anual, apresenta temperaturas do ar desconfortáveis tanto no período de inverno como no de verão.

## 2. OBJETIVOS

Este estudo tem por objetivo avaliar o potencial de um sistema de Resfriamento Evaporativo Indireto (REI) em um período de meses relativamente quentes do clima de Curitiba (outubro e novembro), cidade com clima temperado úmido e verão temperado (Cfb). Para tal, utiliza-se de protótipos construídos em escala reduzida.

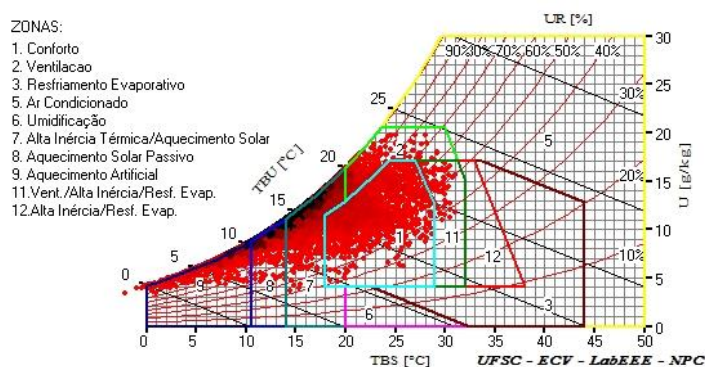
São objetivos específicos do trabalho: analisar e compreender os detalhes de experimentos realizados com protótipos em escala reduzida em Maracaibo e Florianópolis; e avaliar a aplicação dos procedimentos ao contexto de Curitiba.

## 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos utilizados no experimento baseiam-se em trabalhos já realizados na temática: uso de protótipos em escala reduzida e resfriamento evaporativo indireto (KRÜGER *et al.*, 2004; KRÜGER, RORIZ, 2004; GONZALEZ-GARCIA, 2010; GONZALEZ *et al.*, 2014).

### 3.1. Clima de Curitiba

A cidade de Curitiba está localizada na região sul do Brasil. Possui latitude 25° 31' S, longitude 49° 10' W e altitude média de 911m. As normais climatológicas 1961-1990 indicam que, nos meses do trimestre mais quente, a média das temperaturas do ar é de 20°C, com a médias para o mês mais quente (fevereiro) de 21°C; correspondentemente, para fevereiro, a média das máximas é de 26,7°C (INMET, 2015). No Zoneamento Bioclimático Brasileiro, a cidade se insere na Zona Bioclimática 1 (ABNT, 2003), sendo a capital mais fria do país. A carta psicrométrica a seguir apresenta dados do ano climático de referência para Curitiba (Figura 1).



Fonte: Programa Analysis BIO.

Figura 1 – Ano climático de referência para Curitiba

O relatório de saída dos pares de temperatura e umidade do ar para o ano climático aponta para um baixíssimo potencial de aplicação da estratégia de resfriamento evaporativo, sendo este de 1% das horas do ano ou, para o período diurno apenas (6-19hs), de cerca de 2% das horas anuais. Entretanto, sendo o REI em teste em parte responsável por um aumento da massa térmica da cobertura (GONZALEZ *et al.*, 2014), a função do sistema poderia responder ainda pela demanda de aumento de massa térmica para resfriamento; no ano climático, isso corresponderia a um adicional próximo de 2% das horas anuais, período diurno, perfazendo desta forma 4% com ambas as estratégias.

### 3.2. Módulos experimentais

Foram confeccionados dois módulos: um Módulo de Controle (MC) e outro Módulo Experimental (ME), com dimensões idênticas. Utilizou-se compensado naval com 15 mm de espessura. Para resistir melhor às intempéries ambos receberam como base uma camada de verniz marítimo. Posteriormente foram pintados com acrílico esmaltado na cor branca. Internamente as paredes e pisos foram revestidos com uma camada de 4,5cm de poliestireno expandido (EPS).

A diferença entre os módulos está na cobertura. O Módulo de Controle (MC) é coberto por uma chapa de compensado naval com 15 mm de espessura mais 150 mm de EPS. O Módulo Experimental (ME), ao invés de um tamponamento, foi coberto com uma bacia metálica de base quadrada para armazenamento da água para o processo de evaporação (Figura 1).

