XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Implementação de um sistema de aquecimento e resfriamento radiante-capacitivo (RC-HCS) em uma câmara climática

Implementation of a Radiant-Capacitive Heating and Cooling System (RC-HCS) in a climate chamber

Eduardo Manuel González Cruz
Universidade Tecnológica Federal do Paraná|Curitiba|Brasil| edugoncruz@gmail.com
Eduardo Krüger
Universidade Tecnológica Federal do Paraná|Curitiba|Brasil| ekruger@utfpr.edu.br
Fabricio Carraro
Universidade Tecnológica Federal do Paraná|Curitiba|Brasil| fz.carraro@gmail.com
Gabriel Moraes De Bem
Universidade Tecnológica Federal do Paraná|Curitiba|Brasil| gabriel.bem@ifsc.edu.br
Alexandre Augusto Moreira de Abreu
Instituto Federal de Santa Catarina| Canoinhas | Brasil | alexandre.abreu@ifsc.edu.br
Daniel Trento
Universidade Tecnológica Federal do Paraná|Curitiba|Brasil| trento.daniel@gmail.com

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados iniciais da avaliação do sistema de aquecimento e resfriamento radiante-capacitivo de baixo consumo de energia aplicado em uma câmara climática. O sistema se baseia no uso de módulos radiantes-capacitivos que, por meio de um circuito hidráulico, utilizam-se do resfriamento radiativo noturno e aquecimento solar. Detalha-se os componentes do sistema e analisam-se os resultados de seu funcionamento em modo de resfriamento e aquecimento, guiado por um sistema de controle. Foram encontrados importantes potenciais de resfriamento e aquecimento que permitem manter as condições de conforto térmico na maior parte do tempo.

Palavras-chave: Sistema radiante-capacitivo. Resfriamento radiativo noturno. Aquecimento solar. Sistema de baixo consumo energético. Estudo experimental.

Como citar:
GONZALEZ-CRUZ, E., KRÜGER, E., CARRARO, F., MORAES DE BEM, G., Moreira de Abreu, A., TRENTO, D. Implementação de um sistema de aquecimento e resfriamento radiante-capacitivo (RC-HCS) em uma câmara climática. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

Abstract

The aim of this study is to present the initial results of the evaluation of a capacitive-radiant heating and cooling system with low energy consumption employed in a climate chamber. It is based on the use of radiant-capacitive modules that, through a hydronic circuit, take advantage of radiative cooling at night and solar heating. Each of the components of the system is detailed and the results of the operation of the system in cooling and heating mode activated by the control system are analyzed. Important cooling and heating potentials were found that allow maintaining thermal comfort conditions most of the time.

Keywords: Radiant-capacitive system. Night-time radiative cooling. Low-energy system. Solar heating. Experimental study.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias que contribuem para a redução do consumo de energia, principalmente energia primária não-renovável, e que minimizem as emissões de gases de efeito estufa é uma necessidade cada vez mais premente. Como até 40% do uso final de eletricidade em edificações são destinados aos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), torna-se essencial reduzir esse consumo [1]. Nesse contexto, são promissoras as edificações que combinam estratégias bioclimáticas com a aplicação de técnicas passivas de aquecimento e resfriamento. Sistemas de aquecimento e resfriamento radiante (RHC) ganharam muita popularidade nas últimas décadas devido ao seu potencial no sentido de proporcionar conforto térmico com baixo consumo de energia aliados a uma operação silenciosa e economia de espaço [2].

Revisão de literatura sobre pesquisa em sistemas radiantes de aquecimento e resfriamento aponta para possibilidades de uso direto e indireto de energia renovável como fonte de calor ou para dissipação de calor nesses sistemas [3]. Como vantagens, ambientes providos de sistemas de condicionamento radiante promovem conforto térmico com menor demanda de energia primária em comparação com sistemas que operam com ar condicionado convencional [4]. O sistema passivo analisado no presente estudo envolve o resfriamento/aquecimento de um fluido (água) acoplado ao resfriamento/aquecimento radiante do espaço interior. Isso, com a utilização de massa térmica efetiva de forma a obter maior eficiência energética e estabilidade térmica como em sistemas construtivos ativados termicamente, os TABS ("Thermally Activated Building Systems") [5].

Assim, o objetivo deste trabalho é descrever e avaliar os primeiros resultados do desempenho térmico do sistema de resfriamento e aquecimento de baixo consumo energético desenvolvido. Sistema baseado no uso de resfriamento radiativo noturno e do aquecimento solar aplicado a uma câmara climática de baixo custo. Este artigo apresenta uma síntese do sistema e alguns resultados preliminares relacionados ao potencial de resfriamento e aquecimento do sistema e a capacidade de modificar as temperaturas características internas, em busca de conforto térmico.

2. O SISTEMA RC-HCS

O conceito básico do sistema, denominado “Radiant-Capacitive Heating and Cooling System” (RC-HCS), baseia-se no condicionamento radiante passivo e com baixo consumo de energia a partir da utilização de fontes de energia renováveis. O condicionamento radiante interno baseia-se no uso de elementos modulares de teto com elevada capacidade térmica (“Radiant-Capacity Module” ou RCM) por onde circula o fluido resfriado ou aquecido externamente, o qual ativa termicamente esses elementos, [6].

Externamente, o sistema utiliza painéis voltados para a abóbada celeste, os quais promovem seja resfriamento radiativo noturno seja aquecimento solar, do fluido que os atravessa (“Sky Radiator/Solar Collector” ou SR/SC).

Um sistema de bombeamento de água permite sua circulação como fluido de transferência de calor entre o SR/SC, passando então pelos módulos radiantes-capacitivos (RCM) que se localizam no ambiente interno. Ao final do circuito fechado, utiliza-se um tanque de água para o armazenamento de energia (“Thermal Energy Storage” ou TES).

2.1 ESTUDO PRÉVIO EM CÉLULAS TESTE

O RC-HCS foi previamente avaliado experimentalmente em pequena escala, utilizando módulos de pequeno porte (Figura 1a). A descrição e os resultados desta primeira fase de desenvolvimento e avaliação podem ser vistos em [7, 8]. Com base nessa experiência anterior, o sistema foi concebido e dimensionado para ser aplicado em uma câmara teste [9] (Figura 1b), destinada a estudos de conforto ambiental e sistemas de condicionamento térmico passivo. A câmara teste (CB1) é um dos dois módulos idênticos construídos a partir de um container high-cube e com 5,4 m² de área interna [9]. Características construtivas e térmicas das câmaras teste utilizadas podem ser vistos em (10). As câmaras teste estão localizadas em Curitiba a 25°26'33,6”S e 49°21'14,14”W, 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.

Figura 1: (a) arranjo experimental do RC-HCS em pequena escala e (b) câmara teste utilizada nos experimentos (CB1) e câmara de controle (CB2).



