

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA

SÉRGIO COSTA LANGE

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO PASSIVO PARA
O CLIMA DE CURITIBA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2016

SÉRGIO COSTA LANGE

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO PASSIVO PARA
O CLIMA DE CURITIBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia – Área de Concentração Tecnologia e Desenvolvimento

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger

CURITIBA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

L274a Lange, Sérgio Costa
2016 Avaliação de um sistema de resfriamento passivo para o clima
o clima de Curitiba / Sérgio Costa Lange.--
85 f. : il. ; 30 cm.

Texto em português, com resumo em inglês
Disponível também via World Wide Web
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal
do Paraná. Programa de Pós-graduação em Tecnologia, Curitiba,
2016
Bibliografia: f. 79-85

1. Resfriamento evaporativo – Curitiba (PR). 2. Temperatura.
3. Construção civil. 4. Refrigeração. 5. Tecnologia –
Dissertações. I. Krüger, Eduardo Leite, orient. II. Universidade
Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação
em Tecnologia. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 600

Biblioteca Central, Câmpus Curitiba

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador Professor Dr. Eduardo L. Krüger pela amizade, por compartilhar seu notório conhecimento e mostrar os caminhos desta difícil jornada.

Também agradeço ao meu colega e amigo Leandro Carlos Fernandes pelo companheirismo, pelas explicações e por dividirmos os desafios desta pesquisa que nos renderam bons frutos, seja no campo acadêmico, quanto no pessoal.

À UTFPR que mais uma vez me acolheu, sendo ela parte da minha história desde o segundo grau técnico, passando pelo curso de Engenharia, e agora com a pós-graduação no PPGTE.

E, por fim, agradeço minha esposa Léia Beatriz Ferreira pelo apoio irrestrito nas horas de estudo, pelo companheirismo e pelas palavras de incentivo. Este mestrado não seria possível sem seu considerável apoio. Muito obrigado.

RESUMO

LANGE, Sérgio C. **Avaliação de um sistema de resfriamento passivo para o clima de Curitiba.** 2016. 85 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

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, são estratégias de projeto bioclimático ainda relativamente pouco usadas no Brasil. O presente 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 situação de calor na cidade de Curitiba. Foram confeccionadas, monitoradas e comparadas inicialmente duas células-teste 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. Uma segunda configuração de ME também foi testada em um período de monitoramento subsequente, o que possibilitou comparar-se o efeito do resfriamento evaporativo com o uso isolado do sistema sem uso do REI, em situação apenas de aumento da massa térmica. Uma terceira configuração de ME buscou combinar o aumento da massa térmica aliado ao efeito do resfriamento evaporativo. Resultados apontam para a vantagem do uso do REI para o resfriamento interno das células-teste com: redução de 2,5°C da temperatura média e de 8,0°C de redução da temperatura máxima em relação ao caso base. Também foi verificado uma forte relação entre a temperatura interna devido ao resfriamento evaporativo e a depressão da temperatura de bulbo úmido.

Palavras-chave: Resfriamento Passivo, Resfriamento Evaporativo Indireto, Massa Térmica.

ABSTRACT

LANGE, Sérgio C. **Evaluation of an indirect passive cooling system under Curitiba climate**. 2016. 85 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

Direct evaporative cooling systems (DECS) based on sprinkling water indoors in the form of droplets and indirect evaporative cooling systems (IECS), characterized by the use of wetted roof or wall surfaces for cooling without increasing the indoor air moisture, consist of interesting bioclimatic strategies still not quite explored in Brazil. This study aims to evaluate the use of a particular form of IECS (which combines evaporative cooling and thermal mass brought about by a water reservoir) for indoor thermal control in warm conditions in Curitiba. Two test cells were initially built, monitored and compared to each other: a control module (CM) and an experimental module (EM), the latter provided with an evaporative pond. A subsequent configuration of the system which cancels out the evaporative function of the system and that is solely based on the increase of thermal mass, was tested in a second monitoring round. A third configuration of EM combining evaporative cooling and the increase of thermal mass was tested. Results showed a higher effectiveness of the IECS for the indoor cooling of the tested cells. The average temperature in EM was reduced in 2.5°C and the maximum temperature was reduced in 8.0°C in comparison with the CM. Results also showed a strong relation between the wet-bulb temperature depression and the internal temperature decrease achieved by the evaporative cooling strategy.

Keywords: passive cooling, indirect evaporative cooling, thermal mass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ano climático de referência para Curitiba plotado sobre o Diagrama Bioclimático da Edificação	17
Figura 2– Casa com sistema Skytherm concebido por Harold Hay (1967)	20
Figura 3– Desempenho sistema Skytherm	20
Figura 4 – Teto reservatório utilizado por Sánches (1993)	22
Figura 5 – Modelo de edificação proposto por Givoni (1994)	22
Figura 6 – Cobertura da Vivienda VBP-1 produzida por González.....	23
Figura 7– Células-teste utilizadas em Maracaibo.....	24
Figura 8– Células-teste com resfriamento evaporativo utilizada em Maracaibo	25
Figura 9– Células-teste com aumento da massa térmica utilizada em Maracaibo	25
Figura 10– Células-teste com sistema evaporativo e aumento da massa térmica utilizada em Maracaibo	26
Figura 11– Distribuição geográfica de estudos com tetos reservatório.....	27
Figura 12 – Célula-teste com coletores solares testados pelo M.I.T.	28
Figura 13 – Células-teste no Laboratório de Los Alamos	28
Figura 14 – Célula-teste utilizada em estudos na Espanha.....	29
Figura 15 – Célula-teste utilizada em pesquisas na Finlândia.....	29
Figura 16 – Células-teste de diferentes materiais.....	30
Figura 17 – Conjunto de células-teste – UNICAMP – 2003.....	31
Figura 18 – Célula-teste com diversos sensores internos de temperaturas.....	32
Figura 19 – Registro de temperaturas superficiais a partir de imagens termográficas.....	32
Figura 20 – Configuração 1: Módulo experimental (ME) e módulo de controle (MC).....	36
Figura 21 – Configuração 2: Módulo experimental (ME) e módulo de controle (MC).....	37
Figura 22 – Configuração 3: Módulo experimental (ME) e módulo de controle (MC).....	37
Figura 23 – Disposição dos módulos.....	39
Figura 24 – Módulos no local do experimento.....	39
Figura 25– Incidência de sombras nos dias 09/11/2014 e 02/01/2015 às 9:00, 12:00 e 15:00 horas.	40
Figura 26 – Data Loggers TagTemp USB e LogBox RHT LCD	41
Figura 27 – Verificação dos Sensores	42
Figura 28 – Sensor de temperatura do ar externo	42
Figura 29 – Faixa de aceitabilidade térmica.....	46
Figura 30 – Exemplo da variação da Tint como uma fração da diferença entre Text e Tint. ..	47
Figura 31 – Configuração 1: Módulo experimental (ME) e módulo de controle (MC).....	49
Figura 32 – Temperaturas do ar internas e externas medidas no período – configuração 1	49
Figura 33 – Temperaturas do ar internas e externas medidas três dias de experimento – configuração 1	50
Figura 34 – Diferenças térmicas entre MC e ME em relação à temperatura externa para o último dia de medição.....	52
Figura 35 – Correlação encontrada entre (To-Te) e TBU _{dep} (a) e entre (To-Tc) e TBU _{dep} (b) para o período diurno.....	54
Figura 36 – Valores de COP e PRM para os 24 dias de experimento.....	55
Figura 37 – Configuração 2: Módulo experimental (ME) e módulo de controle (MC).....	56
Figura 38 – Temperaturas do ar internas e externas para o período completo.....	56
Figura 39 – Temperaturas do ar internas e externas para três dias de medição	57
Figura 40 – Diferenças térmicas entre MC e ME em relação à temperatura externa para um dia de céu claro (em 09/01/2015)	59
Figura 41 – Valores de PRM para os 18 dias de experimento	60

Figura 42 – Configuração 3: Módulo experimental (ME) e módulo de controle (MC).....	62
Figura 43 – Temperaturas do ar internas e externas medidas do período completo	62
Figura 44 – Temperaturas do ar internas e externas medidas em três dias	63
Figura 45 – Diferenças térmicas entre MC e ME em relação à temperatura externa para o dia 16/01/15.....	65
Figura 46 – Correlação encontrada entre (T_o-T_e) e TBU_{dep} (a) e entre (T_o-T_c) e TBU_{dep} (b) para o período diurno.....	67
Figura 47 – Valores de COP e PRM para os 24 dias de experimento.....	68
Figura 48 –Comparação entre a configuração 1 e a configuração 2 via método preditivo	71
Figura 49 – Temperaturas do ar internas e externas medidas e estimadas em três dias.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Período de monitoramento para cada configuração	38
Tabela 2 – Valores médios medidos de ME, MC e ar externo para o período (°C).....	51
Tabela 3 – Diferenças médias relativas de ME em relação à Text e entre os módulos para o período diurno (°C).....	51
Tabela 4 – Temperatura de bulbo úmido - médias para o período (°C).....	53
Tabela 5 – Valores médios medidos de ME, MC e To para o período (°C)	58
Tabela 6 – Diferenças médias relativas de ME em relação à Text e entre os módulos para o período diurno (°C).....	58
Tabela 7 – Valores médios medidos de ME, MC e ar externo para o período (°C).....	64
Tabela 8 – Diferenças médias relativas de ME em relação à Text e entre os módulos para o período diurno (°C).....	64
Tabela 9 – Temperaturas de bulbo úmido para o período (°C)	66
Tabela 10 – Comparação de desempenho das configurações estudadas	69
Tabela 11 – Comparação de desempenho das configurações 1 e 2 no mesmo período	72
Tabela 12 – Comparativo para o período, diferenças em termos de temperatura do ar (°C) encontradas nos dois módulos para a configuração 1 (função evaporativa) e para a configuração 2 (função massa térmica)	73
Tabela 13 – Comparativo entre alguns estudos realizados utilizando células-teste	74

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
COP	Coefficiente de Performance
CTS	Ciência, Tecnologia e Sociedade
NBR	Norma Brasileira
MC	Módulo de Controle
ME	Módulo Experimental
ONU	Organização das Nações Unidas
PRM	Potencial de Resfriamento Médio
RED	Resfriamento Evaporativo Direto
REI	Resfriamento Evaporativo Indireto
SPEEI	<i>Sistema Pasivo de Enfriamiento Evaporativo Indirecto</i>
SRP	Sistema de Resfriamento Passivo
T	Temperatura
To	Temperatura do ar
Te	Temperatura interna no módulo experimental
Tc	Temperatura interna no módulo de controle
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido
TBU_{dep}	Depressão da Temperatura de Bulbo Úmido
TR	Teto Reservatório
ZB	Zona Bioclimática

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SOCIEDADE (CTS).....	11
1.2	SISTEMAS DE RESFRIAMENTO PASSIVO E O AMBIENTE CONSTRUÍDO	13
1.3	OBJETIVOS	16
1.4	JUSTIFICATIVAS	16
1.4.1	Clima de Curitiba	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	TETOS-RESERVATÓRIO PARA RESFRIAMENTO EVAPORATIVO.....	19
2.2	ESTUDOS AUXILIADOS POR CÉLULAS-TESTE AO AR LIVRE.....	28
3	METODOLOGIA.....	34
3.1	CONFECÇÃO DAS CÉLULAS-TESTE	34
3.1.1	Configuração 1: Evaporação Passiva	35
3.1.2	Configuração 2: Massa Térmica.....	36
3.1.3	Configuração 3: Evaporação Passiva e Massa Térmica	37
3.2	PERÍODO DE MONITORAMENTO	38
3.3	LOCAL DO EXPERIMENTO	39
3.4	REPOSIÇÃO DA ÁGUA	40
3.5	AQUISIÇÃO DE DADOS	41
3.6	DEPRESSÃO DA TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO.....	42
3.7	COEFICIENTE DE PERFORMANCE DO SISTEMA EVAPORATIVO	44
3.8	POTENCIAL DE RESFRIAMENTO MÉDIO (PRM).....	44
3.9	TEMPERATURA DE CONFORTO ADAPTATIVO.....	45
3.10	GERAÇÃO DE EQUAÇÃO PREDITIVA	46
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
4.1	TETO-RESERVATÓRIO ABERTO E SOMBREADO (CONFIGURAÇÃO 1)	49
4.1.1	Temperatura de Bulbo Úmido e Desempenho Evaporativo	53
4.1.2	Coeficiente de Performance (COP) e Potencial de Resfriamento Médio (PRM).....	54
4.1.3	Condições de conforto térmico.....	55
4.2	TETO-RESERVATÓRIO VEDADO E ISOLADO (CONFIGURAÇÃO 2).....	56
4.2.1	Potencial de Resfriamento Médio (PRM)	60
4.2.2	Condições de conforto térmico.....	61
4.3	TETO-RESERVATÓRIO ABERTO E SOMBREADO COM MASSA TÉRMICA (CONFIGURAÇÃO 3).....	62
4.3.1	Temperatura de Bulbo Úmido e Desempenho Evaporativo	65
4.3.2	Coeficiente de Performance (COP) e Potencial de Resfriamento Médio (PRM).....	67
4.3.3	Condições de conforto térmico.....	68
4.4	COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DAS CONFIGURAÇÕES	69
4.4.1	Comparação entre a Configuração 1 (Evaporativo) e Configuração 2 (Massa Térmica) a partir de Equação Preditiva.....	71
5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	74
6	CONCLUSÕES.....	77
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

O homem, nos últimos 150 anos, desenvolveu uma nova forma de se relacionar com o planeta, mudou drasticamente os meios de produção dos insumos necessários para a sua existência e criou um mundo artificial baseado no conhecimento científico e na tecnologia. Essa nova forma de relacionamento se fez necessária devido à explosão demográfica ocorrida no planeta. Enquanto em 1800 a população do mundo era de aproximadamente 980 milhões de pessoas, em 1900 chegou a 1,65 bilhão, em 2000 ela atingiu 6 bilhões e, segundo dados da ONU, em 2050, a população mundial deve ser de aproximadamente 9,7 bilhões de indivíduos (ONU, 2016).