Buscou-se replicar os módulos conforme os confeccionados por GONZALEZ *et al.* (2014) em seu Experimento 1 (Exp-1), no entanto, devido às dificuldades durante a execução e visando maior durabilidade dos módulos, ocorreram algumas pequenas diferenças: ao invés de madeira compensada simples, utilizou-se compensado naval; ao invés de sombrear o ME com chapa de compensado de 15 mm, utilizou-se compensado naval de 10 mm; os módulos originais foram confeccionados com chapas de 18 mm, aqui utilizou-se chapas de compensado naval de 15 mm. No entanto, as espessuras das chapas de EPS e o volume de ar interno correspondem aos do experimento original. A alteração na espessura das chapas de compensado levou a uma leve diferença entre os experimentos em se tratando da transmitância térmica das paredes dos módulos (os módulos de GONZALEZ *et al.* (2014) apresentam  $U=0,717 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  enquanto os módulos deste experimento apresentam  $U=0,707 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ).

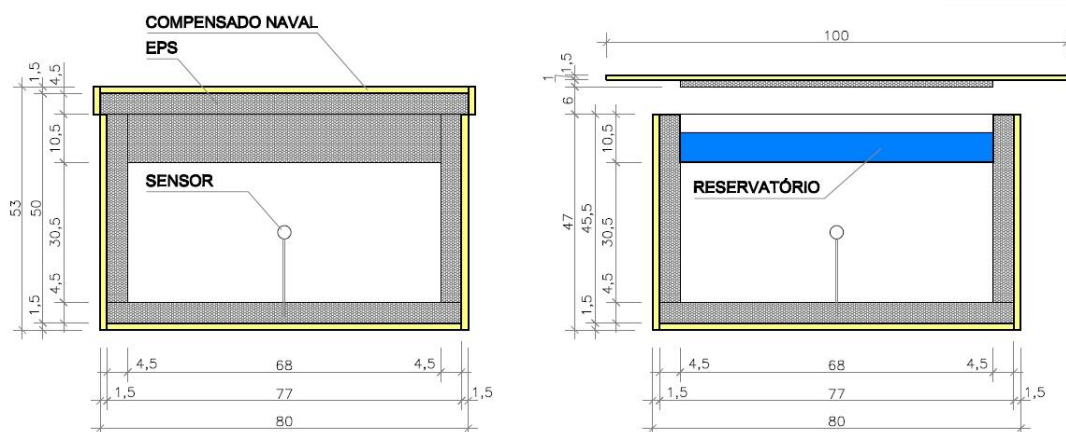


Figura 2 – Módulo de controle (MC) e módulo experimental (ME)

A bacia foi confeccionada com chapa de aço galvanizado de espessura 1,2 mm, recebeu ainda uma camada de tinta epóxi para prevenir ferrugem e em seguida foi pintada com tinta acrílica branca. Para o experimento, a bacia metálica recebeu uma camada de 6,5 cm de água (resultava em um volume total de 29,18 litros). A bacia com água foi então sombreada com uma placa de compensado naval de 10 mm de espessura, envernizada, pintada na cor branca e revestida em sua face inferior com chapa de EPS de 5 mm de espessura. No ME o espaço de 6 cm entre a caixa e a placa de sombreamento promove uma ventilação permanente no sistema de evaporação, enquanto o sombreamento garante a não incidência de raios solares diretamente sobre a água. A camada de EPS na face inferior da placa de sombreamento foi colocada para minimizar a transferência de calor. O volume de ar existente em ambas as caixas é o mesmo,  $0,14 \text{ m}^3$ .

O local escolhido para o experimento foi um condomínio residencial na região norte de Curitiba, no bairro de Santa Felicidade, onde reside um dos pesquisadores. As caixas foram posicionadas de tal forma que pudessem receber a mesma quantidade de luz solar nas mesmas horas do dia (Figura 3 e Figura 4).