Fonte: os autores (a) (b)

2.2 COMPONENTES DO RC-HCS APLICADO NA CÂMARA TESTE

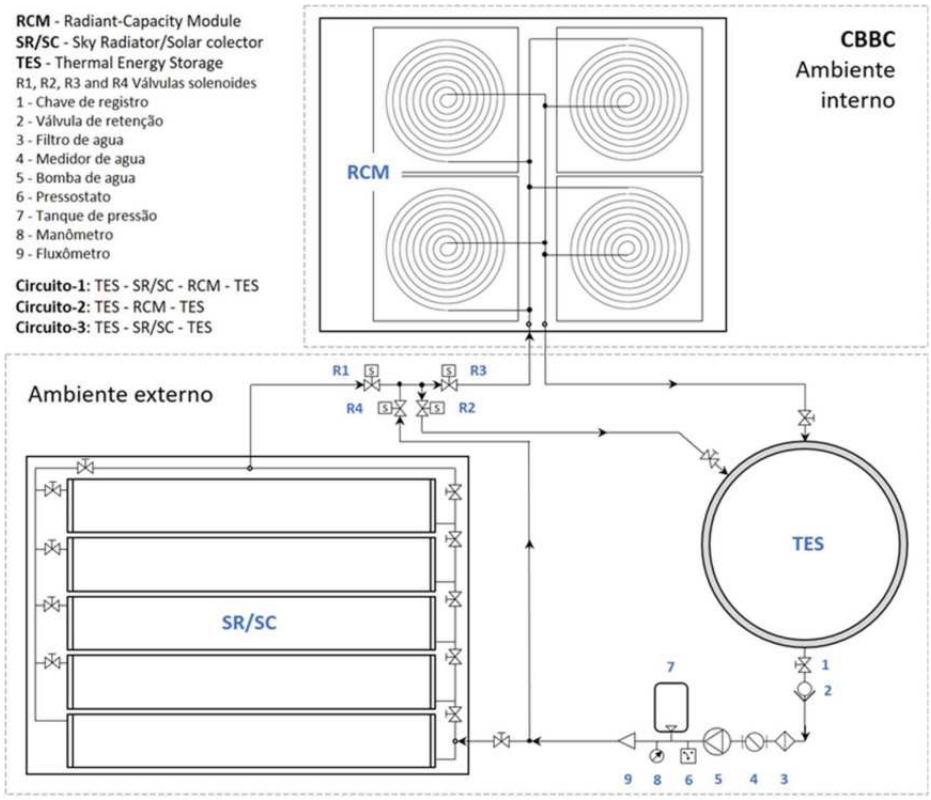
O sistema implementado é composto por seis grupos de componentes básicos (Figura 2): a) quatro módulos radiantes-capacitivos (RCM); b) cinco painéis radiadores/coletores solares (SR/SC); c) tanque de água para armazenamento de energia (TES); d) sistema de controle inteligente (SCS); e) sistema de bombeamento hidropneumático; f) conjunto de tubos, mangueiras, chaves de registro, válvulas solenoides, conexões e dispositivos para medição de vazão e volume de água. Essa instalação é complementada pelas estruturas de suporte do RCM, no interior da CB-1, e dos painéis externos (SR/SC).

2.3 MÓDULOS RADIANTE-CAPACITIVOS (RCM)

Os RCMs, devido ao seu teor de água, oferecem capacidade de armazenamento de energia térmica no ambiente aumentando também sua inércia térmica, assim contribuindo para a redução da amplitude.

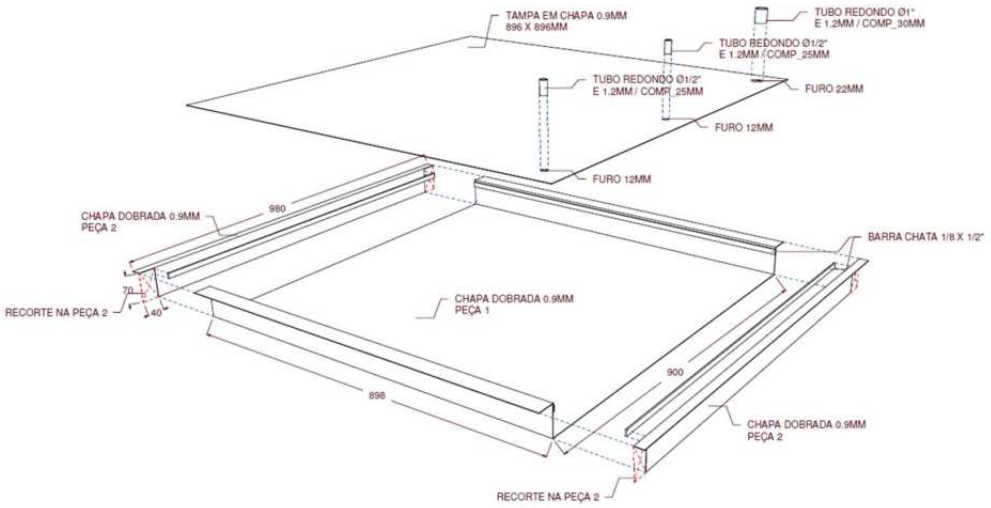
Cada um dos quatro RCMs foi fabricado em chapa de aço galvanizado com 0,9 mm de espessura e pintado de branco, conforme indicado na Figura 3. Suas dimensões são 0,9 m x 0,9 m (superfície radiante = 0,81 m^2) com uma altura de 0,07 m. São preenchidos com água até 0,065 m e cobertos com uma chapa de aço galvanizado de mesma espessura. Em seu interior, o RCM possui uma serpentina de alumínio de ¾" de diâmetro e com 13,5 m de comprimento como trocador de calor (Figura 4a). A área total ocupada pelos quatro RCMs é de 3,24 m^2. Considerando a superfície interna do ambiente de 5,33 m^2, a superfície do RCM representa 60,7% da mesma. O volume de água em cada RCM é de 52,65 l, com um total de 210,6 l (0,2106 m^3).

Figura 2: Esquema de componentes e circuitos de fluxo de água do RC-HCS



Fonte: os autores.

Figura 3: Módulo radiante-capacitivo e estrutura de suporte.



Fonte: os autores

Figura 4: (a) Trocador de calor no RCM (serpentina de alumínio), (b) RCMs instalados.



Fonte: os autores (a) (b)

2.4 RADIADOR CELESTE / COLETOR SOLAR (SR/SC)

O SR/SC é composto por cinco radiadores de 3,0 m x 0,49m (1,47 m^2), cada um composto por cinco perfis de alumínio extrudado de 3,0 m × 0,095 m × 8,3 mm, em cor preta, e alimentados com água por mangueiras de interligação (Figuras 5a-b). O SR/SC foi colocado sobre uma camada de isolamento térmico de poliestireno de 50 mm de espessura o qual se assenta sobre uma plataforma de suporte com inclinação de 10%. A área total dos cinco radiadores/coletores (SR/SC) é de 7,35 m^2.