A sociedade teve que necessariamente se reinventar para prover alimentação e condições de subsistência para esse novo contingente de pessoas. O conhecimento científico e a tecnologia tiveram um papel protagonista neste novo cenário, tanto por melhorar as condições de existência para esse aumento exponencial da população, quanto por ser, ela própria, um dos motivos para esse crescimento. Por outro lado, o impacto que a tecnologia causava na sociedade gerava, e ainda gera, consequências negativas. O aumento no consumo e sua forma de produção não levou em conta uma relação harmoniosa com a natureza. Cutcliffe (2003) colocou da seguinte forma “Durante anos, uma tecnologia fora de controle, cujo único interesse é obter o máximo de benefício, tem envenenado nosso ar, devastado nosso solo, cortado nossas árvores e destruído nossos recursos hídricos” (CUTCLIFFE, 2003).

A sociedade de hoje demanda que os artefatos tecnológicos busquem uma reconciliação do mundo cultural com o mundo natural. Os recursos energéticos não renováveis, como o petróleo, além de promoverem impactos ambientais negativos, já mostram sinais de escassez. Dentro deste contexto, as tecnologias passivas têm um papel importante, pois trazem soluções de baixo consumo energético e integradas com a natureza. Ao mesmo tempo, uma visão crítica da tecnologia e sua interação com a sociedade são de grande importância em busca de uma relação mais saudável e sustentável do homem, do meio ambiente e de suas relações sociais.

O presente trabalho traz, inicialmente, uma breve discussão entre este relacionamento da ciência, tecnologia e da sociedade, e, em seguida, inicia a abordagem de um sistema passivo de resfriamento, tecnologia com baixo consumo energético aplicado à área de ambiente construído.

1.1 CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SOCIEDADE (CTS)

O campo CTS tem uma história recente no mundo. Questões da ciência e tecnologia foram, até os anos 50, vistas como algo que estava à parte da sociedade, cunhadas de um certo determinismo onde sua dinâmica acontecia a despeito da sociedade em que estava inserida. Essa situação começou a ser questionada mais fortemente nos anos 50, num mundo pós-guerra, onde as consequências do uso desenfreado da tecnologia estavam causando desdobramentos indesejáveis a certos grupos. Desta forma, correntes de pensamento deterministas, onde a visão linear era defendida, e construtivistas, onde a construção da tecnologia era uma consequência da própria dinâmica da sociedade, foram frutos de grandes discussões em meados do século passado.

A partir do século XVIII, o mundo passou por um momento de grande transformação devido à Revolução Industrial. O processo de produção mudou radicalmente da forma artesanal para a forma industrial. Com isso, aquilo que demorava tempos para ser produzido começou a ser feito em escala. A rapidez e a produção em escala democratizaram os produtos que até então eram exclusivos de minorias. A forma de produção e os produtos e serviços da indústria ocasionaram uma total reformulação da sociedade.

Os artefatos tecnológicos facilitaram a vida cotidiana, os novos meios de transporte e comunicação geravam proximidades até então jamais vistas. O mundo estava maravilhado com o que a tecnologia podia proporcionar. No século XIX, principalmente nos Estados Unidos, a sociedade percebia a tecnologia como algo maravilhoso, que resolvia problemas e criava o bem-estar. Essa atmosfera de excitação moldou uma forma de pensamento determinista que perdurou hegemônica até o começo do século XX.

O determinismo tecnológico tinha a ciência e a tecnologia como as principais forças do mundo moderno e que definiam seus padrões. A tecnologia como uma força libertadora que gerava as mudanças sociais. Os jornais da época estampavam “A era do progresso”. Era uma visão dogmática onde a tecnologia determinava o curso dos eventos históricos (SMITH; MARX, 1996).

No começo do século XX, a indústria ganhou uma ferramenta capaz de potencializar seu alcance: a publicidade. Com essa poderosa ferramenta, as indústrias conseguiam vincular seus produtos a questões como: bem-estar, felicidade, solução de problemas, além de atingir um público muito maior. Esse fato em si teve, e ainda tem, um impacto muito grande na cultura. A indústria conseguia assim criar produtos não apenas para resolver problemas e

atender as necessidades, mas também para suprir desejos, muitos deles criados por campanhas de marketing.

Todos esses fatos fizeram com que uma visão tecnocrática entrasse na cultura, “Usando produtos da nova tecnologia, além de ganhar tempo, as pessoas ficavam mais felizes, saudáveis e animadas quando o trabalho estava concluído”. A tecnologia havia se tornado a causa do bem-estar das pessoas. Em contraste com a visão de Thomas Jefferson, que via a tecnologia como meio para se atingir o bem-estar social, a sociedade estava glorificando a “marcha da invenção” (SMITH; MARX, 1996).

Em oposição ao pensamento determinista, a linha construtivista entendia que a tecnologia não andava sozinha, mas sim, era construída pela sociedade e suas relações. Ainda em 1856, Thomas Jefferson, observando os caminhos que a sociedade tomava, perguntou “Os homens estão melhores? ”. Expressões como “O progresso moral não aconteceu”, “O homem como ferramenta da ferramenta”, foram ganhando corpo conforme as consequências negativas geradas pelo avanço tecnológico se concretizavam (SMITH; MARX, 1996).

Lewis Mumford, sociólogo e filósofo americano, foi um grande crítico do processo determinista, foi contemporâneo das duas grandes guerras, da escalada armamentista e do desenvolvimento industrial. Em 1934 fez a seguinte citação: “Esperamos que a nova ciência reconcilie as diferenças entre máquina e espírito humano em busca de uma sociedade mais humana” (MUMFORD, 1964). Langdon Winner (1996) observou que o uso de tecnologias carregava consigo um sentido político “Usualmente não paramos para pensar que um dispositivo ou projeto tenha sido criado para que produza um conjunto de consequências e não apenas o seu uso explícito”. Alguns projetos ou mudanças de tecnologia eram utilizados com um objetivo político ou de isolamento social (WINNER, 1996).

Assim, dentro deste embate entre determinismo e construtivismo, a cultura se constituía e suas manifestações locais e mundiais acompanhavam esse movimento. Principalmente na Europa e Estados Unidos esses movimentos expressavam mudanças na arte, na arquitetura, na música, etc. (HUGHES, 2008). No Brasil, a cultura sofria o impacto desse processo de avanço tecnológico com certo descompasso, pois o país sempre esteve marginalizado no tocante a avanços tecnológicos no mundo. Situações como a escravatura, que perdurou até o final do século XIX, tornavam a mão de obra barata o que não incentivava os avanços de produtividade. Ainda no século XIX, na época do império, esforços de grandes empresários como Irineu Evangelista de Souza, o Visconde de Mauá, trouxeram iluminação, portos, estradas de ferro para algumas localidades do Brasil, mas questões políticas não deixaram esse avanço perdurar (CALDEIRA, 1995).

No campo da arquitetura e do urbanismo, os avanços tecnológicos criaram condições de aglutinação das pessoas em cidades cada vez mais populosas. Com a tecnologia, foram possíveis construções mais leves, o uso de elevadores promoveu a verticalização das cidades e estratégias ativas de condicionamento interno da edificação, tais como: climatização, iluminação artificial e de acústica, trouxeram conforto para estes novos espaços. Entretanto, seu uso em escala e com crescimento exponencial, mostrou que os materiais e as técnicas utilizadas não estavam em sintonia com o meio natural, deixando esse último quase que em extinção nos grandes centros.

Atualmente, soluções tecnológicas sustentáveis têm como objetivo uma reconciliação entre essa nova dinâmica de vida da sociedade e a natureza. Áreas como arquitetura bioclimática, arquitetura solar passiva, arquitetura sustentável, buscam promover um melhor conforto e saúde no ambiente construído com baixo consumo energético. Estudos interdisciplinares de: técnicas construtivas, materiais, iluminação, acústica, climatização, fisiologia, climatologia, entre outros, têm trazido grandes avanços neste sentido.

Assim, o campo ciência, tecnologia e sociedade (CTS), através da sua interdisciplinaridade, busca analisar criticamente o fruto dessa relação promovendo uma discussão sadia em torno dos avanços tecnológicos e da sociedade, repercutindo positivamente na melhoria deste último.

1.2 SISTEMAS DE RESFRIAMENTO PASSIVO E O AMBIENTE CONSTRUÍDO

Atualmente, 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 considera o 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 for considerado que a energia elétrica brasileira está utilizando cada vez mais fontes não renováveis. Devido às condições hidrológicas desfavoráveis e ao alto custo para implantação, 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 fontes energéticas renováveis 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 pode promover impacto bastante positivo. 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 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 (BATISTA, LAMBERTS, 2007; SILVA, 2004).

O Resfriamento Evaporativo Indireto (REI), caracterizado pela: umidificação de coberturas, uso de vegetação em telhados, e tetos-reservatório, também vem ganhando espaço no mercado e sendo objeto de estudos que apontam bons resultados (CAVALCANTI, PRADO, 2001; CAVALCANTI, 2001; LABAKI, TEIXEIRA e TAVARES, 2005; NASCIMENTO, 2005; RORIZ, 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.

O teto-reservatório para resfriamento passivo, objeto deste estudo, funciona como um elemento de transferência de calor o qual absorve o calor do interior da edificação e é resfriado: devido à evaporação da água; por radiação por ondas longas para o céu; e por convecção. Adicionalmente, a massa de água do teto-reservatório aumenta a inércia térmica do sistema. Como resultado deste processo temos uma queda de temperatura interna sem aumento da umidade do ar.

O uso de tetos-reservatório para melhorar o conforto térmico de uma edificação apresenta duas grandes vantagens: a principal vantagem é o fato do telhado de uma edificação ser a parte mais exposta ao céu, facilitando a troca térmica com o ambiente externo; e também o fato de ser possível colocar na cobertura da edificação um reservatório de água promovendo o resfriamento evaporativo. Entretanto, algumas desvantagens se apresentam. A principal

delas é o fato do sistema poder atender apenas edificações térreas ou com no máximo dois andares, visto que edificações mais altas diluem a proporção do volume interno de ar a ser resfriado e a área atendida pelo teto-reservatório. A distância entre o teto-reservatório e andares mais distantes inviabilizam a troca térmica. Outras duas desvantagens pouco abordadas nos estudos revisados são: a questão da reposição da água nos tetos-reservatório e o esforço adicional que o mesmo pode acarretar na estrutura da edificação.

Buscando explorar as vantagens do REI convencional e verificar outros arranjos possíveis, diversos pesquisadores têm realizado experimentos com tetos-reservatório buscando aumentar o conforto térmico de edificações utilizando tetos-reservatórios tanto para resfriamento quanto para aquecimento (SHARIFI, YAGAMATA, 2015). Em 1980, o israelense Baruch Givoni realizou vários experimentos em células-teste com teto-reservatório, os resultados atingidos reduziram a temperatura máxima em 3,0°C, chegando a 4,5°C quando a cobertura do teto-reservatório era retirada no período noturno explorando também o resfriamento radiativo (GIVONI, 1981). Na Grécia, Spanaki et al. (2014) reduziram tanto a temperatura interna quanto a amplitude máxima em 30% em relação ao caso base, sem o sistema evaporativo atuante (SPANAKI *et al.*, 2014).