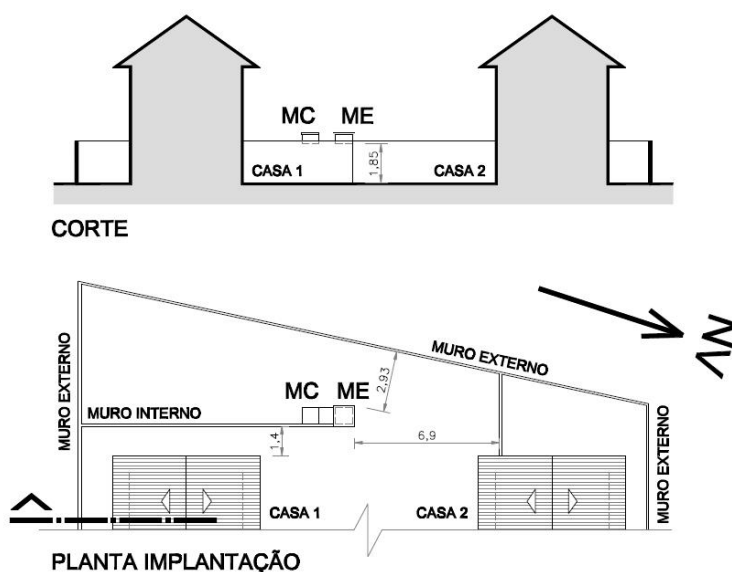


Figura 3 – Disposição dos módulos



Figura 4 – Módulos no local do experimento

Ao longo do experimento, foi realizada diariamente a reposição do nível do reservatório d'água da bacia metálica devido à evaporação. A reposição ocorria pela manhã, antes da incidência dos raios solares, sendo utilizada água à temperatura ambiente. Para os dados relatados neste artigo, não foi documentada a quantidade de água repostada a cada dia de monitoramento.

### 3.3. Aquisição de dados

O monitoramento das temperaturas do ar no local foi feito utilizando três *data loggers* à prova d'água da marca NOVUS, modelo TagTemp-USB. Dois para medir as temperaturas internas dos módulos e um para medir a temperatura externa. O sensor desse aparelho opera na faixa de temperaturas de  $-20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $70,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , possui tempo de resposta de 5 s e apresenta precisão de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$  (Figura 5).

A umidade relativa local foi registrada utilizando o aparelho LogBox-RHT-LCD, também da marca NOVUS. O sensor de umidade opera na faixa de 0 a 100 %, possui tempo de resposta de 8 s em ar em movimento suave (20 a 80 % UR) e apresenta precisão de  $\pm 3\%$  a  $25^{\circ}\text{C}$  (Figura 2).

Os aparelhos foram programados para realizar medições a cada 15 minutos. A configuração dos *data loggers* e a extração dos dados foi feita com o software FieldChart 1.99.2, da Novus. Visando garantir a uniformidade das medições da temperatura do ar pelos diferentes sensores, estes foram acondicionados em recipiente de EPS e guardados em um freezer por 24 horas a  $-15^{\circ}\text{C}$ . Posteriormente foram expostos juntos à temperatura ambiente por mais 24 horas e verificadas as diferenças entre as medições registradas, observando-se uma diferença máxima de  $0,2^{\circ}\text{C}$  entre os aparelhos (Figura 6).



Fonte: [www.novus.com.br](http://www.novus.com.br)



Figura 6 – “Teste da geladeira”

Figura 5 – Data Loggers TagTemp-USB e LogBox-RHT-LCD

O sensor externo de temperatura do ar foi envolvido em alumínio e suspenso junto aos módulos (Figura 7).



Figura 7 – Sensor de temperatura do ar externo

Os sensores internos de temperatura do ar foram posicionados no centro do volume de ar de cada módulo enquanto o sensor externo, por não ser à prova d'água, foi posicionado em local sombreado,

ventilado, protegido de eventuais chuvas, sob uma laje em edificação próxima. O período de medições para a configuração apresentada neste artigo abrangeu 24 dias completos, de 29/10/2014 até 22/11/2014.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 9 mostra os dados internos medidos nos dois módulos comparativamente às condições de temperatura e umidade externas. A temperatura externa variou no período entre 11,8°C e 34,5°C, com correspondente variação na umidade relativa. O módulo controle (MC) acompanha o padrão das temperaturas externas, sem mostrar nem amortecimento térmico nem efeito de atraso térmico e um sobreaquecimento de cerca de 1 grau nos dias com temperatura mais elevada. O módulo com o painel evaporativo (ME) mostra ambos os efeitos: amortecimento e atraso térmicos, com significativa diferença para as temperaturas internas medidas no MC. A diferença térmica encontrada entre os dois módulos varia fortemente durante o ciclo de 24 horas, sendo pouco nítida durante o período noturno e extremamente acentuada no período diurno (Figura 9, Tabela 1).