2.5 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA (TES)

Para o armazenamento de energia térmica (TES), é utilizada uma caixa d'água de polietileno com capacidade nominal de 1.000 litros. Este tanque é apoiado em uma chapa de poliestireno de 50 mm de espessura que o isola de sua base. É coberto por uma camada de poliuretano expandido de 50 mm de espessura (Figura 6a).

O sistema hidropneumático instalado para bombeamento de água (Figura 6b) é composto por um tanque de pressão de 35 l, bomba de água de 1/4 hp (0.186 kW), pressostato, manômetro, medidor de vazão, hidrômetro e filtro de água. Além desses componentes, o sistema possui quatro válvulas solenoides (Figura 6c-d),

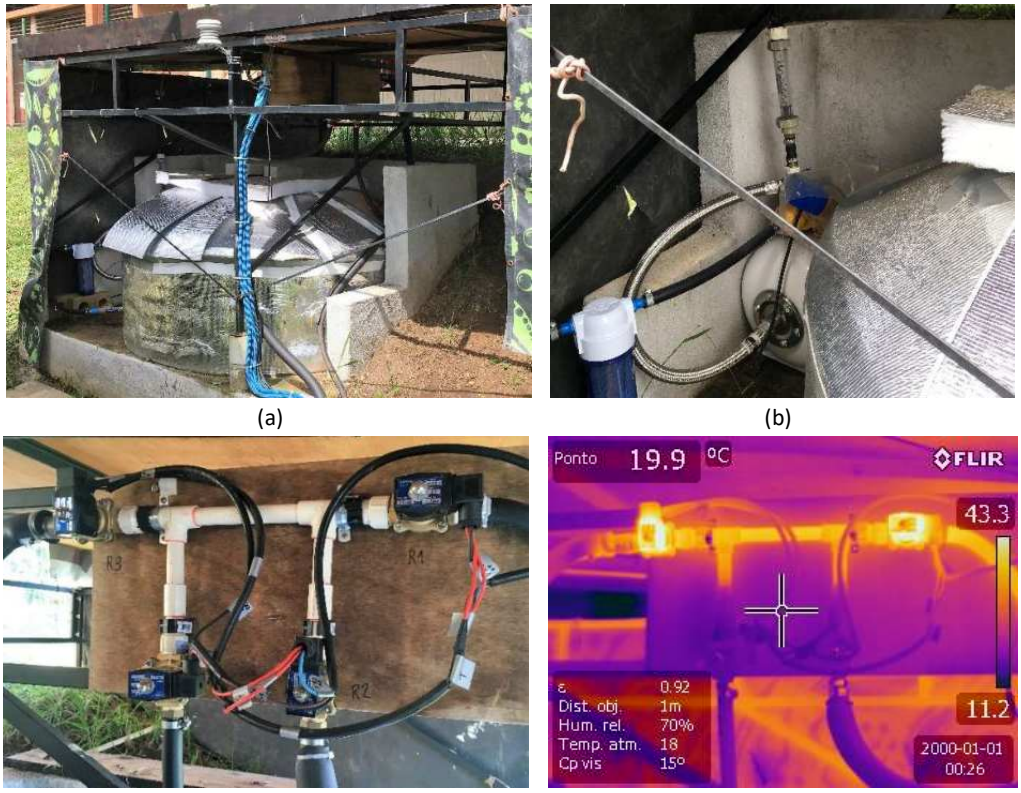
acionadas pelo sistema de controle inteligente (SCS) e chaves de registro para facilitar os diferentes modos de operação e testes experimentais.

Figura 5: (a) Perfil de alumínio extrudado utilizado na fabricação do SR/SC, (b) SR/SC sobre plataforma de suporte.



Fonte: os autores (a) (b)

Figura 6: (a) TES, (b) Sistema hidropneumático e outros componentes como medidor de vazão e filtro, (c) Conjunto de válvulas solenoides e (d) Imagem infravermelha mostrando as válvulas R1 e R3 abertas para permitir o fluxo de água no Circuito-1 durante o aquecimento.



Fonte: os autores (c) (d)

2.6 SISTEMA DE CONTROLE INTELIGENTE (SCS)

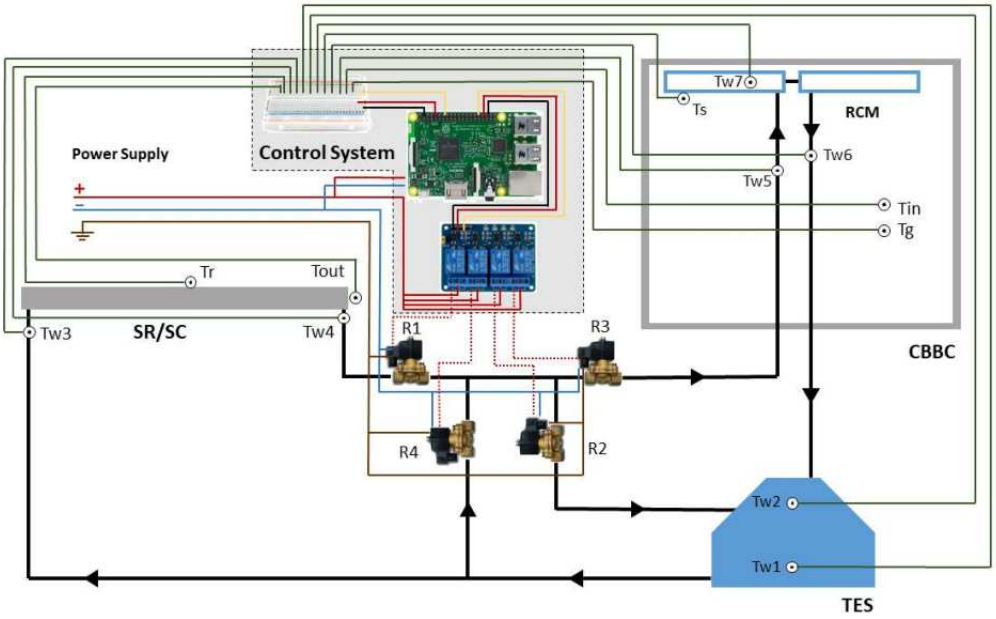
O RC-HCS é controlado por um microprocessador Raspberry Pi 3, conectado a 12 sensores à prova d'água DS18B20, um relé de quatro canais e quatro válvulas solenoides do tipo Normalmente Fechadas (NF). A arquitetura de instalação assim

como o posicionamento dos sensores (Tw1, Tw2, Tw3, Tw4, Tw5, Tw6, Tw7, Ts, Tin, Tg, Tout e Tr) é ilustrado na Figura 7.