González, inspirado em estudos anteriores (GIVONI, 1984; SÁNCHEZ, 1993), utiliza uma configuração para o sistema, que chama de “*Sistema Pasivo de Enfriamiento Evaporativo Indirecto*” (SPEEI). A ideia é cobrir os ambientes a serem resfriados com um teto-reservatório metálico, o qual armazena água. Esta configuração permite aumentar a inércia térmica da edificação, melhorar a troca térmica com o ar interno e explorar o resfriamento evaporativo, podendo inclusive se utilizar do resfriamento radiativo noturno. Contrariando as expectativas, o SPEEI implantado apresentou bons resultados mesmo para o clima quente e úmido da cidade de Maracaibo, na Venezuela (GONZÁLEZ-GARCIA, 2010). Para a cidade brasileira de Florianópolis (GONZALEZ *et al.*, 2014), utilizando as mesmas variações das células-teste em Maracaibo, atingiu-se uma redução da temperatura máxima interna em relação à temperatura externa de 10,4°C.

Recentemente, uma grande revisão foi realizada por Ayyoob Sharifi e Yoshiki Yagamata (2015), onde mais de 80 estudos utilizando técnicas de tetos-reservatório tanto para resfriamento quanto para aquecimento passivo de edificações foram analisados. Os autores concluíram que, para o dia a dia moderno, onde as pessoas passam mais de 90% do seu tempo de vida dentro de edificações e que é responsável por consumir aproximadamente 35% a 40% da energia total produzida, conforme citado pelos autores, o uso de técnicas passivas pode

contribuir para a estabilização térmica, através da redução significativa no consumo de energia em edificações (SHARIFI; YAGAMATA, 2015).

1.3 OBJETIVOS

Este estudo tem por objetivo avaliar o efeito que um Sistema de Resfriamento Passivo (SRP), utilizando-se das estratégias de resfriamento evaporativo indireto e aumento de massa térmica, pode causar na temperatura interna de uma célula-teste em meses relativamente quentes do clima de Curitiba, cidade com clima temperado úmido e verão temperado, com classificação Köppen-Geiger Cfb, localizada, conforme a ABNT NBR 15220/2005, na Zona Bioclimática 1.

Também são objetivos deste estudo: avaliar o desempenho térmico do sistema através de um coeficiente de performance (COP em %), seu potencial de resfriamento (PRM, dado em W/m^2) e as condições térmicas de conforto pelo método do somatório de graus-hora para resfriamento (dado em $^{\circ}C.h$).

1.4 JUSTIFICATIVAS

Dada a qualidade dos resultados obtidos por González (GONZÁLEZ-GARCIA, 2010; GONZÁLEZ *et al.*, 2014), 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 na cidade de Maracaibo, Venezuela, 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 (GONZÁLEZ; 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 térmico (GONZÁLEZ; KRÜGER; GIORDANO, 2014). Experimentos utilizando SPEEI, aqui denominados SPR (Sistemas Passivos de Resfriamento) também mostraram bons resultados para a diminuição da temperatura máxima e da amplitude térmica no interior das células-teste na cidade de

Florianópolis, de clima temperado subtropical e verão quente, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger Cfa (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 desconforto térmico tanto no inverno como no verão.

1.4.1 Clima de Curitiba

A cidade de Curitiba se localiza na região sul do Brasil. Possui latitude $25^{\circ} 31' S$, longitude $49^{\circ} 10' W$ e altitude média de 911m. As normais climatológicas 1961-1990 indicam que, no período de verão, a média das temperaturas máximas mensais (jan-mar) é de $26,3^{\circ}C$, sendo a média das temperaturas mínimas de $16,0^{\circ}C$. Para esse período, a temperatura máxima absoluta ocorreu em fevereiro de 1975 e foi de $34,8^{\circ}C$ (INMET, 2015). No Zoneamento Bioclimático Brasileiro, a cidade está inserida na Zona Bioclimática 1 (ABNT, 2005) e classificação de clima temperado Cfb de acordo com a classificação climática Köppen-Geiger. A carta psicrométrica a seguir apresenta dados do ano climático de referência (Figura 1).

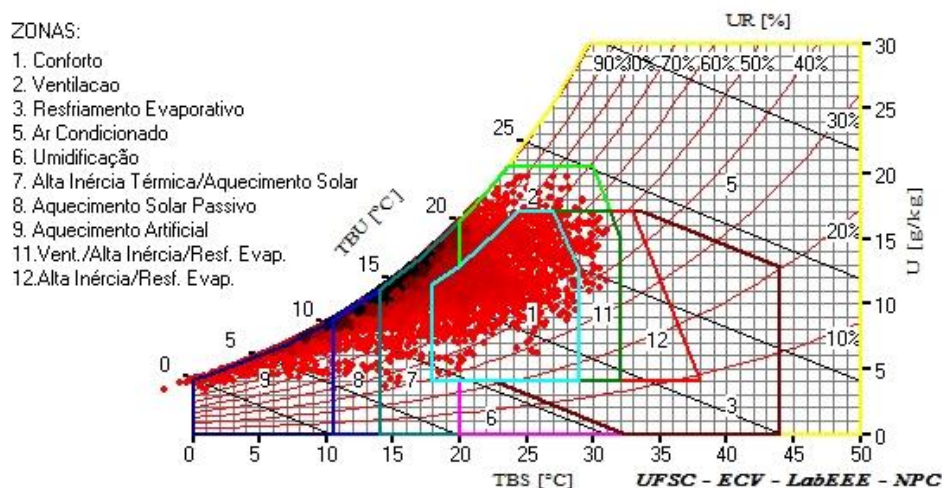


Figura 1 – Ano climático de referência para Curitiba plotado sobre o Diagrama Bioclimático da Edificação

Fonte: Programa Analysis BIO.

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 capacidade térmica da cobertura, 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% para ambas as estratégias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TETOS-RESERVATÓRIO PARA RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

Segundo Sánches (1993), o primeiro estudo quantitativo de resfriamento evaporativo utilizando-se de um teto-reservatório ocorreu em 1939 nos Estados Unidos e foi realizado por F.C. Houghton, H. T. Olson e Carl Gutlebert. O experimento obteve bons resultados e o estudo foi publicado na edição de 1953 do “*Guide and Data Book*” da ASHVE (*American Society of Heating and Ventilating Engineers*). Entretanto, com o surgimento dos materiais isolantes para cobertura das edificações, esta forma de resfriamento caiu em desuso. Ainda, segundo o autor, diversos outros estudos com configurações diferentes buscavam reduzir a temperatura através do uso da evaporação passiva combinada ou não com outros métodos passivos de resfriamento. Em 1965, o uso de um teto-reservatório com isolamento móvel foi proposto por Harold Hay como maneira de proporcionar calor no inverno e resfriamento no verão (SÁNCHESES, 1993).

Em 1967, Harold Hay e John Yellott, na cidade de Phoenix, Arizona, localizada nos Estados Unidos, com latitude de 33°25'N, longitude 112°0'W, altitude média de 337m, com classificação Köppen-Geiger Bwh, quente e árido, construíram uma pequena edificação de um quarto que recebeu um teto-reservatório com telhado móvel. No verão, durante o dia, o reservatório de água era sombreado e, durante a noite, aberto. Já, no inverno, a operação era inversa, o telhado era aberto para a água receber a radiação solar durante o dia e fechado durante a noite e dias nebulosos. O experimento ocorreu por aproximadamente 15 meses, quando a temperatura externa chegou até 46°C. Durante este período foram coletados dados para o clima quente-seco e quente-úmido. Os resultados mostraram que, durante o ano, a temperatura dentro da edificação, durante o dia, ficou entre 21 e 26,6°C, não necessitando assim formas suplementares ativas de condicionamento do ar, tanto para aquecimento quanto para resfriamento (HAY; YELLOT, 1969)

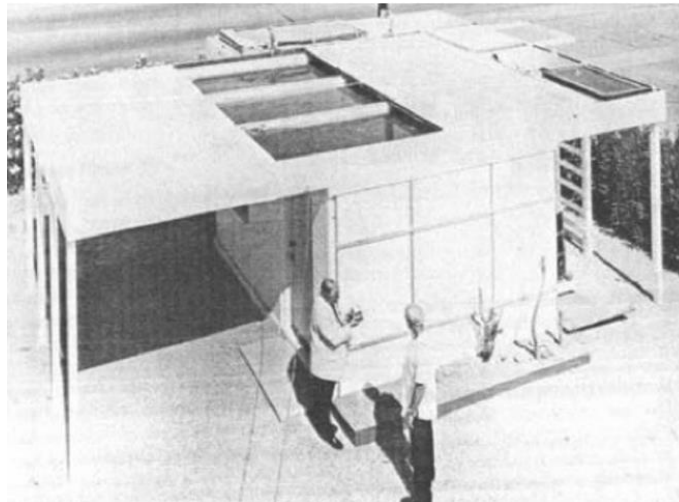


Figura 2– Casa com sistema Skytherm concebido por Harold Hay (1967)
Fonte: <http://misfitsarchitecture.com>

Esse sistema, em seguida, foi comercializado com o nome de *Skytherm* (Figura 2) e apresentava um excelente desempenho. Na cidade de Atascadero, California, localizada nos Estados Unidos, com latitude de 35°29'N, longitude 120°40'W, altitude média de 268m, com classificação Köppen-Geiger Csb, quente e semi-árido, durante o verão, a temperatura interna do ar variou de 20,0°C a 23,5°C. A Figura 3 apresenta o desempenho de um dia de monitoramento do sistema. Enquanto a máxima externa chegou a aproximadamente 34°C, a temperatura máxima interna ficou em aproximadamente 21°C (GIVONI, 2011).

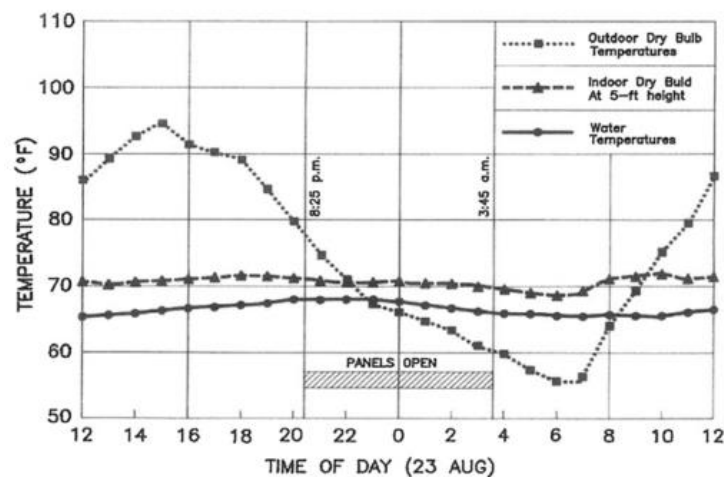


Figura 3– Desempenho do sistema Skytherm
Fonte: (GIVONI, 2011)

Em 1980, Givoni realiza diversos experimentos utilizando células-teste, mas antes coloca as principais vantagens e também desvantagens de se utilizar o telhado para promover o conforto térmico de edificações. As principais vantagens seriam: o fato do telhado ser a

parte mais exposta ao céu de uma edificação, facilitando o resfriamento por radiação noturna e também o teto pode ser provido de um reservatório de água para realizar o resfriamento evaporativo. Entretanto, Givoni também coloca a principal desvantagem do sistema o fato de poder atender apenas edificações térreas ou com no máximo dois andares, sendo esta sua grande limitação.

Givoni utilizou, como células-teste, pequenas caixas de madeira com dimensões de 55,0x55,0x50,0(cm), revestidas com 5,0cm de poliestireno expandido e, como cobertura, utilizou uma laje de concreto de 4,5cm de espessura. Uma das caixas recebeu uma cobertura de 5cm de poliestireno e mais 10cm de lã de rocha, sendo este o caso base. Em seguida, a outra caixa recebeu sete variações de coberturas. Duas variações apresentaram melhores resultados para o clima quente e árido em Sede Boqer, em Israel, com latitude de 30°52'N, longitude 34°47'E e altitude média de 477m: teto-reservatório sombreado e o teto-reservatório sombreado, mas a cobertura sendo retirada no período noturno, permitindo a perda de calor por radiação (ondas longas).

O teto-reservatório sombreado reduziu a temperatura média, em relação ao caso base, em 3,5°C, com uma redução nas temperaturas máximas de 3,0°C. Quando o mesmo sistema foi resfriado por radiação no período noturno, a redução da temperatura média chegou a 5,0°C e redução nas máximas de 4,5°C, entretanto, segundo Givoni, este último, apesar da eficiência, teria seu custo bastante elevado pela necessidade de mecanismo de retirada da cobertura (GIVONI, 1981).

Em diversos outros experimentos realizados, em Sede Boqer, no Instituto de Pesquisa do Deserto, Givoni, utilizando-se da técnica de resfriamento por evaporação passiva indireta, obteve reduções de temperatura da água no teto-reservatório em relação ao ar externo de 3°C, com uma queda de 2°C no ar interno (GIVONI, 1984).