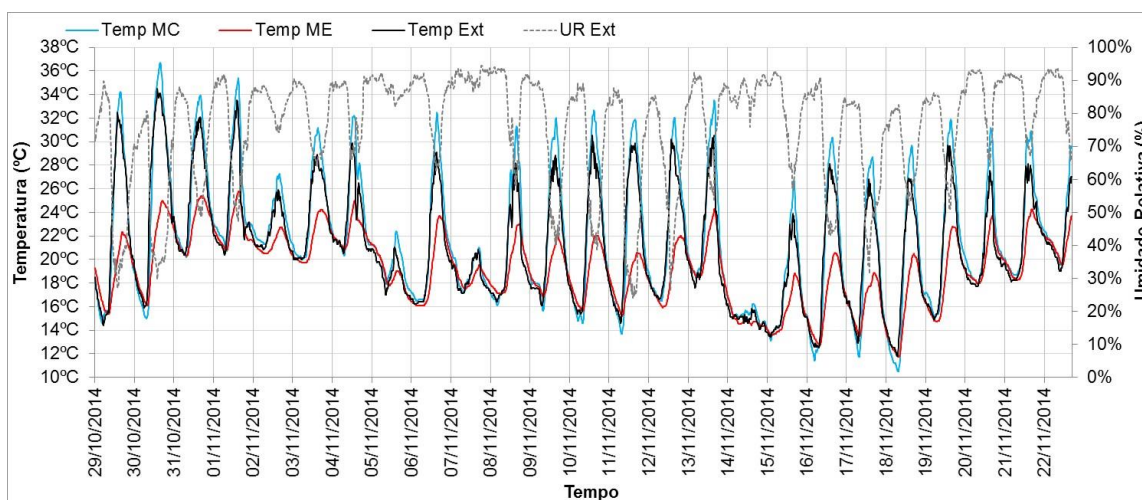


Figura 8 – Temperaturas do ar (internas e externa) e umidade relativa externa medidos

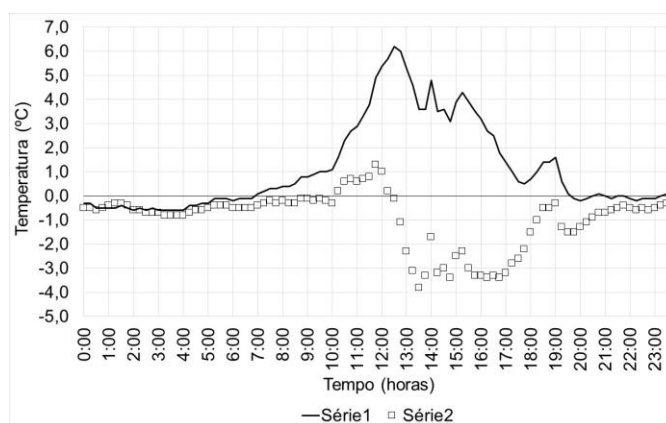


Figura 9 – Diferenças térmicas entre MC e ME em relação à temperatura externa para o último dia de medição

Tabela 1: Valores medidos encontrados para o período, diferenças em termos de temperatura do ar (°C) encontradas nos dois módulos e em relação ao exterior

	Text	Tint (MC)	Tint (ME)	DeltaT (MC-ME) 24h	DeltaT (MC-ME) noite	DeltaT (MC-ME) dia	DeltaT (Text-ME) dia	DeltaT (Text-MC) dia
<b>Média</b>	21,1	21,7	19,2	2,6	0,3	4,4	3,6	-0,8
<b>Máxima</b>	34,5	36,7	25,8	13,0	5,4	13,0	12,5	6,6
<b>Mínima</b>	11,8	10,5	11,7	-2,0	-2,0	-1,9	-1,7	-7,4

A diferença térmica encontrada entre ambos os módulos mostra o benefício do sistema em relação ao caso-base sem aplicação do mesmo (MC), uma vez que a geometria é exatamente a mesma, assim como o volume de ar interno. Uma vez que o sistema empregado no ME é baseado no resfriamento evaporativo, o

principal fator climático definidor de seu potencial é a denominada “depressão da temperatura de bulbo úmido” (ou  $TBU_{dep}$ ), a qual é determinada pela diferença entre a temperatura de bulbo seco (TBS) e aquela de bulbo úmido (TBU). Quanto maior for  $TBU_{dep}$ , maior será o resfriamento evaporativo, ou seja, quanto mais seco o ar, maior o potencial evaporativo, sendo maior a queda da temperatura interna esperada. Givoni (1992) sugere que o potencial de um sistema de resfriamento direto seja em torno de 70-80% da  $TBU_{dep}$ . Erell (2007) comenta que, em sistemas evaporativos, o limite de temperatura interna a ser atingido seria dado pelo valor da TBU, porém em geral esse valor não chega a ser atingido; sistemas de resfriamento evaporativo diretos apresentam comumente temperaturas do ar internas cerca de 2°C acima da TBU. Em sistemas indiretos, porém, tal potencial tende a ser mais reduzido.

A partir dos dados medidos de temperatura do ar e umidade relativa, foi obtida algebricamente a temperatura de bulbo úmido para as condições externas ([www.zunis.org/P180/HSA\\_Docs/Equations\\_values.htm](http://www.zunis.org/P180/HSA_Docs/Equations_values.htm)), a partir da qual foram calculados os valores de  $TBU_{dep}$  (Tabela 2).