Os sensores de temperatura são conectados em paralelo a uma placa de prototipagem alimentada pelo Raspberry Pi (3.3V), a qual conta com a instalação de um resistor *pullup* de 1 kOhm. Os sensores DS18B20 possuem protocolo de comunicação do tipo 1wire com registro de temperatura diretamente em graus Celsius. Para o reconhecimento dos sensores foi necessário instalar a biblioteca adafruit-circuitpython-ads1x15, criada pela fabricante da ADC ADS1115 converter.

Os dados coletados por todos os sensores, os registros dos cálculos para obtenção da Temperatura Neutra (Tn) com base no modelo adaptativo de conforto térmico da ASHRAE [12], da Temperatura Radiante Média (Trm) com base em [13] e da Temperatura Operativa (To) baseada em [12], as quais regem o SCS, assim como os mecanismos de tolerância, falha e armazenamento de dados foram implementados em linguagem de programação Python versão 3.9.5. O sistema desenvolvido é responsável pela leitura e armazenamento dos dados tanto localmente (cartão SD conectado ao Raspberry Pi) como na nuvem, por meio da biblioteca de código aberto *gspread*. Esse mecanismo independente e redundante aumenta a segurança no armazenamento das informações além de permitir o acompanhamento em tempo real das medições e do comportamento do sistema à distância.

Figura 7: Disposição dos componentes do SCS.



Fonte: os autores.

O sistema é programado para realizar verificações a cada 5 minutos, as quais são responsáveis pelo acionamento das válvulas solenoides de acordo com as regras de funcionamento estabelecidas na Tabela 1. Em cada interação, são verificadas as condições de funcionamento e o sistema gera um log (local e na nuvem) com o registro dos procedimentos, tanto de verificação quanto de funcionamento dos circuitos. Dessa forma, é possível monitorar o funcionamento do sistema como um todo.

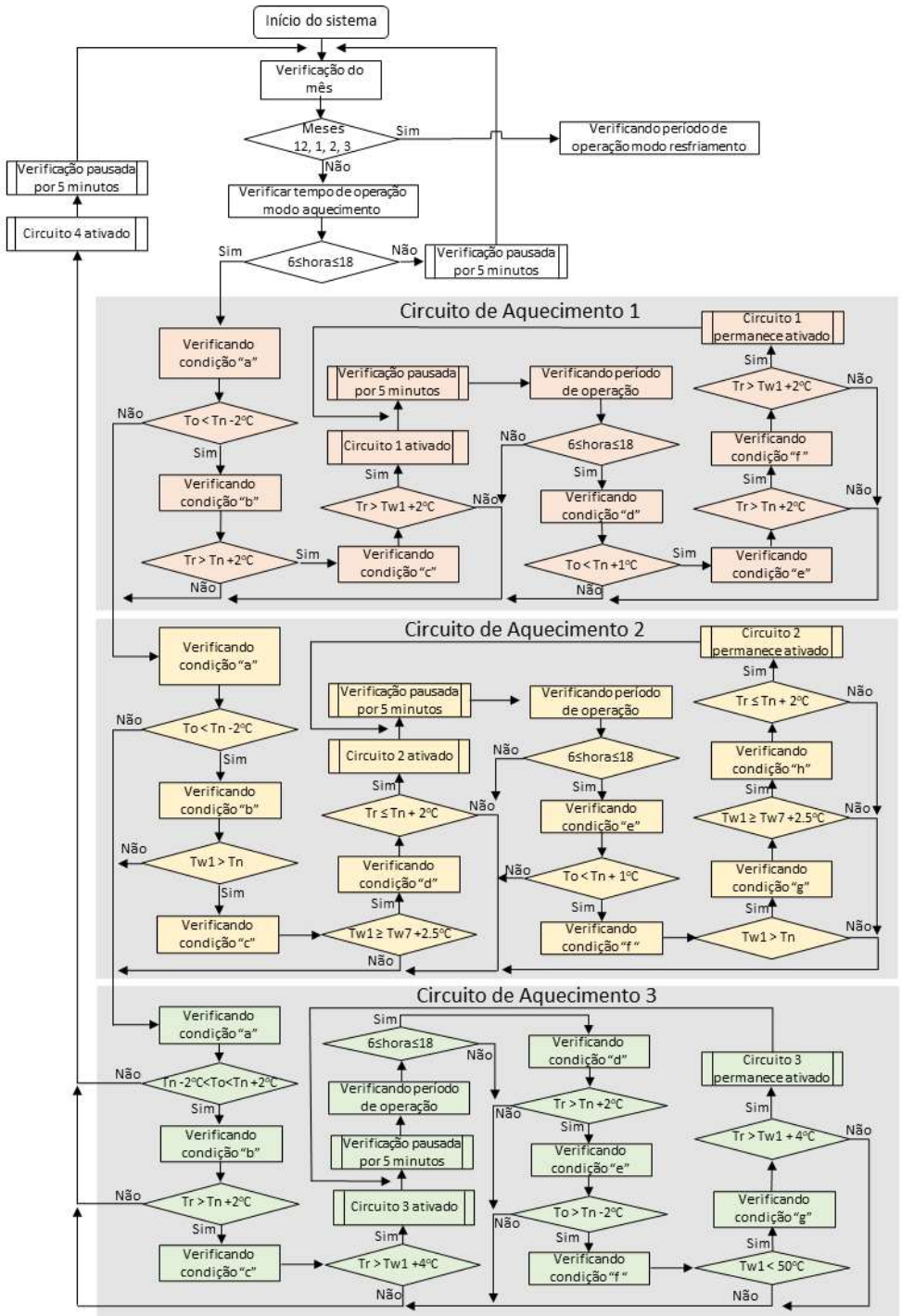
Tabela 1: Síntese de circuitos de água, modos e condições de funcionamento do RC-HCS.

Modo de operação		Circuito de água	Condições				Repouso
			Início		Funcionamento		
AQUECIMENTO	06:00 ≤ h ≤ 18:00	1	a	To < Tn-2 °C	d	To < Tn+1°C	Entra em **Repouso** e analiza os outros circuitos
			b	Tr > Tn+2°C	e	Tr > Tn+2°C	
			c	Tr > Tw1+2°C	f	Tr > Tw1+2°C	
	06:00 ≤ h ≤ 18:00	2	a	To < Tn-2°C	e	To < Tn+1°C	
			b	Tw1 > Tn	f	Tw1 > Tn	
			c	Tw1 ≥ Tw7+2.5°C	g	Tw1 ≥ Tw7+2.5°C	
			d	Tr ≤ Tn+2.0°C	h	Tr ≤ Tn +2°C	
	06:00 ≤ h ≤ 18:00	3	a	Tn-2 < To < Tn+2°C	d	Tr > Tn +2°C	
					e	To > Tn -2°C	
			b	Tr > Tn + 2°C	f	Tw1 < 50°C	
			c	Tr > Tw1 + 4°C	g	Tr > Tw1 + 4°C	
RESFRIAMENTO	20:00 ≤ h ≤ 06:00	1	a	To ≥ Tn - 1 °C	d	To > Tn-2°C	Entra em **Repouso** e analiza os outros circuitos
			b	Tw4 < Tw1			
			c	Tw4 < Tw7			
	07:00 ≤ h ≤ 18:00	2	a	To ≥ Tn+2 °C	c	To > Tn	
			b	Tw1 ≤ Tn-2 °C			
	20:00 ≤ h ≤ 06:00	3	a	Tn -2 °C < To < Tn -1 °C	c	Tw4 < Tw1 -1 °C	
			b	Tw4 < Tw1 -1 °C	d	Ou To < Tn -1 °C	