Na Universidade de Colima, localizada na cidade de Colima no México, com latitude de 19°10'N, longitude 103°53'W, altitude média de 400m, com classificação Köppen-Geiger Aw, tropical com estação seca, Luis Sánches (1993) constrói seis protótipos de pequenas dimensões (aprox. 2,25m³), em adobe, todos configurados com sistemas de resfriamento passivo. Um dos protótipos recebe um teto-reservatório ventilado (Figura 4).

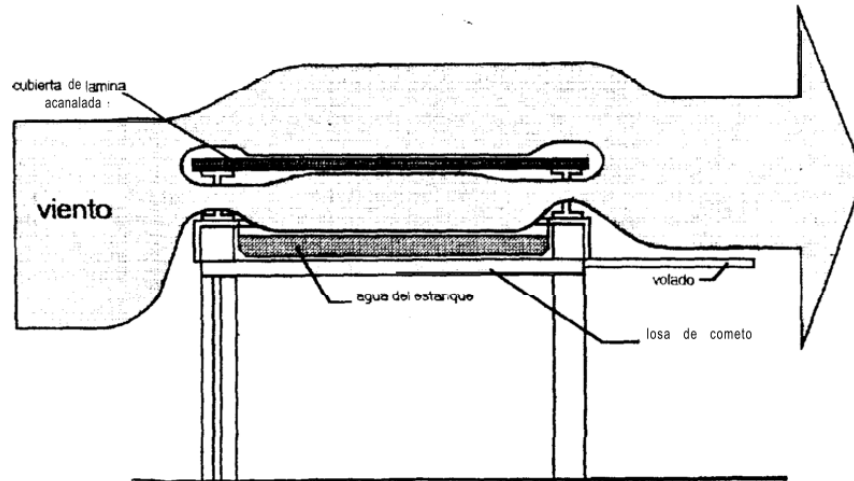


Figura 4 – Teto-reservatório utilizado por Sanches (1993)
Fonte: (SÁNCHEZ, 1993)

Os resultados foram analisados conforme sua eficiência em graus-hora em relação ao caso base (sem sistema passivo de resfriamento), e os resultados mostram bastante efetividade para o clima da região. No mês de julho, a redução em graus-hora foi de 58%, enquanto no mês de janeiro a redução em graus-hora atingiu máximo de 98% (SÁNCHEZ, 1993).

No ano de 1994, Givoni publica um artigo referente aos princípios de construção de edifícios em locais quentes e úmidos onde apresenta a massa térmica do edifício como uma estratégia de resfriamento, mesmo quando este está sujeito à ventilação, contrariando o entendimento até então de como construir bioclimaticamente nessas regiões (GIVONI, 1994). Após vários estudos, Givoni (1994) propõe um modelo de edificação com água sobre laje e teto ventilado (Figura 5).

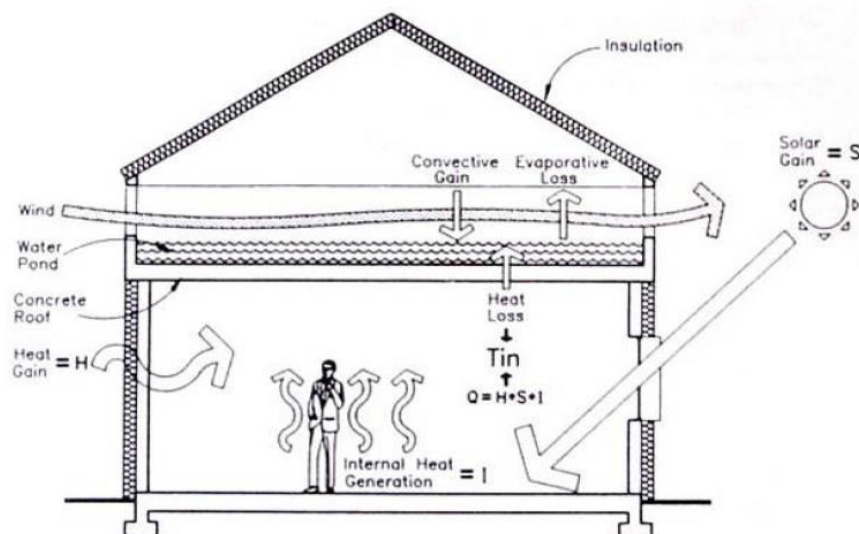


Figura 5 – Modelo de edificação proposto por Givoni (1994)

Outros estudos foram realizados em diversas partes do mundo, Israel, Iraque, México, explorando o resfriamento evaporativo e a sua combinação com outras formas passivas de resfriamento. Em 1997, González concebe um protótipo de edificação com um teto-reservatório sombreado, a diferença deste reservatório para os demais é que o mesmo é feito com chapa metálica, o que facilita a troca térmica entre o teto e o meio interno (GONZÁLEZ-GARCIA, 2010).

Em 2000, buscando uma solução de baixo custo, sustentável e que promova conforto térmico em moradias para atender população de baixa renda, González constrói, na cidade de Maracaibo, localizada na Venezuela, com latitude de 10°39'N, longitude 71°33'W, altitude média de 40m, com classificação Köppen-Geiger BSh, clima quente e úmido, uma casa experimental (*vivienda bioclimática VBP-1*) (Figura 6), onde os dormitórios recebem o teto-reservatório dentro de um telhado sujeito à ventilação. Na cidade de Maracaibo, a temperatura do ar e a umidade relativa variam pouco durante o ano. A temperatura média está entre 27°C e 28,6°C e a umidade relativa ficou entre 70% e 80%, com amplitude térmica variando de 7°C a 9°C. Os estudos com o sistema passivo de resfriamento indicaram uma redução de 2,6°C na temperatura média da moradia em relação ao caso base, sem o sistema de resfriamento passivo. Desta forma, os estudos mostraram excelentes resultados para a região de clima quente e úmido (GONZÁLEZ *et al.*, 2000).



Figura 6 – Cobertura da Vivienda VBP-1 produzida por González
Fonte: (GONZÁLEZ-GARCIA, 2010).

Em 2010, González e González García realizam diversos experimentos também na cidade de Maracaibo, agora utilizando células-teste (Figura 7), sendo uma chamada de módulo de controle (MC) e a outra de módulo experimental (ME), que simula diversas

situações como: teto-reservatório sombreado e ventilado, teto-reservatório tampado, com resfriamento noturno por radiação ou não. As células possuem dimensões de 80,0x80,0x47,0(cm) com madeira compensada de 15mm de espessura, pintadas com tinta epóxi branca. Ambas as caixas foram forradas com poliestireno expandido com 4,5cm de espessura. Enquanto a célula experimental recebe a variação na cobertura, com a bacia metálica sombreada ou não, o caso base recebe um tamponamento também em polietileno expandido. Neste experimento foram analisados, além das variações de temperatura, seu potencial de resfriamento e o conforto térmico que o sistema pode gerar (GONZÁLEZ-GARCIA, 2010).



Figura 7– Células-teste utilizadas em Maracaibo
Fonte: (GONZÁLEZ-GARCIA, 2010).

No experimento com resfriamento evaporativo (Figura 8), é acrescentada dentro da bacia metálica, uma camada de 6,5cm de água, recebendo esta uma placa de sombreamento, também de madeira compensada com poliestireno na parte inferior. A placa fica afastada 6,0cm da bacia, promovendo assim a ventilação e proteção à radiação solar necessária ao sistema. O experimento foi realizado durante seis dias e apresentou resultados significativos: a temperatura média no módulo experimental foi 4,1°C inferior ao módulo controle e a temperatura máxima ficou 8,8°C abaixo da temperatura máxima no caso base, mostrando um resultado bastante significativo.

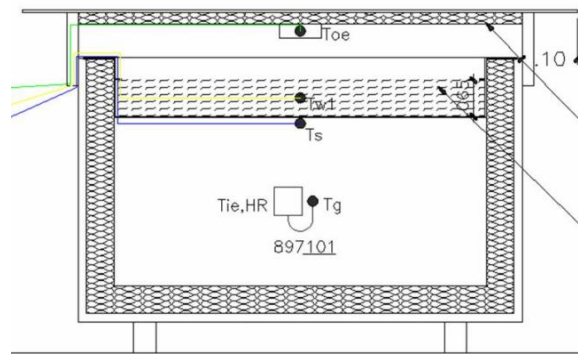


Figura 8– Células-teste com resfriamento evaporativo utilizada em Maracaibo
Fonte: (GONZÁLEZ-GARCIA, 2010)

Também foi realizada uma variação do módulo experimental para avaliar o efeito da massa térmica (Figura 9). Neste caso, a bacia metálica com água foi fechada com uma chapa metálica e vedada com silicone. Em seguida, o módulo experimental com a massa de água isolada recebeu um tamponamento tal qual ao módulo de controle. Esta configuração foi monitorada por quatro dias. O aumento da massa térmica resultou numa grande redução da amplitude térmica, a amplitude média foi de 3,1°C enquanto no módulo de controle foi de 10,4°C. Uma redução de aproximadamente 70%. A temperatura média no módulo experimental foi praticamente a mesma do módulo de controle, entretanto, devido à redução da amplitude, a temperatura máxima no experimento ficou 4,8°C abaixo do caso base, resultando também em uma melhora significativa do conforto térmico.

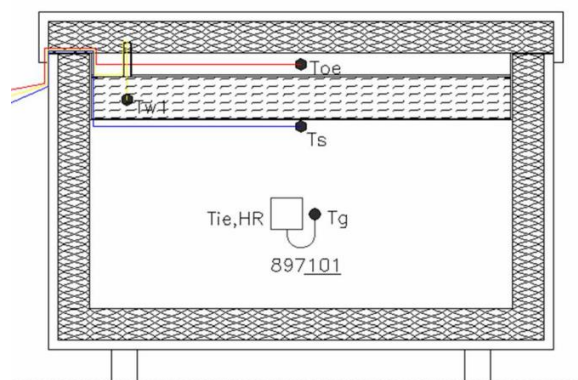


Figura 9– Células-teste com aumento da massa térmica utilizada em Maracaibo
Fonte: (GONZÁLEZ-GARCIA, 2010).

Outra configuração analisada por González e González Garcia foi a bacia metálica com massa isolada, recebendo agora, em sua superfície, mais uma camada de água de 3,5cm, sendo aplicado também o mesmo sistema de sombreamento e ventilação do sistema de resfriamento evaporativo (Figura 10). Este caso foi o objetivo central do estudo das variações,

onde se buscava combinar o efeito da massa térmica com a melhora na troca térmica devido ao efeito do resfriamento evaporativo da lâmina de água superior. Este estudo foi monitorado em três séries de sete dias, e os resultados mostraram uma redução média de $3,3^{\circ}\text{C}$ em relação ao módulo de controle e redução da temperatura máxima de $8,2^{\circ}\text{C}$.

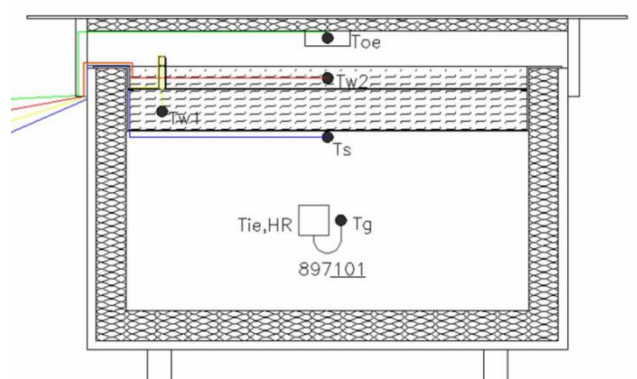


Figura 10– Células-teste com sistema evaporativo e aumento da massa térmica utilizada em Maracaibo
 Fonte: (GONZÁLEZ-GARCIA, 2010).

Recentemente, González e outros pesquisadores reproduziram o experimento realizado em Maracaíbo na cidade brasileira de Florianópolis, localizada na região sul do Brasil, com latitude de $27^{\circ}67'S$, longitude $48^{\circ}34'W$, altitude média de 40m, de clima temperado subtropical e verão quente (Cfa), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. Os autores simularam diversas situações e apresentaram resultados animadores para o agora chamado SRP (Sistema de Resfriamento Passivo) (GONZALEZ *et al.*, 2014). Com a célula-teste configurada para o sistema evaporativo, a redução na temperatura média, em relação ao caso base, foi de $2,3^{\circ}\text{C}$. A redução máxima de temperatura absoluta no experimento foi de $10,4^{\circ}\text{C}$ em relação ao ar externo. Entretanto, o experimento que gerou melhores resultados, se considerada as temperaturas médias do período, foi o sistema com a bacia vedada e uma camada adicional de água sujeita a evaporação. Esta configuração gerou reduções de $3,2^{\circ}\text{C}$ da temperatura média no experimento em relação ao caso base, e de $7,7^{\circ}\text{C}$ da temperatura máxima em relação ao ar externo.