Tabela 2: Valores encontrados de  $TBU_{dep}$  e TBU (°C)

	TBU	$TBU_{dep}$	$TBU_{dep}$ (noite)	$TBU_{dep}$ (dia)
Média	18,5	2,6	1,2	3,7
Máxima	25,8	12,4	8,2	12,4
Mínima	10,5	0,1	0,1	0,1

A Figura 10 mostra a correlação encontrada entre a diferença entre ME e Text e entre MC e Text, versus  $TBU_{dep}$ , para o período diurno, onde se nota que, de forma consistente,  $TBU_{dep}$  é um forte definidor do potencial de resfriamento de ME, enquanto que MC não apresenta qualquer relação com a variável  $TBU_{dep}$ , uma vez que não se utiliza desse processo de resfriamento.

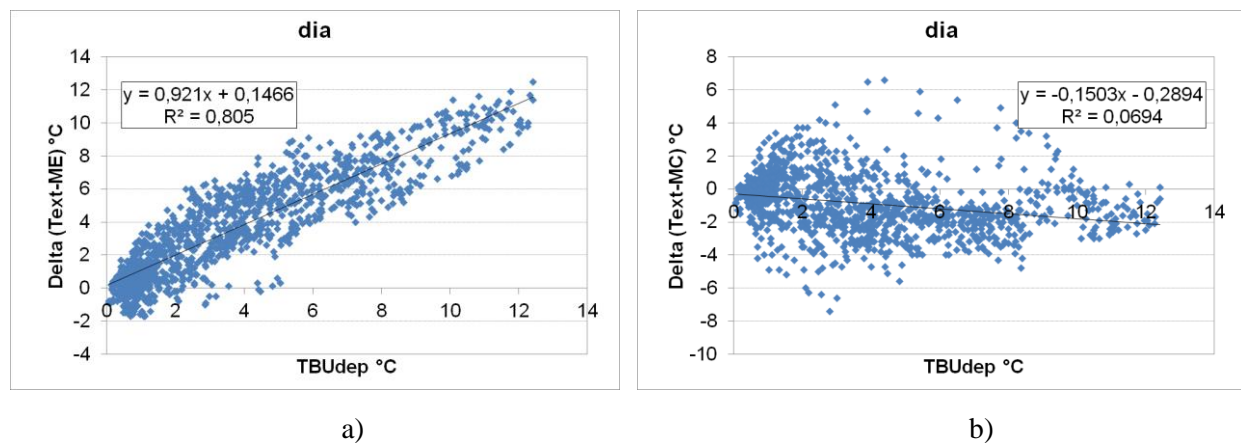


Figura 10 – Correlação encontrada entre DeltaT (Text-ME) e  $TBU_{dep}$  (a) e entre DeltaT (Text-MC) e  $TBU_{dep}$  (b) para o período diurno

O potencial de resfriamento encontrado no sistema para o período diurno chega a 12,5°C, sendo que a temperatura média interna encontrada em ME se situa, conforme a Tabela 1, próxima de 1°C acima da TBU média para o período monitorado (Tabela 2). Desta forma, o desempenho do sistema em termos de resfriamento ficou acima do teoricamente esperado, com aproveitamento praticamente total da  $TBU_{dep}$ . Como isso seria teoricamente impossível, supõe-se que o efeito do aumento de massa térmica com a adição da lâmina d’água de 6,5cm tenha contribuído significativamente para esse alto desempenho.

O desempenho de um sistema passivo pode ser avaliado considerando seu diferencial relativamente ao caso-base e, no caso de sistemas de resfriamento evaporativo, pela  $TBU_{dep}$ , segundo a relação dada pela Equação 1 (Krüger *et al.*, 2010):

$$COP = \frac{T_{int(sem\ resfriamento)} - T_{in(com\ resfriamento)}}{TBU_{dep}}$$

Equação 1

Para o período monitorado, o “coefficient of performance” (COP) assim obtido gerou valores acima de 100%, o que representa um desempenho acima do que seria fisicamente possível com um sistema REI. Sendo assim, é de se supor que ME se beneficia não apenas do efeito de resfriamento evaporativo, porém

também do efeito de aumento da massa térmica, o que explica o amortecimento e o pequeno atraso térmico verificados nesse protótipo (Figura 8).