Fonte: os autores. Notas: Circuito-1 (TES - SR/SC - RCM - TES); Circuito-2 (TES - RCM - TES); Circuito-3 (TES - SR/SC - TES); To = Temperatura operativa; Tn = Temperatura neutral; Tr = Temperatura de chapa metálica; Tw1 = Temperatura da água no fundo do TES; Tw4 = Temperatura da água na saída do SR/SC; Tw7 = Temperatura da água no RCM.

O fluxograma abaixo (Figura 8) ilustra o fluxo do processo de análise e acionamento dos circuitos para o modo de aquecimento do RC-HCS. As condições “a”, “b”, “c”, “d”, “e”, “f”, “g” e “h” de cada circuito, correspondem às condições descritas na tabela 1.

Figura 8: Fluxograma de funcionamento dos circuitos de aquecimento



Fonte: os autores.

3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO RHCS

Como base para análises posteriores, são discutidos primeiramente os resultados do monitoramento da câmara de referência (CB2), idêntica à câmara teste (CB1), porém destituída do sistema passivo. São apresentados em seguida os resultados do monitoramento do RC-HCS tanto no modo de resfriamento quanto no de aquecimento.

3.1 COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS CÂMARAS CONTROLE (CB2) E EXPERIMENTAL (CB1, COM O RC-HCS)

Analisa-se o desempenho térmico da CB1 em relação à CB2 em regime livre, ou seja, sem aplicação de resfriamento ou aquecimento pelo RC-HCS. As câmaras apresentam duas diferenças em suas características físicas a serem consideradas na análise. Quanto ao tipo de janela, a CB2 possui janela duplicada, com caixilho e vidro duplos, versus janela única com vidro simples na CB1, a qual conta com a instalação dos quatro RCMs que conferem massa térmica ao ambiente interno. Com o objetivo de comparar o comportamento térmico dos ambientes em dois períodos (quente e frio), foram selecionados seis dias como amostra, sendo três no mês de fevereiro e três no mês de maio.

A Tabela 2 mostra um comportamento semelhante nos diferentes dias analisados. Nota-se diferença entre as médias internas, sendo estas 0,4 °C mais altas em CB1, fundamentalmente devido às características das janelas. Tal diferença é relativamente pequena e consistente.

A diferença positiva da temperatura média diária nas duas câmaras quanto aos padrões externos é relevante e deve ser considerada nas análises de desempenho. Essas temperaturas médias internas são, em média, 3,7°C e 3,2°C superiores à temperatura média externa em CB1 e CB2, respectivamente. Isso significa que a temperatura média da CB1 é, em média, 0,5 °C mais alta que a temperatura média da CB2. Por fim, o Fator Decremental (FD) (relação entre amplitude térmica diária interna e externa), no caso da CB1, é em média 0,37 e no caso da CB2, 0,53, devido à introdução da massa de água contida nos RCMs.

Tabela 2: Temperaturas internas na CB2 e na CB1 em três dias de calor e três dias de frio.

Data	Temperaturas internas CB2				Temperaturas internas CB1				ΔT_{avg}	$\Delta T_{CB1}/\Delta T_{CB2}$
	Tmax	Tmin	Tavg	FD_{CB2}	Tmax	Tmin	Tavg	FD_{CB1}		
02/01/2022	28,4	22,0	25,0	0,46	27,6	23,2	25,2	0,32	-0,26	0,69
02/02/2022	28,8	23,6	26,2	0,51	28,3	24,8	26,6	0,34	-0,39	0,67
02/03/2022	28,1	23,2	25,7	0,45	27,9	24,7	26,4	0,29	-0,69	0,65
Média	28,4	22,9	25,6	0,47	27,9	24,2	26,1	0,32	-0,45	0,67
05/06/2022	21,9	16,4	19,0	0,66	21,5	17,4	19,4	0,49	-0,37	0,75
05/07/2022	20,7	15,6	18,3	0,55	20,6	16,8	18,7	0,41	-0,40	0,74
05/08/2022	19,7	14,8	17,5	0,54	19,3	15,9	17,9	0,37	-0,44	0,70
Média	20,8	15,6	18,2	0,58	20,5	16,7	18,6	0,42	-0,40	0,73

Fonte: os autores.

3.2 DESEMPENHO TÉRMICO DO RC-HCS NO MODO DE RESFRIAMENTO

Entre 26 e 29 de março de 2022, o RC-HCS foi avaliado nas seguintes condições: a) utilização de três dos cinco radiadores do SR/SC (4,41 m² de superfície); b) vazão média de água de aproximadamente 170 l/h; c) operação com sistema de controle no Circuito-1 (TES - SR/SC – RCM – TES) entre 20h00 e 6h00. A temperatura ambiente média situou-se em torno de 21°C, com máximas de até 29,7°C (Tabela 3), em dias de céu relativamente nublado com valores diários de radiação solar total entre 3,6 e 5,2 kWh/m² e picos de irradiância solar entre 955 e 1075 W/m². A velocidade média do vento nos quatro dias foi de 1,4 m/s com valores máximos de até 5,4 m/s.

O potencial de resfriamento radiativo noturno do SR/SC por unidade de área (CP) foi calculado com base na diferença da temperatura da água na entrada e saída do radiador e o fluxo de água através dele, de acordo com ERELL e ETZION, [11], do seguinte modo:

$$CP_{SR/SC} = \dot{m} \times cp \times \Delta T / A \quad (1)$$

Onde $CP_{SR/SC}$ (W/m²) é a potência instantânea de resfriamento do radiador por unidade de área, $\dot{m}$ (kg/s) é a vazão mássica de água, cp (J/kg.K) é o calor específico da água, ΔT (K) é a diferença de temperatura da água entre a entrada e saída do SR/SC e A (m²) é a área superficial do radiador. Os resultados destes cálculos são apresentados na Tabela 3. Podem ser observados valores de $CP_{SR/SC}$ entre 45 W/m² e 71 W/m², com valores instantâneos máximos de até 114 W/m².

Esse potencial de resfriamento depende fundamentalmente da nebulosidade, temperatura e umidade do ar e velocidade do vento. Neste estudo, a temperatura de uma placa metálica (Tr) exposta ao céu é medida, e a diferença entre a temperatura do ar e a da placa metálica (DTr) é usada como um indicador do potencial de resfriamento radiativo noturno [7].