Spanaki e outros pesquisadores, realizaram em 2014, na ilha de Creta, na Grécia, com latitude de $35^{\circ}20'N$, longitude $25^{\circ}11'E$, altitude média de 39m, de clima subtropical e verão quente e seco (Csa), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, estudos em escala real com um teto-reservatório ventilado sujeito à evaporação passiva, mas sombreado com uma chapa de alumínio. Os estudos foram conduzidos por 35 dias no período do verão.

Os resultados mostraram que a temperatura máxima da água no reservatório ficou entre 8°C e 13°C abaixo da temperatura do ar. Através de simulação, a partir dos dados coletados, os autores concluíram que a temperatura máxima interna de uma edificação com o sistema seria reduzida em 30% se comparado à uma edificação sem o sistema aplicado. Também sugerem que o resfriamento ocorre principalmente devido à evaporação da água (SPANAKI *et al.*, 2014).

Recentemente, Sharifi e Yagamata (2015) publicam uma revisão dos principais estudos utilizando tetos-reservatório como sistemas passivos de resfriamento e aquecimento. Foram analisados mais de 80 estudos. A Figura 11 mostra a localização destes estudos geograficamente distribuídos pelo mundo.

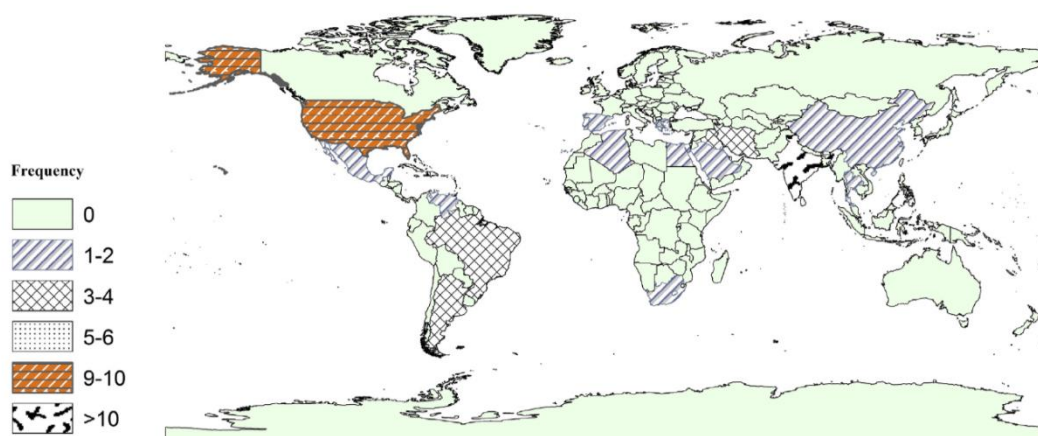


Figura 11– Distribuição geográfica de estudos com tetos reservatório
Fonte: (SHARIFI; YAGAMATA, 2015)

Nos estudos, os autores encontraram 19 variações de tetos-reservatório, que foram divididas em 7 categorias. A categoria mais estudada, até então, foi a de tetos-reservatório sombreados durante o dia e abertos à noite (30%), seguida de tetos-reservatório abertos, sem cobertura (26%) e de tetos-reservatório com sombreamento fixo (15%), estes últimos chamados de tetos-reservatório ventilados. O estudo aponta que alguns dos sistemas passivos podem gerar conforto térmico durante todo o ano. Dentre as 19 variações analisadas, 4 apresentaram maior eficiência, entre elas o teto-reservatório ventilado (objeto deste estudo), sendo que este último foi eficiente em proporcionar aumento no conforto térmico, devido à redução da temperatura interna e da oscilação da amplitude térmica, tanto para climas áridos quanto climas úmidos (SHARIFI, YAGAMATA, 2015).

2.2 ESTUDOS AUXILIADOS POR CÉLULAS-TESTE AO AR LIVRE

É difícil precisar o momento do surgimento dos estudos auxiliados por células-teste. Butti e Perlin (1981) relatam que em 1938 o professor de engenharia química Hoyt Hottel, do Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.), chefio a construção uma pequena edificação para experimentos sobre aquecimento solar. Tais experimentos foram interrompidos pela 2ª Guerra Mundial. Em 1947 os experimentos foram retomados. Dentre os estudos cita-se a construção de um módulo para testar coletores solares verticais, os *water-walls* (Figura 12). Tratava-se de uma edificação longa e estreita, com a face principal orientada para o sul e dividida em sete compartimentos. Cada compartimento possuía um sistema de aquecimento solar diferente.

Balcomb (1987), em relatório sobre o período de 1976 até 1986, informa que um grande número de células-teste foi construído em diversas instituições dos Estados Unidos para suportar experimentos sobre arquitetura passiva. Para Littler (1993), o programa de pesquisa utilizando células-teste mais influente dos EUA, em se tratando de arquitetura solar passiva, foi o desenvolvido no Los Alamos Laboratories (LASL) no período entre 1958 e 1985. Um grande número de células-teste foi construído (Figura 13). O objetivo principal era obter diretrizes construtivas para os diferentes climas americanos.

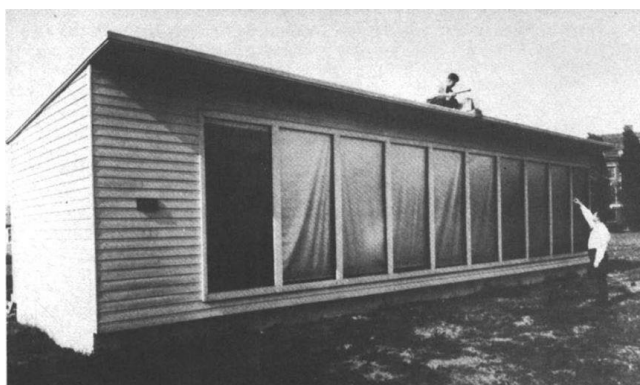


Figura 12 – Célula-teste com coletores solares testados pelo M.I.T.

Fonte: (BUTTI; PERLIN, 1981)



Figura 13 – Células teste no Laboratório de Los Alamos

Fonte: (LITTLER, 1993)

Em 1993, buscando chamar atenção para as possibilidades oferecidas pelas células teste ao ar livre para a pesquisa para o desenvolvimento de edificações eficientes, a revista

Building and Environment, lançou uma edição especial denominada “thermal experiments in simple buildings” (HITCHIN, 1993). Em favor das células teste, argumentava-se que o estudo cuidadoso de construções simples pode propiciar uma melhor compreensão de fenômenos físicos de edificações mais complexas.

Em 2008, nova edição especial sobre o tema foi lançada (STRACHAN; BAKER, 2008). O objetivo era atualizar os leitores sobre os avanços ocorridos em se tratando de pesquisas utilizando células teste ao ar livre. Os artigos focaram especialmente em cuidados e formas para monitoramento e na aplicação dos dados para aprimoramento de softwares para simulação do comportamento térmico de edificações. Também apresentam exemplos de células teste utilizadas em diversas pesquisas e locais. Percebe-se evolução em relação às utilizadas anteriormente, especialmente em se tratando das construídas especificamente para testar materiais e componentes (Figura 14 e Figura 15).



Figura 14 – Célula-teste utilizada em estudos na Espanha.

Fonte: (JIMÉNEZ; MADSEN, 2008)



Figura 15 – Célula-teste utilizada em pesquisas na Finlândia.

Fonte: (STRACHAN; VANDAELE, 2008)

No Brasil, estudos auxiliados por células-teste em pesquisas são relativamente recentes e o número de estudos é restrito. Porém, observa-se crescimento. Aparentemente, um dos primeiros estudos brasileiros utilizando células-teste e com ampla divulgação foi realizado no Canteiro Experimental da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC-USP) em 2001. O estudo estava inserido no Canteiro Experimental do Sub-Programa XIV.5–ConTechos, *Programa Ibero-americano de Ciência y Tecnologia para El Desarrollo– CYTED*. Utilizou cinco células teste com distintos sistemas de cobertura destinados ao estudo de patologias térmicas, avaliação pós-ocupação e comportamento térmico comparativo (VECCHIA; SILVA; FERREIRA, 2002).

Em 2002, em Curitiba (KRÜGER, 2003), utilizou-se um protótipo habitacional de aproximadamente 15 m² de área interna para avaliar o desempenho térmico de vedações executadas com blocos de concreto para vedação, executados em concreto leve, com EPS e

utilizando garrafas plásticas inteiras tampadas no seu interior, chamado de ISOPET. No ano seguinte, outra célula-teste, desta vez com 25 m², foi construída e avaliada quanto ao desempenho térmico (KANNING *et al.*, 2004). Embora a segunda célula-teste tenha sido maior, foi objetivamente executada para testes e não apresentava as dimensões de uma moradia.

Em 2004, a partir de dados coletados em 2003, publica-se trabalho relatando os benefícios do uso de células teste (especialmente o baixo custo) e buscando incentivar o desenvolvimento de pesquisas no Brasil com esta ferramenta (KRÜGER *et al.*, 2004). O trabalho avaliou o desempenho térmico de diferentes materiais de vedação (blocos de concreto tradicional, blocos de concreto celular e da alvenaria convencional) empregados na construção civil de forma comparativa. Cada célula-teste (Figura 16) possuía um volume de ar interno de 1,0 m³ e, além da avaliação do desempenho térmico para a cidade de Curitiba, apresentou-se a descrição de cada protótipo, seguida de seu orçamento. A qualidade dos dados desse experimento, aparentemente simples, foram aproveitados em outras pesquisas (KRÜGER, RORIZ, 2004; FERNANDES, 2005) e, ainda hoje, a partir de diferentes abordagens, podem propiciar estudos (FERNANDES *et al.*, 2015).



Figura 16 – Células-teste de diferentes materiais.
Fonte: (KRÜGER *et al.*, 2004)

Outro trabalho desenvolvido na mesma época, na cidade de Campinas, São Paulo, utilizou seis células-teste (Figura 17) para comparar o desempenho térmico de brises transparentes. No estudo realizou-se avaliação comparativa das temperaturas internas e superficiais dos brises e do vidro das janelas. Além da avaliação do desempenho térmico, foi também iniciada uma avaliação do desempenho luminoso dos brises no interior das células-teste (MIANA, 2005). O mesmo conjunto de células-teste serviu a várias outras pesquisas posteriores, constituindo um marco importante.



Figura 17 – Conjunto de células-teste – UNICAMP – 2003.
Fonte: (MIANA, 2005)

A partir dos trabalhos realizados na primeira metade da década de 2000, as pesquisas com células-teste focadas em tecnologias para edificações passivas tornaram-se mais comuns. São exemplos:

- avaliação do desempenho térmico de vidros (CASTRO, SILVA, 2006; CASTRO, SILVA *et al.*, 2007; MICHELATO, 2007; CASTRO, SILVA *et al.*, 2010) e películas poliméricas (CASTRO, SILVA *et al.*, 2008);
- avaliação do desempenho térmico de vedações e calibração de modelos computacionais (KOMENO, SPOSTO e KRÜGER, 2006; SPOSTO, KOMENO e KRÜGER, 2007; MONTEIRO, 2013);
- avaliação do desempenho térmico de paredes verdes (MORELLI, 2009);
- avaliação do desempenho de coberturas convencionais e com isolantes (KRÜGER, SUETAKE e ADRIAZOLA, 2006; PERALTA, 2006), de materiais reciclados (JARDIM, 2010), de coberturas verdes (ANDRADE, RORIZ, 2008; *IBIAPINA et al.*, 2010; CARDOSO, VECCHIA, 2014; SEIXAS, 2015) e de materiais inovadores (CARDOSO, VECCHIA e NETO, 2011), (LOPES, LABAKI, 2012);
- avaliação do uso de painéis de madeira (ADRIAZOLA, 2008);
- avaliação do desempenho de sistemas passivos de resfriamento (TEIXEIRA, LABAKI, 2006; GONZALEZ *et al.*, 2014; FERNANDES, LANGE *et al.*, 2015);
- medição do fator solar de sistemas de aberturas (GUTIERREZ, LABAKI, 2007);
- desenvolvimento de modelos para estimativa de temperaturas internas (FERNANDES *et al.*, 2015).

Observando-se os trabalhos identificados, percebe-se que os estudos brasileiros com células-teste vêm sendo enriquecidos. As pesquisas contam com mais equipamentos e os monitoramentos tornaram-se mais detalhados. Por outro lado, observa-se também que boa

parte das pesquisas utilizando células-teste publicadas a partir de 2007 faz referência a alguns dos estudos anteriores utilizando esta alternativa. Ou seja, as experiências anteriores embasam as novas, possibilitando o aprimoramento metodológico.