Comparativamente aos experimentos apresentados por Gonzalez *et al.* (2014) em Florianópolis (ZB 3), o Experimento 1 realizado por esses autores, com modulação dos protótipos e configuração do experimento bastante similares às do presente experimento, teve como resultado uma redução da temperatura interna de até 10,4°C em relação à externa (máximas diárias). A diferença encontrada (simultânea) no experimento ora realizado foi de até 12,5°C, o que torna os resultados coerentes com os relatados por Gonzalez *et al.* (2014), embora a referência utilizada indique uma variação de  $TBU_{dep}$  significativamente inferior à que medimos. Da mesma forma, observou-se, igualmente, que as mínimas internas foram próximas às externas, tanto para MC como para ME (Figura 9).

GONZALEZ e GONZALEZ-Maciel (2013), em pesquisa anterior segundo o mesmo delineamento experimental, porém para Maracaibo, Venezuela, apresentam o índice Potencial de Resfriamento Médio (PRM), definido como “[...] *la cantidad de energía por unidad de tiempo y de superficie, capaz de ser retirada por el sistema, obtenida como valor medio durante un periodo de 24 horas [...]*” (GONZALEZ, 1997, p. 214), Equação 2.

$$PRM = \frac{CPC \cdot T_{med}(\text{módulo de controle}) - T_{med}(\text{módulo experimental})}{A}$$

Equação 2

Onde:

CPC é o coeficiente de perda de calor do módulo (W/°C);

T<sub>med</sub> é a temperatura média diária dos dois módulos (MC e ME, no caso) (°C);

e A é a área da superfície efetiva da cobertura (m<sup>2</sup>).

Adotando-se CPC=1,50W/°C e a superfície de cobertura A=0,462m<sup>2</sup>, como fizeram Gonzalez *et al.* (2014) para Florianópolis e Maracaibo, pôde-se obter o PRM, dado em Wh/m<sup>2</sup>.dia e sua variação ao longo dos 24 dias de experimento. A figura seguinte (Figura 11) apresenta valores calculados de COP e PRM, dia a dia. O valor do COP ultrapassa o limite teórico (70-80%) para sistemas REI, porém os valores de PRM se assemelham aos obtidos no Experimento 3 referido em Gonzalez e Gonzalez (2013), para Maracaibo, e ao valor máximo citado para o mesmo índice por Gonzalez *et al.* (2014), de 286Wh/m<sup>2</sup>.dia, para Florianópolis. Com alguma variação, como por exemplo, para os dias 7 e 14 de novembro, nos quais a umidade relativa e temperatura ambiente permaneceram altas e invariáveis durante o dia (dias em que houve precipitação), o valor médio se aproxima de 200Wh/m<sup>2</sup>.dia, sendo que o pico verificado para o período foi de 337Wh/m<sup>2</sup>.dia, o qual se obteve para o dia com maior amplitude térmica da temperatura externa e a maior  $TBU_{dep}$  do período de monitoramento. Assumindo a amplitude térmica diária (T<sub>max</sub>-T<sub>min</sub>)<sub>24h</sub> como possível indicador da estabilidade atmosférica diária, nota-se que esse fator é fundamental para um alto desempenho do sistema.

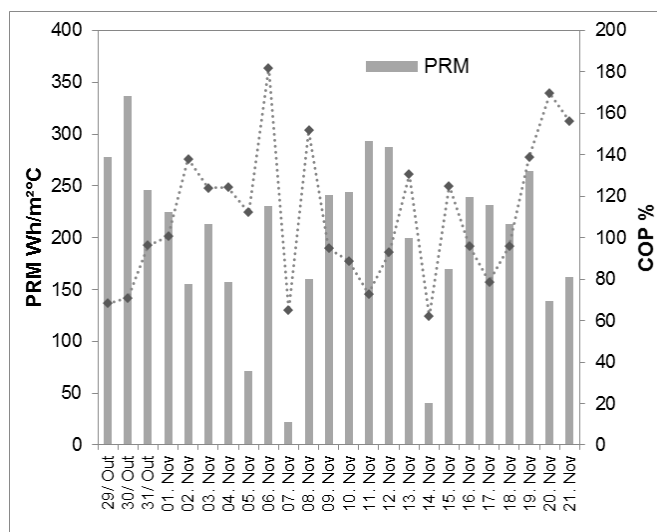


Figura 11 – Valores de COP e PRM para os 24 dias de experimento

#### 4.1 Condições de conforto térmico – potencial de resfriamento

A representatividade da estratégia de resfriamento evaporativo no período monitorado pode ser verificada com a plotagem dos pares de temperatura e umidade do ar (dados externos) sobre a carta bioclimática de



Givoni, contemplando-se mais uma vez apenas o período diurno (Figura 12). O relatório de saída fornece uma demanda de 11,5% do período diurno por resfriamento evaporativo. Somando-se Massa Térmica para Resfriamento (Zonas 4 e 11 do diagrama), como mencionado acima, importante sub-produto do sistema REI implementado, a demanda total pelas duas estratégias atinge cerca de 25% das horas.