Nos quatro dias da série, esse potencial foi baixo. Apenas a noite de 26-27/03 teve DTr ligeiramente superior às demais, com média de 3,2 K e valores máximos de até 4,9 K. Como esperado, foi observada uma alta correlação entre os valores de DTr e de $CP_{SR/SC}$ (com R^2 de 0,80).

Outra forma de se avaliar o desempenho termoenergético do sistema é analisando a quantidade de energia que o RC-HCS é capaz de retirar do RCM (Q_{RCM}) durante o período de circulação noturna, comparando-a com o potencial médio de resfriamento do RCM (CP_{RCM}). O calor dissipado nos RCMs foi calculado para esses quatro dias, por calorimetria, da seguinte forma:

$$Q_{RCM} = m \times cp \times \Delta T \quad (2)$$

onde Q_{RCM} (Wh) é a energia térmica retirada, m (kg) é a massa de água contida nos RCM (210.6 l), cp (kJ/kg.K) é o calor específico da água, ΔT (K) a diferença de temperatura da água nos RCM entre o início e o final do período de trocas térmicas (20:00h – 06:00h). A Tabela 3 apresenta os resultados desses cálculos.

Tabela 3: Redução de temperatura no RCM, energia extraída do RCM e capacidade de resfriamento médio durante o período noturno no RCM e no SR/SC.

	ΔTw7	Q_{RCM}	CP_{RCM}	$CP_{SR/SC}$
Data	K	Wh	W	W
26/03/2022	2,13	520	52	44.8
27/03/2022	3,85	942	94,2	62.6
28/03/2022	3,62	884	88,4	45.1
29/03/2022	4,21	1029	102,9	71.2
Média	3,45	714	71,4	55.9

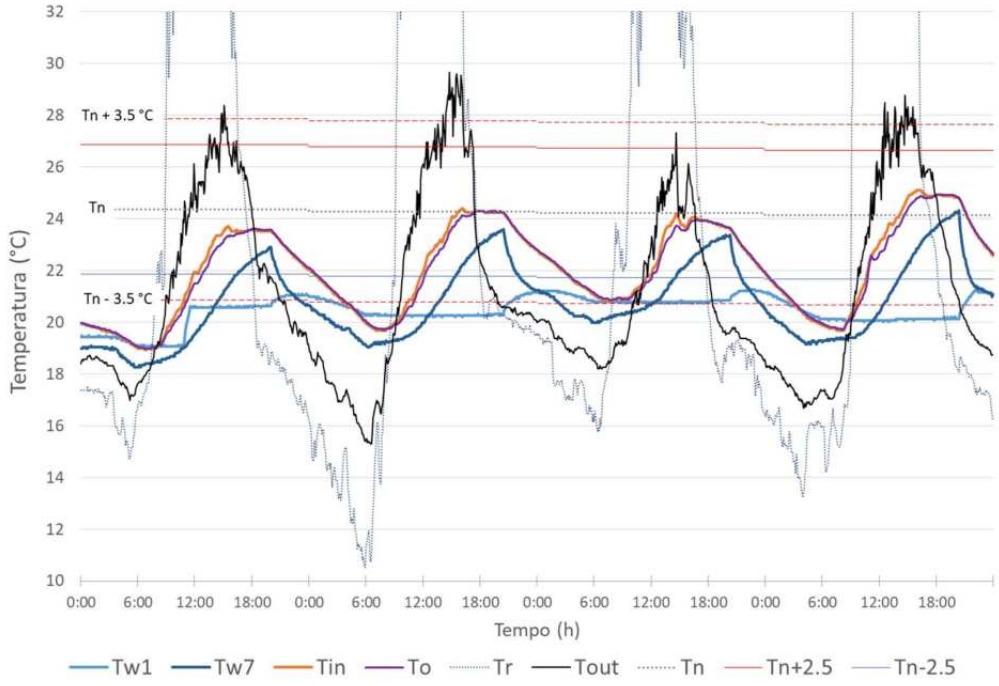
Fonte: os autores.

A Figura 9 mostra que, na CB1, a temperaturas do ar e a temperatura operativa estão dentro da faixa de conforto quando a temperatura externa ultrapassa Tn e até mesmo o limite superior de conforto adaptativo, com exceção de alguns momentos

em que a temperatura interna está abaixo do limite inferior de conforto. Neste caso, isso não representa um problema, pois mostra a capacidade do sistema em reduzir a temperatura média interna quanto a CB2 e ao ambiente externo. Enquanto a CB1, em regime livre, apresentava temperaturas internas, em média, 3,7°C acima das externas, com o RC-HCS em resfriamento esse valor é reduzido para 0,9°C, mesmo com condições climáticas não totalmente favoráveis ao resfriamento radiativo noturno. A diferença entre as temperaturas médias entre a CB2 e a CB1 nesses dias é de 1,5°C, com o resfriamento observado na CB1.

Nota-se também a capacidade do sistema em reduzir a temperatura máxima interna quanto a máxima externa ($\Delta T_{máx}$), com média de 4,2 °C, variando de 3,1 °C a 5,3 °C (Tabela 4).

Figura 9: Evolução da temperatura interna (Tin), externa (Tout), da placa metálica (Tr), temperaturas da água em TES (Tw1) e RCM (Tw7), temperatura neutra (Tn) e faixas de conforto adaptativo, no modo resfriamento, entre 26 e 29 de março de 2022.



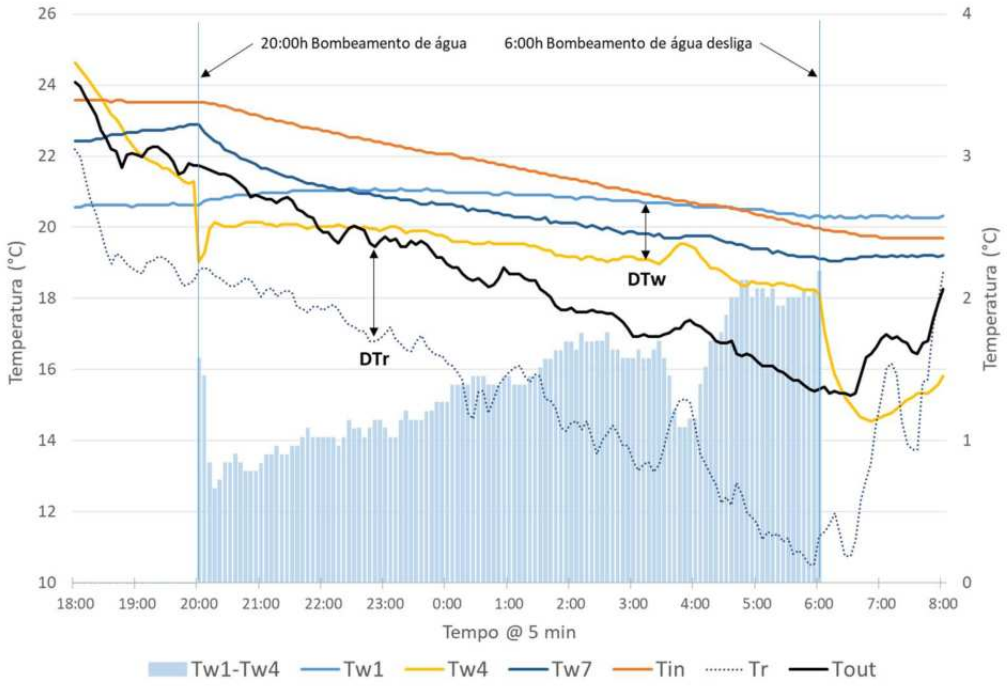
Fonte: os autores.