Figura 18 – Célula-teste com diversos sensores internos de temperaturas.

Fonte: (SEIXAS, 2015)

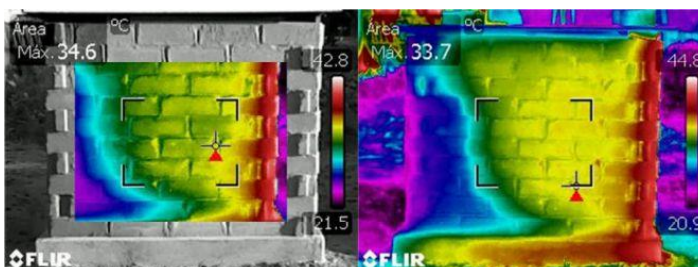


Figura 19 – Registro de temperaturas superficiais a partir de imagens termográficas.

Fonte: (MONTEIRO, 2013)

Embora sejam observados diversos avanços, ainda não são comuns no país células-teste sofisticadas como as mostradas na Figura 14 e na Figura 15.

A pesquisa na área do ambiente construído busca alternativas tecnológicas que sejam eficientes no atendimento às necessidades dos usuários e ao mesmo tempo sejam econômicas e apresentem baixo impacto ambiental. Dentre as vias para essa investigação está a utilização de células-teste para ensaios ao ar livre também chamadas “módulos para teste ao ar livre”. São edificações ou câmaras de pequeno porte construídas unicamente para uso experimental que apresentam certas características de edifícios reais (HITCHIN, 1993). Tais características dependem da finalidade do ensaio, podem ser as espessuras dos fechamentos, os materiais empregados, as propriedades termofísicas dos componentes, o volume de ar interno do ambiente, o tamanho e tipo das aberturas, o tipo de piso, o tipo de cobertura, dentre outras.

As células-teste são uma alternativa diante das dificuldades para testes em edifícios reais em uso e diante dos custos para construção de edifícios especificamente para testes. Permitem experimentos controlados, monitoramento de diversas variáveis e alteração sobre as propriedades de seus elementos constituintes. Em edificações para outros fins pode haver discrepância entre o projetado e o executado, além de, em muitos casos, não haver a possibilidade de alterações (STRACHAN; BAKER, 2008).

Em comparação com as células-teste utilizadas no interior de laboratórios, onde os experimentos tendem a ocorrer em regime estacionário, as células-teste ao ar livre levam em conta condições de contorno dinâmicas, possíveis somente no ambiente externo. Para Strachan e Baker (2008), as células-teste podem preencher a lacuna entre os testes laboratoriais estacionários e os testes de construção em grande escala.

Segundo Hitchin (1993), as células-teste têm sido construídas principalmente para testar programas de simulação térmica e para caracterizar o comportamento térmico de componentes de construção. Também aponta para o surgimento de uma terceira finalidade, compreender processos físicos específicos, como a absorção de energia solar por componentes. Também são exemplos dessa terceira finalidade os estudos para compreensão das relações entre esses processos físicos e o desempenho térmico das edificações: caso dos estudos com células-teste sobre resfriamento evaporativo (GONZALEZ; GONZALEZ-GARCIA, 2013), e de estudos sobre os efeitos da massa térmica sobre as temperaturas internas do ar (OGOLI, 2003).

3 METODOLOGIA

O presente estudo é de natureza experimental. Os procedimentos utilizados no experimento baseiam-se em trabalhos já realizados na temática: uso de células-teste e resfriamento evaporativo indireto (KRÜGER *et al.*, 2004; KRÜGER e RORIZ, 2004; GONZÁLEZ-GARCIA, 2010; GONZALEZ *et al.*, 2014), e adoção de equação preditiva para a comparação simultânea de duas configurações estudadas (KRÜGER e RORIZ, 2004; PAPST, 2004; FERNANDES, 2005; LIMA, 2009; MONTEIRO, 2013). Primeiramente foi escolhido o local para realização do estudo, sendo considerada, principalmente, a questão do sombreamento equânime dos protótipos e a facilidade logística para acompanhamento do experimento. Foram confeccionadas duas células-teste, sendo uma experimental e outra de controle. A célula experimental recebeu três configurações, a primeira focando especificamente no efeito do resfriamento evaporativo, a segunda estudou o efeito do aumento da massa térmica, enquanto a terceira buscou combinar ambas as estratégias de resfriamento evaporativo e massa térmica. Os protótipos foram confeccionados e montados conforme a configuração estudada e os sensores posicionados. Passado o período de cada experimento, os dados foram coletados e analisados.

3.1 CONFECÇÃO DAS CÉLULAS-TESTE

Foram confeccionadas duas células-teste: uma chamada de Módulo de Controle (MC) e outra de Módulo Experimental (ME), com dimensões idênticas. Utilizou-se compensado naval com 15 mm de espessura. Para resistir melhor às intempéries ambos os módulos receberam, como base, uma camada de verniz marítimo. Posteriormente foram pintados na cor branca com tinta acrílica premium esmaltada (neste caso foi utilizado o branco padrão da marca Coral). 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.

Buscou-se replicar os módulos conforme os confeccionados por González et al. (2014) em seus Experimentos 1 e 4 (Exp-1, Exp-4); no entanto, devido a dificuldades durante a execução, e, visando maior durabilidade dos módulos, ocorreram algumas pequenas diferenças: ao invés de madeira compensada simples, utilizou-se compensado naval que garante maior durabilidade e resistência quando exposto à chuva e ao sol; ao invés de sombrear 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 González et al. (2014) apresentam $U = 0,717 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ enquanto os módulos deste experimento apresentam $U = 0,707 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ calculado conforme procedimento descrito na NBR-15220 “Desempenho Térmico de Edificações - Parte 2” da ABNT (2004). A bacia foi confeccionada com chapa de aço galvanizado de espessura 1,2 mm, que 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 (resultando em um volume total de 29,18 litros). Em planta, as caixas dos módulos possuem dimensões de 0,8x0,8m, enquanto a tampa de sombreamento possui dimensão de 1,0x1,0m.

Foram estudadas três configurações do teto-reservatório (TR) buscando a redução da temperatura interna do ME conforme descrito a seguir.

3.1.1 Configuração 1: Evaporação Passiva

A configuração 1 (Figura 20), com o teto-reservatório aberto e sombreado, tem o objetivo de estudar um sistema passivo de resfriamento que utiliza o REI. Através do processo de evaporação da água, o calor é retirado do interior do módulo experimental (ME) resultando em uma queda na sua temperatura interna.

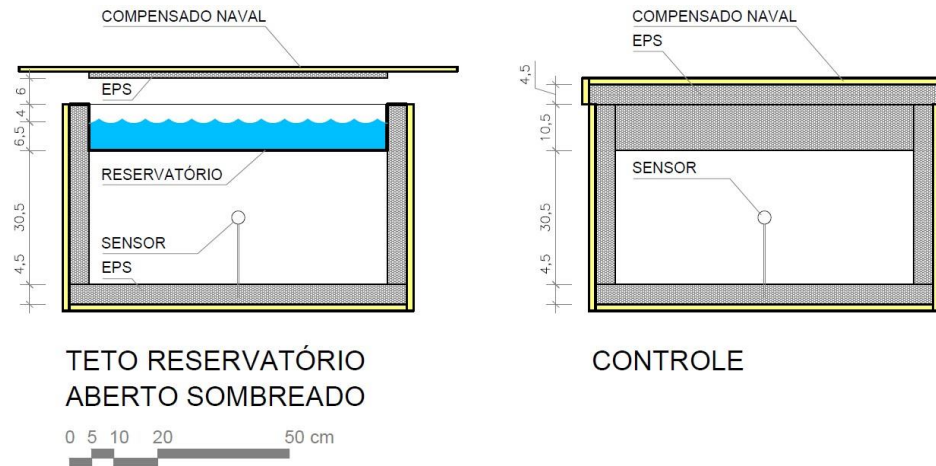


Figura 20 – Configuração 1: Módulo experimental (ME) e módulo de controle (MC)

Nesta primeira configuração, a bacia com água foi 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 10 mm de espessura. 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 proveniente da radiação solar. O volume de ar interno em ambas as caixas é o mesmo, $0,14 \text{ m}^3$.

3.1.2 Configuração 2: Massa Térmica

A segunda configuração, com o teto-reservatório vedado e isolado busca estudar o efeito do aumento da massa térmica na temperatura interna do módulo, ficando a água da bacia metálica totalmente vedada e isolada em seu interior.

Para esta configuração, TR vedado e isolado, a placa de sombreamento foi substituída por uma tampa de madeira compensada revestida com 4,5cm de EPS e a bacia de água recebeu uma chapa metálica com aplicação de silicone para vedação (Figura 21). Neste caso, ocorre um aumento da massa térmica no ME.

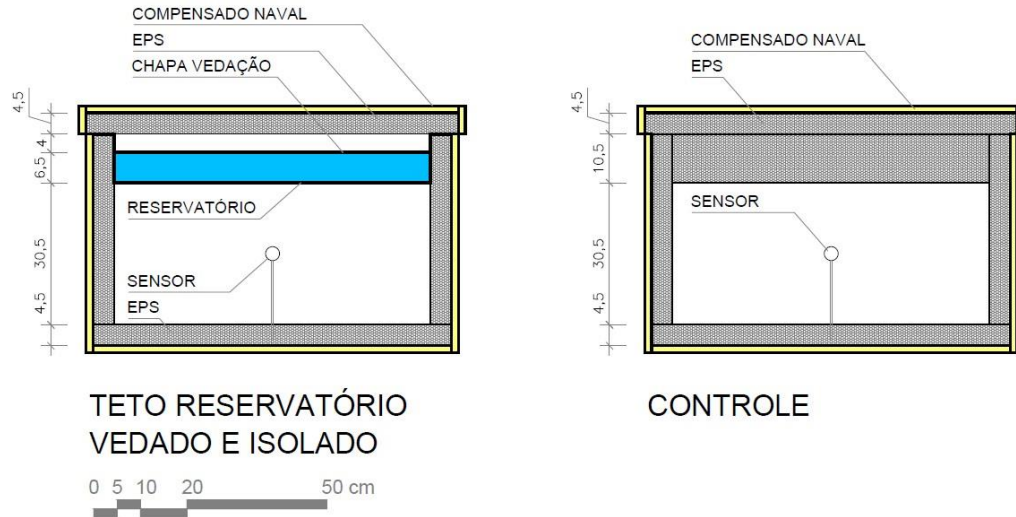


Figura 21 – Configuração 2: Módulo experimental (ME) e módulo de controle (MC)

3.1.3 Configuração 3: Evaporação Passiva e Massa Térmica

Esta configuração buscou combinar o efeito da evaporação passiva juntamente com o aumento da massa térmica deixando o teto-reservatório ventilado, mas com uma camada de água isolada e outra aberta sujeita a evaporação. Consistiu em replicar a configuração 1 acrescentando mais 4,0cm de água sobre o reservatório vedado (Figura 22).