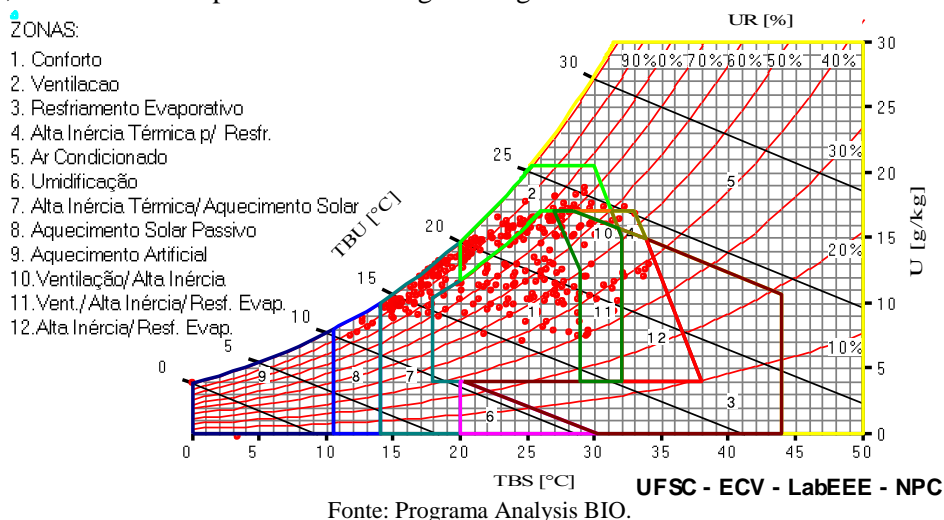


Figura 12 – Pares de temperatura e umidade sobre o Diagrama Bioclimático da Edificação – período diurno

Para essas condições, a vantagem em termos de aumento dos níveis de conforto/diminuição da necessidade de resfriamento pode ser testada ao se comparar o somatório de graus-hora obtido para determinada temperatura-base, calculado para as condições externas e internas (MC versus ME). Como se trata de um sistema passivo, pode-se adotar o limite de temperatura de conforto adaptativo com base na norma ASHRAE Standard 55, indicada para edificações ventiladas naturalmente (De DEAR; BRAGER, 2002). De acordo com essa norma, a temperatura de conforto ( $T_{conf}$ ) é determinada a partir da temperatura média mensal externa, conforme a Equação 3:

$$T_{conf} = 17,8 + 0,31 \cdot T_{med-ext} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$T_{med-ext}$  é a temperatura média do mês.

Adotando-se como  $T_{med-ext}$  a temperatura média registrada no local para o período monitorado (cf. Tabela 1), obtém-se 24,3°C como temperatura de conforto. Calculando-se o somatório de diferenças de temperatura acima dessa temperatura-base, obtém-se então um total de 778,5°C.h para o ambiente externo, 498,2°C.h para MC e apenas 11,5°C.h para ME. Ou seja, se essa diferença para a temperatura-base fosse constante e de 1°C, ter-se-ia mais de 95% das horas diurnas do período monitorado (336 horas) sem desconforto por calor/necessidade de resfriamento em ME.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou resultados preliminares de um estudo sobre a utilização uma tecnologia de baixo consumo energético para condicionamento térmico aplicada a um protótipo reduzido teste em meses quentes de Curitiba.

O estudo mostrou a efetividade do sistema para um período relativamente seco da primavera curitibana. Ficou claro que o resfriamento evaporativo contribuiu para uma maior resistência do módulo experimental ao aumento das temperaturas do ar internas.