Tabela 4: Temperaturas internas e externas e indicadores de desempenho térmico do sistema em modo de resfriamento.

	Temperaturas externas			Temperaturas internas			$\Delta T_{méd}$	$\Delta T_{máx}$	FD
Data/Hora	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg			
26/03/2022	28.4	17.0	21.5	23.7	18.9	21.4	0.1	4.7	0.42
27/03/2022	29.7	15.3	21.3	24.4	19.7	22.2	-0.9	5.3	0.33
28/03/2022	27.3	18.2	20.8	24.2	20.8	22.4	-1.7	3.1	0.37
29/03/2022	28.8	16.7	21.4	25.1	19.7	22.5	-1.2	3.7	0.45
Médias	28.5	16.8	21.2	24.3	19.8	22.1	-0.9	4.2	0.39

Fonte: os autores.

Figura 10: Evolução da temperatura interna (Tin) e externa (Tout), temperatura da placa metálica (Tr), temperaturas da água em TES (Tw1), na saída do SR/SC (Tw4) e RCM (Tw7), no modo de resfriamento, entre 26 e 27 de março de 2022, com a circulação de água no Circuito-1.



Fonte: os autores.

3.3 DESEMPENHO TÉRMICO DO RC-HCS NO MODO DE AQUECIMENTO

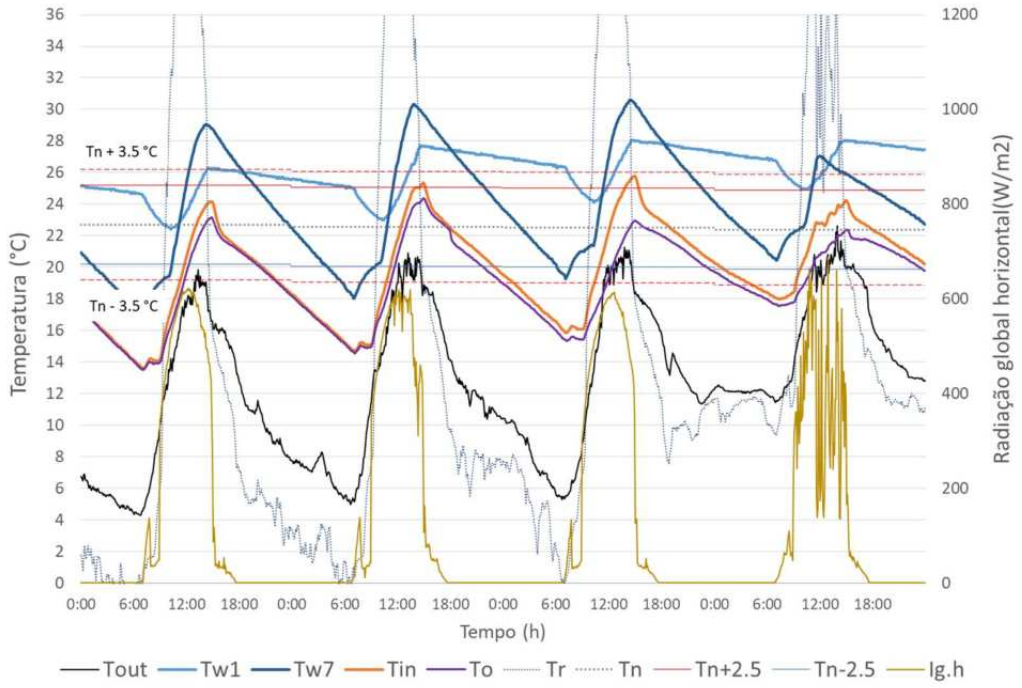
Entre 20 e 23 de maio de 2022 realizaram-se testes no modo aquecimento, dias caracterizados pela entrada de uma frente fria com mínimas entre 4 e 5 °C e máximas entre 19 e 21 °C (Figura 11 e Tabela 5). Os três primeiros dias tiveram céu relativamente claro, com radiação global total no plano horizontal entre 3,3 e 3,4 kWh/m², e valores de irradiancia máxima entre 610 W/m² e 620 W/m². O quarto dia foi um dia parcialmente nublado, com 2,6 kWh/m² de irradiancia total e máximas de até 689 W/m². Foram dias sem chuva e vento com velocidades médias em torno de 0,8 m/s e máximas de até 3,3 m/s.

O RC-HCS trabalhou nestes quatro dias acionado pelo sistema de controle automático. Durante os quatro dias, foram reunidas as condições para que, entre as 7h00 e 10h00, fosse acionado o Circuito-2 de aquecimento (circulação de água com aporte de calor do TES para o RCM). Posteriormente, deu-se o acionamento automático do Circuito-1, com aporte de calor por captação solar no SR/SC.

Em comparação com as temperaturas médias externas de 10-15°C, na CB1 as temperaturas médias variam entre 18,5 e 22°C, ou seja, cerca de 8°C acima das externas. O aquecimento demonstrado na CB1 deve-se principalmente ao calor fornecido através do RCM via Circuitos 1 e 2. O fornecimento de calor nos RCMs foi calculado para estes quatro dias (Tabela 5), conforme a equação 2. Considerando

diferenças de temperaturas da água entre 11,5 K e 12,5 K, obtêm-se aportes de calor da ordem de 2.800 a 3.000 Wh por dia, o que representa uma potência média de aquecimento da ordem de 380-440 W ou 120-140 W/m², dada a área total dos RCMs de 3,24 m².

Figura 11: Evolução da temperatura interna (Tin), externa (Tout) da placa metálica (Tr), temperaturas da água em TES (Tw1) e RCM (Tw7), temperatura neutra (Tn) e faixas de conforto adaptativo e radiação solar, no modo aquecimento, entre 20 e 23 de maio de 2022.



Fonte: os autores.

Tabela 5: Temperaturas internas e externas, energia fornecida ao RCM, potência média de aquecimento do período.