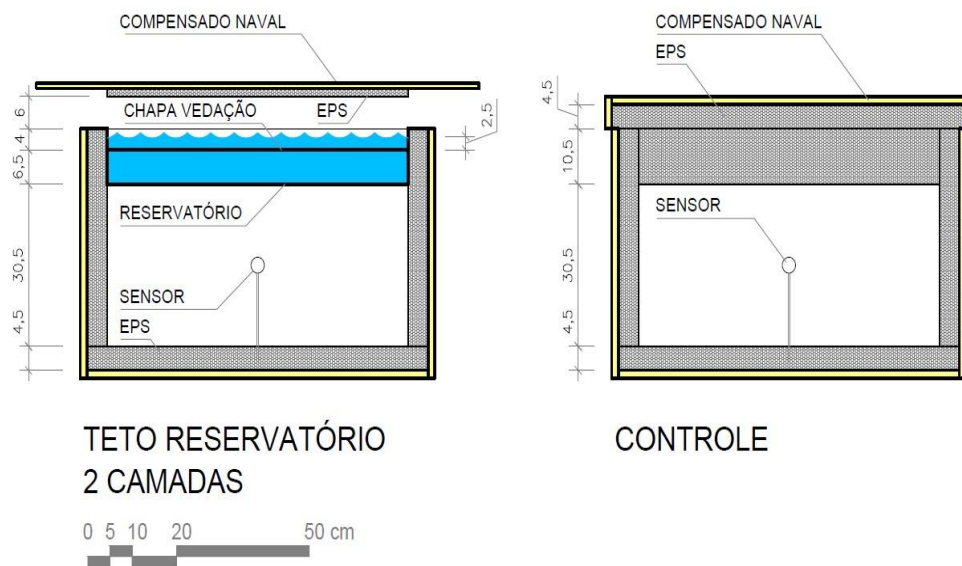
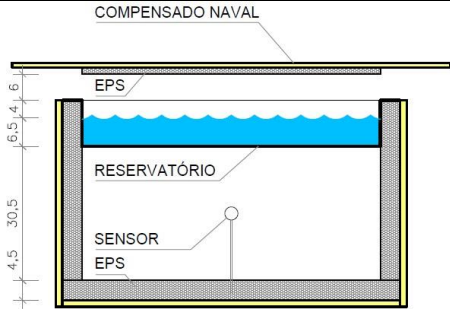
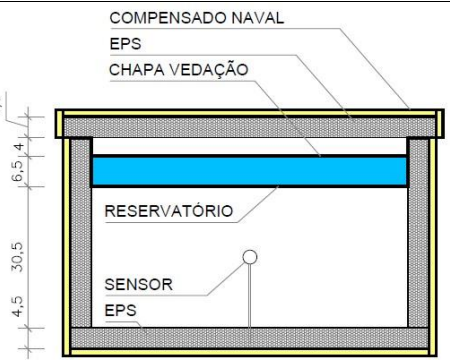
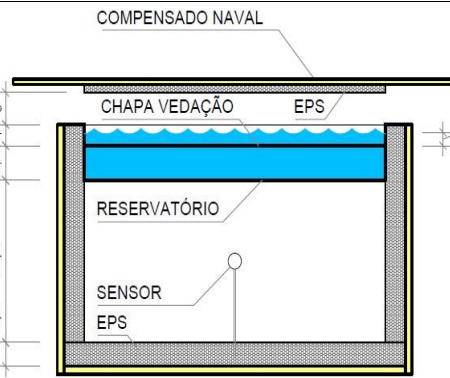


Figura 22 – Configuração 3: Módulo experimental (ME) e módulo de controle (MC)

3.2 PERÍODO DE MONITORAMENTO

Como o formato utilizado para o experimento foi o de módulo de controle e módulo experimental, promovendo variações no módulo experimental para mudar a configuração do estudo, o período de monitoramento das configurações não foi o mesmo, sendo conforme a Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Período de monitoramento para cada configuração

Módulo Experimental	Período	Condição Monitorada
 <p>COMPENSADO NAVAL EPS RESERVATÓRIO SENSOR EPS</p>	<p>de 29/10/2014 a 21/11/2014 (24 dias)</p>	<p>Configuração 1: MC x ME com resfriamento evaporativo</p>
 <p>COMPENSADO NAVAL EPS CHAPA VEDAÇÃO RESERVATÓRIO SENSOR EPS</p>	<p>de 27/12/2014 a 11/01/2015 (15 dias)</p>	<p>Configuração 2: MC x ME com massa térmica</p>
 <p>COMPENSADO NAVAL CHAPA VEDAÇÃO EPS RESERVATÓRIO SENSOR EPS</p>	<p>de 12/01/2015 a 08/02/2015 (26 dias)</p>	<p>Configuração 3: MC x ME com resfriamento evaporativo e massa térmica</p>

3.3 LOCAL DO EXPERIMENTO

O local escolhido para o experimento foi um condomínio residencial na região norte de Curitiba, no bairro de Santa Felicidade. Os protótipos foram posicionados de tal forma que pudessem receber a mesma quantidade de radiação solar ao longo do período monitorado (Figura 23 e Figura 24).

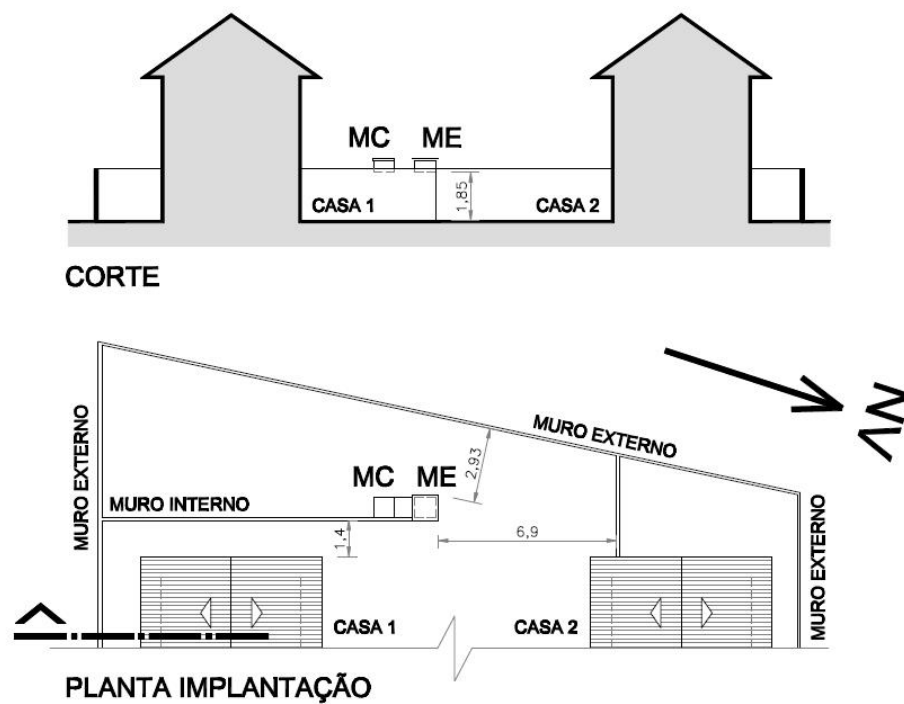


Figura 23 – Disposição dos módulos



Figura 24 – Módulos no local do experimento

A verificação da incidência de radiação foi realizada da seguinte maneira: foram gerados modelos tridimensionais das células-teste no local do estudo considerando seu entorno imediato (muros e edificações) no programa AutoCAD R12 (Autodesk) e exportados para o programa SketchUp (TotalCad) onde foram simuladas insolações para a latitude 25°27' (de Curitiba) e para os horários apresentados na Figura 25.

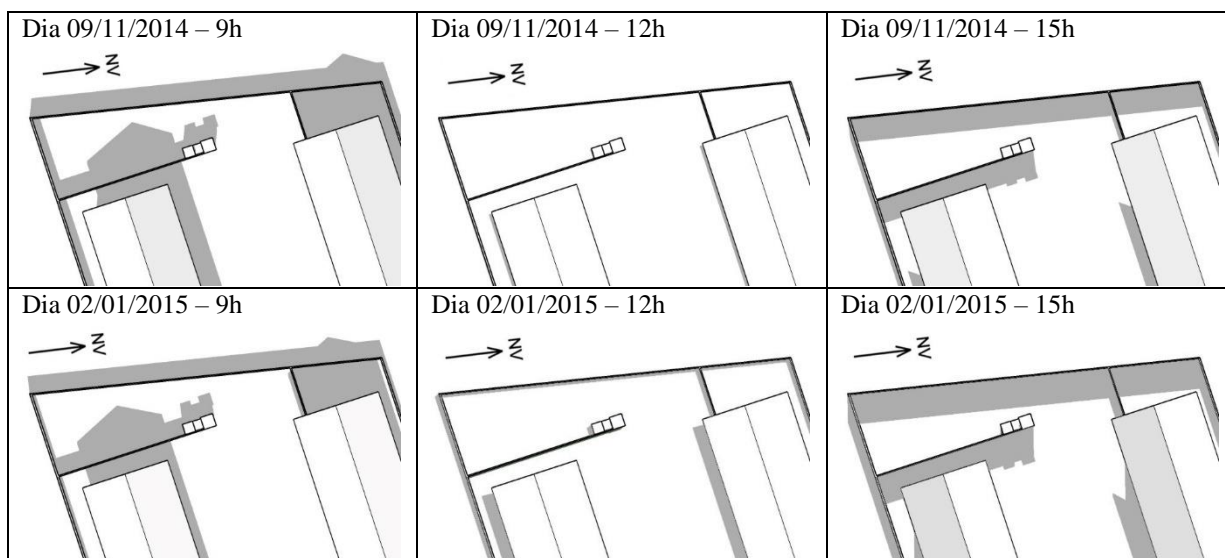


Figura 25– Incidência de sombras nos dias 09/11/2014 e 02/01/2015 às 9:00, 12:00 e 15:00 horas.

É possível observar na simulação que o sombreamento gerado pelas edificações próximas não atinge as células-teste. Desta forma, o local escolhido proporciona incidência de radiação solar de forma equânime para ambas as células.

3.4 REPOSIÇÃO DA ÁGUA

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 com temperatura ambiente. O volume de água repostado, tal qual ocorreu nos experimentos de Maracaíbo e de Florianópolis, não foi controlado. Entretanto, trata-se de uma variável importante que deve aprimorar estudos futuros.

3.5 AQUISIÇÃO DE DADOS

O monitoramento da temperatura do ar no local foi feito utilizando três data loggers idênticos da marca NOVUS, modelo TagTemp-USB. Dois usados para medir as temperaturas internas dos módulos e um para medir a temperatura externa. O sensor desse aparelho opera na faixa de temperaturas de $-20,0^{\circ}\text{C}$ a $70,0^{\circ}\text{C}$, possui tempo de resposta de 5 s e apresenta precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ a 25°C . 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 8s em ar em movimento suave (20 a 80 % UR) e apresenta precisão de $\pm 3\%$ a 25°C . (Figura 26).



Figura 26 – Data Loggers TagTemp USB e LogBox RHT LCD
Fonte: www.novus.com.br

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 um recipiente de EPS (Figura 27) e guardados em um freezer por 24 horas a -15°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 $0,1^{\circ}\text{C}$ entre os aparelhos, a qual foi considerada aceitável, não se necessitando realizar correção dos dados medidos.



Figura 27 – Verificação dos Sensores

O sensor externo de temperatura do ar foi envolvido em alumínio e suspenso junto aos módulos (Figura 28).



Figura 28 – Sensor de temperatura do ar externo

Os sensores internos de temperatura do ar foram posicionados no centro do volume de ar de cada módulo (Figura 20, Figura 21 e Figura 22), enquanto o sensor externo, por não ser à prova d'água, foi posicionado em local sombreado, ventilado, protegido de eventuais chuvas, sob uma laje de edificação próxima.

3.6 DEPRESSÃO DA TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO

Uma vez que o sistema empregado no ME, para as configurações 1 e 3, é baseado no resfriamento evaporativo, o principal fator climático definidor de seu potencial é a denominada “depressão da temperatura de bulbo úmido” (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 demonstram comumente temperaturas cerca de 2°C acima da TBU. Em sistemas indiretos, porém, tal potencial seria 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 a partir da qual foram calculados os valores de TBU_{dep} conforme o procedimento descrito em Pereira et al. (2004) mostrado abaixo (PEREIRA *et al.*, 2004):

Cálculo da pressão de vapor do ambiente (e), em kPa, pela multiplicação da pressão de saturação (es) pela umidade relativa (UR), dividida por 100:

$$e = \frac{es \cdot UR}{100} \quad \text{Equação 1}$$

Onde a pressão de saturação é dada por:

$$es = 0,611 \cdot \text{Exp} \left(17,27 \cdot \frac{T}{T + 273,3} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Assim, a Equação 1 toma a forma:

$$e = 0,611 \cdot \text{Exp} \left(17,27 \cdot \frac{T}{T + 273,3} \right) \cdot \frac{UR}{100} \quad \text{Equação 3}$$

Cálculo da temperatura de ponto de orvalho (To) em °C:

$$To = \frac{[116,9 + 237,3 \cdot \ln(e)]}{[16,78 - \ln(e)]} \quad \text{Equação 4}$$

Cálculo da temperatura de bulbo úmido (TBU) em °C:

$$TBU = \frac{(g \cdot T) + (d \cdot To)}{g + d} \quad \text{Equação 5}$$

sendo:

$$g = 0,00066.P \quad \text{Equação 6}$$

onde P é a pressão barométrica ambiente em kPa,

$$d = \frac{40988.e}{(T_o + 237,3).2} \quad \text{Equação 7}$$

3.7 COEFICIENTE DE PERFORMANCE DO SISTEMA EVAPORATIVO

O desempenho de um sistema passivo pode ser avaliado considerando seu diferencial relativamente ao caso-base (ausência do sistema passivo) e, no caso de sistemas de resfriamento evaporativo, levando-se em conta a TBU_{dep} , segundo a relação dada pela Equação 8 (KRÜGER *et al.*, 2010):

$$COP = \frac{T_{int(sem\ resfriamento)} - T_{in(com\ resfriamento)}}{TBU_{dep}} \quad \text{Equação 8}$$

Para o período monitorado, o “*coefficient of performance*” (COP) foi obtido com os dados médios diários.