Os resultados indicam que o sistema oferece alto potencial de resfriamento, tendo este sido superior ao verificado por Gonzalez *et al.* (2014) para as condições climáticas de final de primavera em Florianópolis, localizada na ZB-3. Embora se utilize do resfriamento evaporativo como principal estratégia de resfriamento, esse mecanismo não é o único fator responsável pela redução térmica observada, uma vez que se encontraram indicadores e percentuais de desempenho acima do esperado e do limite teórico. A adição da lâmina d'água possivelmente contribuiu para o alto desempenho do sistema influenciando também no pequeno atraso térmico observado no ME.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220** - Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- BATISTA, J.; LAMBERTS, R. Estimativas de redução da temperatura do ar: uso do resfriamento evaporativo direto no semi-árido alagoano. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Ouro Preto: ANTAC, 2007.
- CAVALCANTI, J. R. DE S. **Estudo experimental comparativo entre resfriamento evaporativo e radiativo em ambientes cobertos com telhas de fibrocimento em região de clima quente e úmido**. São Paulo: USP, 2001. Dissertação – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- CAVALCANTI, J. R. DE S.; PRADO, R. T. A. Estudo experimental comparativo entre resfriamento evaporativo e radioativo em ambientes cobertos com telhas de fibrocimento em região de clima quente e úmido. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2001.
- CUNHA, E. G. da (org.). **Elementos de arquitetura de climatização natural**. 2ª edição. Porto Alegre: Masquatro, 2006.
- DE DEAR, R.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE standard 55. **Energy and Buildings**, 2002;34:549–63.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2013 - Relatório Síntese**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2013.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2014 - Relatório Síntese**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2014.
- ERELL, E. Evaporative cooling. Book chapter. In: Santamouris M, editor. **Advances in passive cooling**. London: James & James Science Publishers; 2007.
- GIVONI, B. Comfort climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, 1992;18:11–23.
- GONZALEZ, E. **Étude de Matériaux et de Techniques du Bâtiment Pour la Conception Architecturale Bioclimatique en Climat Chaud et Humide**. Thèse (Doctorat en Energétique) – l'École des Mines des Paris, Paris, 1997a.
- GONZALEZ, E.; KRÜGER, E. L. Enfriamento evaporativo indirecto: predicción del comportamiento térmico en ciudades brasileñas. In: XII ENCONTRO NACIONAL E VIII ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Brasília: ANTAC, p.45–54, 2013.
- GONZALEZ, E.; KRÜGER, E. L.; GIORDANO, D. E. Estudo da aplicabilidade de um sistema de resfriamento evaporativo indireto para otimização do conforto térmico em residências no território brasileiro. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Maceió: ANTAC, p.479–488, 2014.
- GONZALEZ, E. M.; CONZALEZ-GARCIA, S. I. Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estaque para el enfriamiento pasivo en clima húmedo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 149-171, out./dez. 2013.
- GONZALEZ, E.; ORDENES MIZGIER, M.; RUTTKAY PEREIRA, F.; GÜTHS, S. Estudo experimental com sistemas de resfriamento passivo em Florianópolis. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Maceió: ANTAC, p.143–152, 2014.
- GONZALEZ-GARCIA, S. **Estudio experimental del comportamiento térmico de sistemas pasivos de enfriamiento en clima cálido-húmedo**. Huelva: Universidad Internacional de Andalucía, Sede Internacional de la Rábida, 2010. Dissertação - Universidad Internacional de Andalucía.
- INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 14/4/2015.
- KRÜGER, E. L.; RODRIGUES, E. L.; KOBAY, G. F.; CERRI, J. A.; NAKAMURA, M. O uso de protótipos experimentais de baixo custo para avaliação de materiais de vedações quanto ao seu desempenho térmico. In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS E X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* São Paulo: ANTAC, p.10, 2004.
- KRÜGER, E. L.; RORIZ, M. Previsão horária de temperaturas internas do ar: aplicação no estudo de células teste. In: VIII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Maceió: ANTAC. p.948–957, 2004.
- LABAKI, L. C.; TEIXEIRA, C. F. Resfriamento evaporativo em coberturas: estudo de caso em Campinas. In: XXI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Florianópolis: ANTAC, 2006.
- LABAKI, L. C.; TEIXEIRA, C. F.; TAVARES, S. F. Desempenho térmico de técnicas passivas em coberturas: resfriamento evaporativo e radiante. In: VIII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Maceió: ANTAC. p.2328, 2005.
- NASCIMENTO, G. R. **Refrigeração evaporativa de telhados por meio de gotejamento de água. Experimento em bancada de testes**. São Carlos: UFSCar, 2005. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos.
- OLGYAY, Victor. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. 1ª edição. 5ª reimpressão. Espanha: Gustavo Gili, 2008.
- RORIZ, V.; RORIZ, M. Resfriamento evaporativo por aspersão de água sobre telhas de fibrocimento em clima semi-úmido. In: XII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Fortaleza: ANTAC, 2008.
- SILVA, A. C. S. B. da. **Simulação de resfriamento evaporativo por microaspersão d'água**. Florianópolis: UFSC, 2004. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina.
- VECCHIA, F.; MASIERO, É. Resfriamento evaporativo e condicionamento de ar convencional: estudo experimental comparativo para a obtenção do conforto humano. In: XXI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Florianópolis: ANTAC, 2006.