Data/Hora	Temperaturas externas			Temperaturas internas			ΔTw7	Q (Wh)	P (W)
	To.max	To.min	To.avg	Ti.max	Ti.min	Ti.avg			
20/05/2022	19,9	4,3	10,6	24,2	13,6	18,5	12,21	2.990	407
21/05/2022	20,9	5,0	12,1	25,4	14,7	19,6	12,27	3.000	439
22/05/2022	21,3	5,3	12,6	25,8	15,9	20,4	11,32	2.770	378
23/05/2022	22,6	11,5	15,5	24,2	18,0	20,9	6,58	1.610	327
Média	21.2	6.5	12.6	24.9	15.5	19.8	10.6	2.592	388

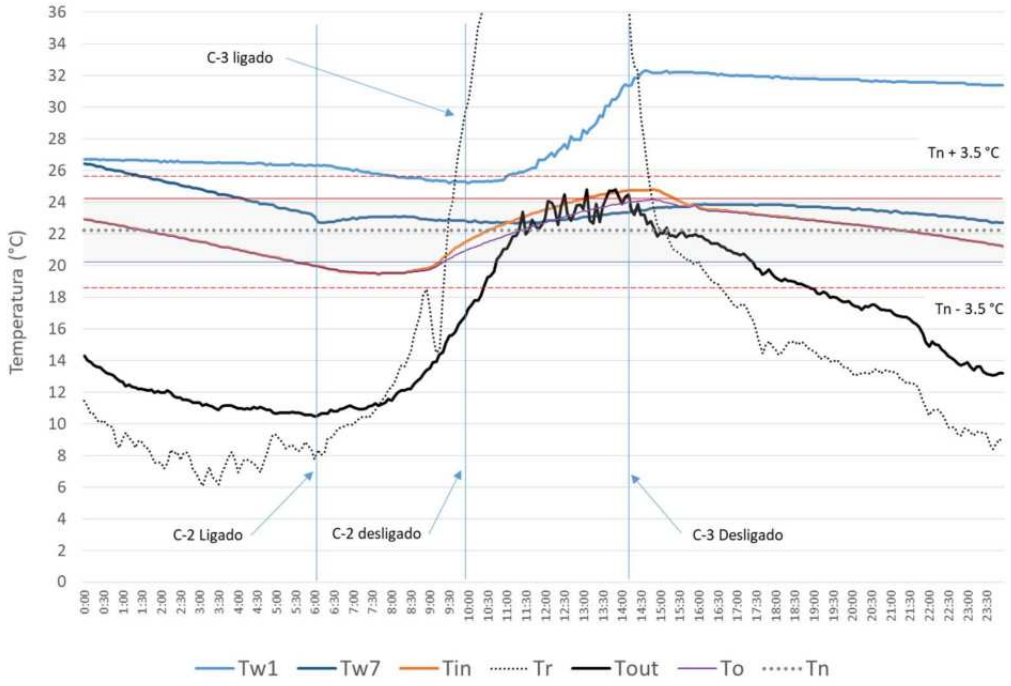
Fonte: os autores.

Quanto ao Fator Decremental, devido ao aquecimento adicional, o FD médio foi de 0,64, ou seja, superior ao CB1 (FD = 0,42) quando funciona em modo livre sem aquecimento ou resfriamento em estação fria.

A Figura 12 mostra como exemplo o dia 25 de maio de 2022, com a evolução das temperaturas representativas da operação do RC-HCS. Para este dia, o horário de início do sistema de controle automático foi alterado de 07h00 para 06h00. Quando o sistema de controle inicia a operação do RC-HCS às 06h00, o Circuito-2 é acionado

automaticamente e funciona até as 10h00, quando passam a valer as condições para ativação do Circuito -3. O término da operação se deu até próximo às 14h15. Durante este dia foram observadas condições de conforto térmico não só durante o período de trabalho estabelecido, mas também durante as 24 horas.

Figura 12: Evolução da temperatura interna (Tin), externa (Tout), da placa metálica (Tr), temperaturas da água em TES (Tw1) e RCM (Tw7), temperatura neutra (Tn) e faixas de conforto adaptativo em 25 de maio de 2022



Fonte: os autores.

CONCLUSÕES

A pesquisa mostrou as vantagens do sistema empregado tanto para resfriamento como para aquecimento, comprovando observações já feitas na fase de teste, em pequena escala. O sistema de controle inteligente, projetado para otimizar a operação do sistema, contribuiu para os resultados favoráveis obtidos.

Os potenciais médios de resfriamento radiativo noturno do SR/SC foram encontrados entre 45 W/m2 e 71 W/m2 com máximos de até 114 W/m2. A capacidade do sistema de reduzir a temperatura interna média em relação ao CB2 e ao ambiente externo foi confirmada. Por outro lado, no modo de aquecimento, foram observadas temperaturas internas médias entre 18,5°C e 22°C, cerca de 8°C acima das temperaturas externas médias de 10-15°C. Isso como consequência do aporte térmico da ordem de 2.800 a 3.000 Wh por dia, o que representa uma potência média de aquecimento entre 120-140 W/m², dada a área total dos RCMs de 3,24 m².

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

[1] SMITH, G., GENTLE, A. Radiative cooling: energy savings from the sky, **Nature Energy** 2 (2017) 17142. https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.142

[2] Zhang, F., Guo, H-A., Liu, Z., Zhang, G. A critical review of the research about radiant cooling systems in China. **Energy and Buildings** 235 (2021) 110756. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.0756

[3] 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. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.020

[4] 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. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.08.010

[5] KYU-NAM RHEE, KWANG WOOKIM. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment. **Building and Environment**. Vol 91, September 2015, Pages 166-190. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.040

[6] KYU-NAM RHEE, BJARNE W. OLESEN, KWANG WOO KIM. Ten questions about radiant heating and cooling systems. **Building and Environment.** 112 (2017) 367-381. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.030

[7] GONZALEZ CRUZ, E.; KRÜGER, E. Experimental study on a low energy radiant-capacitive heating and cooling system. **Energy and Buildings**, 255 (2022) 111674. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111674

[8] GONZALEZ CRUZ, E. M.; KRÜGER, E.; FERNANDES, L.; TRENTO, D. Resultados preliminares do desempenho térmico de um sistema de resfriamento radiante capacitivo. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2020. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1–8. .

[9] TREVISAN, L. Y. I.; TAMURA, C. A.; RIBEIRO, D. A.; GOMES, B. de L. M.; DRACH, P. R. C.; HARA, M. M.; KRÜGER, E. Construção de câmara bioclimática de baixo custo para estudos de ambiência térmica no brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2018. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 588–595.

[10] TREVISAN, L. Y. I. Concepção, construção e verificação da aplicabilidade de uma câmara bioclimática de baixo custo em estudos de conforto ambiental. **Tese**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2019. Curitiba.

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

[12] ASHRAE Standard 55 - Thermal environmental conditions for human occupancy, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017, Atlanta

[13] ISO 7726. Ergonomics of the thermal environment - Instrument for measuring physical quantities". Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization. November 1998.