Por estar referenciado na temperatura de bulbo úmido, o COP não pode ser utilizado para análise da configuração 2, que se utiliza da massa térmica através da bacia de água vedada e isolada. O resfriamento evaporativo não ocorre nessa configuração.

3.8 POTENCIAL DE RESFRIAMENTO MÉDIO (PRM)

González e González-Maciel (2013), em pesquisa anterior segundo o mesmo delineamento experimental, porém para Maracaibo, Venezuela, apresentaram 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 [...]*” (GONZÁLEZ, 1997, p. 214), Equação 9.

$$PRM = \frac{CPC \cdot T_{med(módulo\ de\ controle)} - T_{med(módulo\ experimental)}}{A} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

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

T_{med} é a temperatura média diária dos dois módulos (MC e ME, no caso) (°C);

e A é a área efetiva de superfície da cobertura (m²).

Adotando-se CPC=1,50W/°C e a superfície de cobertura A=0,462m², como fizeram Gonzalez et al. (2014) para Florianópolis e Maracaibo, o valor de CPC foi replicado neste estudo devido à similaridade dos protótipos utilizados.

3.9 TEMPERATURA DE CONFORTO ADAPTATIVO

Para as condições estudadas, a vantagem em termos de aumento dos níveis de conforto e 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 média de conforto (T_{conf}) é determinada a partir da temperatura média mensal externa, conforme a Equação 10:

$$T_{conf} = 17,8 + 0,31 \cdot T_{o_{med}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

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

Os autores também mostram uma faixa de 5°C a partir da T_{conf} , para 90% de aceitabilidade térmica, e, de 7°C, para 80% de aceitabilidade térmica (Figura 29).

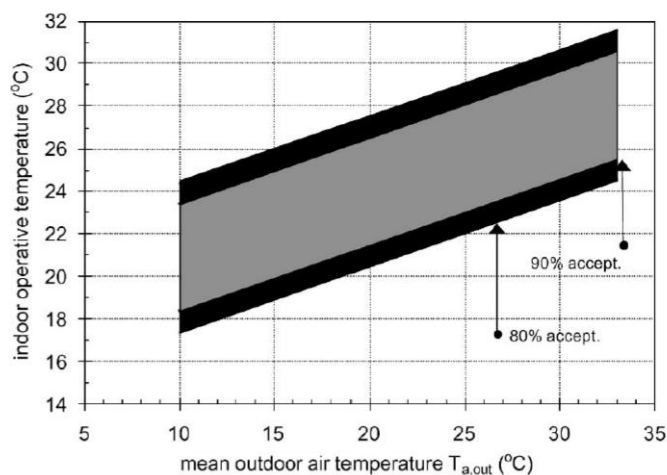


Figura 29 – Faixa de aceitabilidade térmica
 Fonte: (De DEAR; BRAGER, 2002)

Desta forma, é verificado para o período diurno o excedente de temperatura com base na temperatura de conforto utilizando 90% de aceitabilidade térmica. O somatório do excedente mostra a quantidade de graus-hora de desconforto, podendo ser comparado o desempenho do ar externo no módulo de controle (MC) e no módulo experimental (ME).

3.10 GERAÇÃO DE EQUAÇÃO PREDITIVA

Desenvolveram-se, a partir dos dados medidos, equações preditivas do comportamento térmico do módulo experimental (ME) na configuração 2, para que se pudesse comparar com a primeira série de dados o desempenho das duas configurações, relativamente ao módulo de controle (MC). A adoção de equações preditivas para estimar temperaturas internas apoia-se em outros estudos com edificações residenciais e protótipos em escala reduzida já realizados (KRÜGER e RORIZ, 2004; PAPST, 2004; FERNANDES, 2005; LIMA, 2009; MONTEIRO, 2013).

Nesta pesquisa, o desenvolvimento das equações preditivas baseou-se no procedimento sugerido por Fernandes et al. (2015). Neste procedimento, considera-se que a temperatura do ar no interior da célula-teste varia, de uma hora para a outra, conforme a diferença em relação à temperatura externa. Na busca de um equilíbrio térmico, há uma tendência da temperatura interna se aproximar da externa. Isso se dá segundo as características termofísicas do envelope, volume de ar interno, proporção das áreas das superfícies do envelope, dentre outros fatores.

Matematicamente, a temperatura interna na hora atual (hora k) é igual à soma da temperatura interna anterior (hora k-1) com a variação observada. E que essa variação se dá proporcionalmente à diferença entre as temperaturas do ar dos dois ambientes, interno e externo (Figura 30).

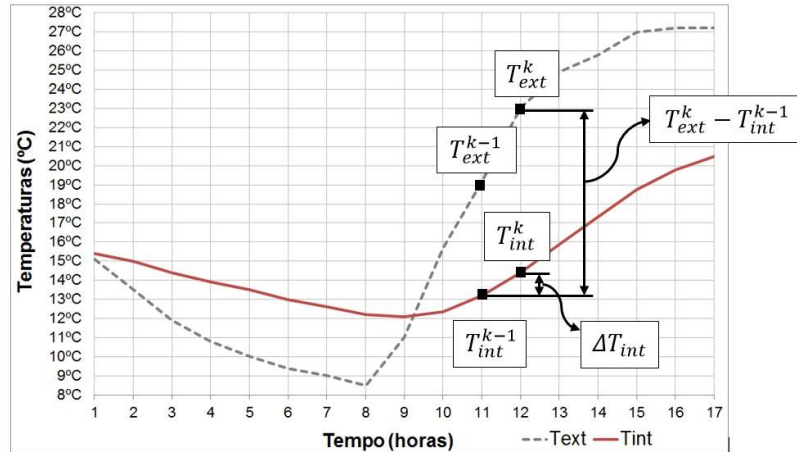


Figura 30 – Exemplo da variação da T_{int} como uma fração da diferença entre T_{ext} e T_{int} .

Expressa-se o modelo conforme a Equação 11:

$$T_{int}^k = T_{int}^{k-1} + \alpha(T_{ext}^{k-n} - T_{int}^{k-1}) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

T_{int}^k é a temperatura [°C] estimada no instante k ;

α é uma função que descreve a variação proporcional da temperatura interna em função da diferença entre T_{ext}^{k-n} e T_{int}^{k-1} .

Observa-se que na Equação 11 adotou-se T_{ext}^{k-n} porque, em cada caso/edificação, é necessário verificar qual temperatura externa utilizar (se com defasagem $n=0$ para a temperatura atual, $n=1$ para a temperatura defasada em uma unidade (hora, neste caso), e assim por diante).

Os valores da função α determinam como a edificação se relaciona com a temperatura externa, ou seja, correspondem neste modelo ao que Papst(2004) chamou de assinatura térmica. α é obtido a partir da Equação 12:

$$\alpha = \frac{\Delta T_{int}}{T_{ext}^{k-n} - T_{int}^{k-1}} \quad \text{Equação 12}$$

Observa-se que α não é constante, podendo ser representado por uma equação de primeiro ou segundo grau.

Ressalta-se que, segundo o planejamento experimental, estavam previstos testes com diversas configurações do sistema. Em função desse planejamento, adotou-se o procedimento clássico de se trabalhar com “módulo controle” versus “módulo experimental”. A utilização do método preditivo se deu em razão de os dois períodos monitorados terem apresentado diferentes condições de nebulosidade. Desta forma, os dados referenciais do módulo de controle, afetados pelas condições climáticas diferentes (e divergentes) nas duas etapas de monitoramento, tiveram de ser normalizados para uma comparação direta.

Este modelo de predição somente pode ser aplicado para a configuração 2, quando não ocorre o processo evaporativo. O método utilizado para estimativa de temperaturas internas horárias é baseado na diferença entre as temperaturas internas e externas (devido a trocas térmicas por condução), desta forma, não é adequado para estimativa de temperaturas quando outras formas de trocas térmicas, neste caso evaporação, possuem um papel importante na determinação das temperaturas internas. Neste caso, variáveis como a umidade relativa e velocidade do ar são de grande importância, mas não são contempladas por este método preditivo.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 TETO-RESERVATÓRIO ABERTO E SOMBREADO (CONFIGURAÇÃO 1)

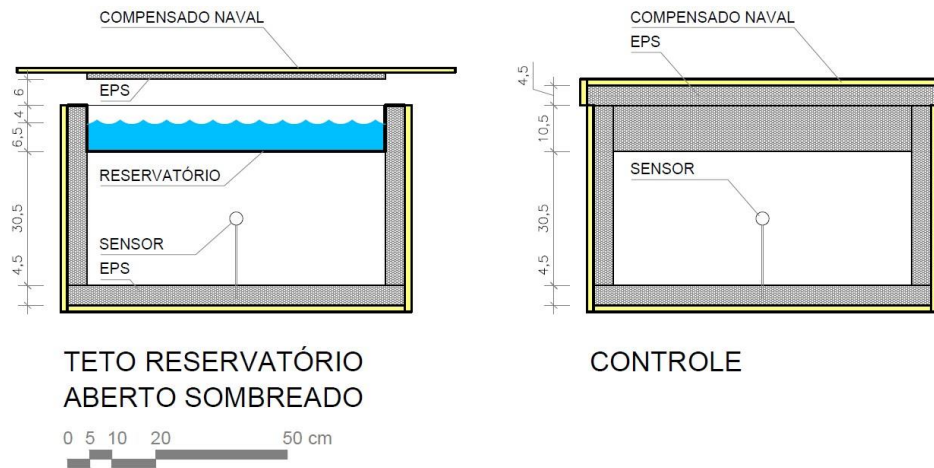


Figura 31 – Configuração 1: Módulo experimental (ME) e módulo de controle (MC)

A Figura 32 mostra os dados internos e externos de temperatura medidos nos módulos experimental (ME) e controle (MC) no período de 29/10/2014 e 21/11/2014, totalizando 24 dias de monitoramento. No período monitorado a temperatura externa (T_o) variou de $11,8^{\circ}\text{C}$ a $34,5^{\circ}\text{C}$. A umidade relativa (UR) média no período foi de 81% e a mínima registrada foi de 29%.

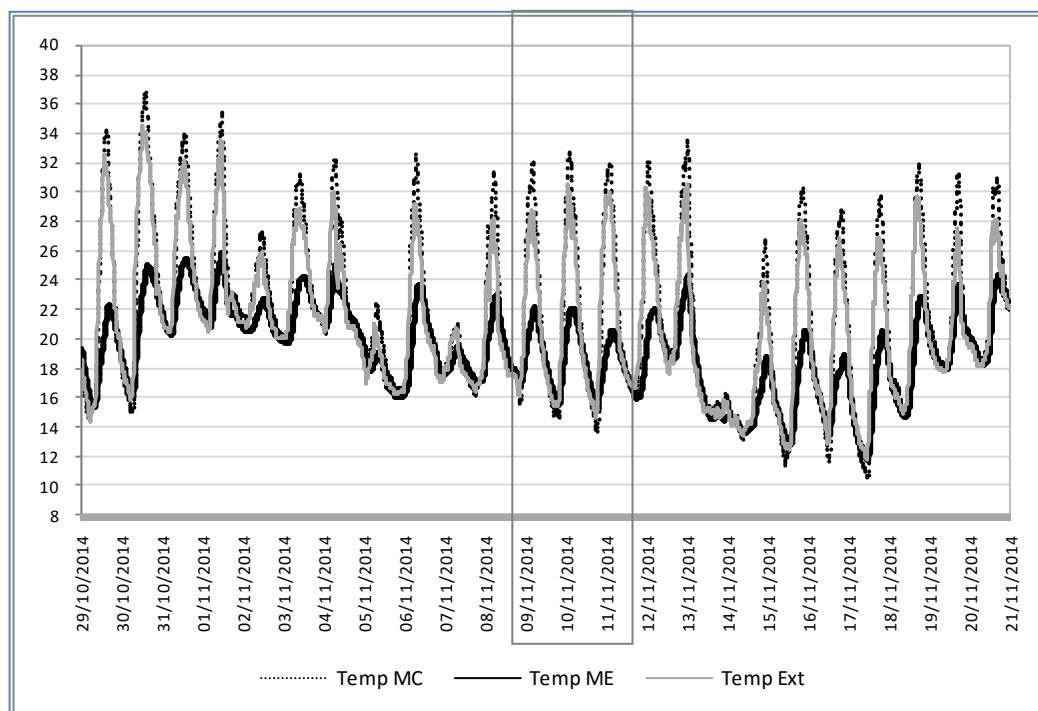


Figura 32 – Temperaturas do ar internas e externas medidas no período – configuração 1

A Figura 33 mostra os resultados para três dias do monitoramento. Estes dias apresentaram características semelhantes de céu claro, sem precipitação e sem mudanças bruscas de temperatura durante o dia.

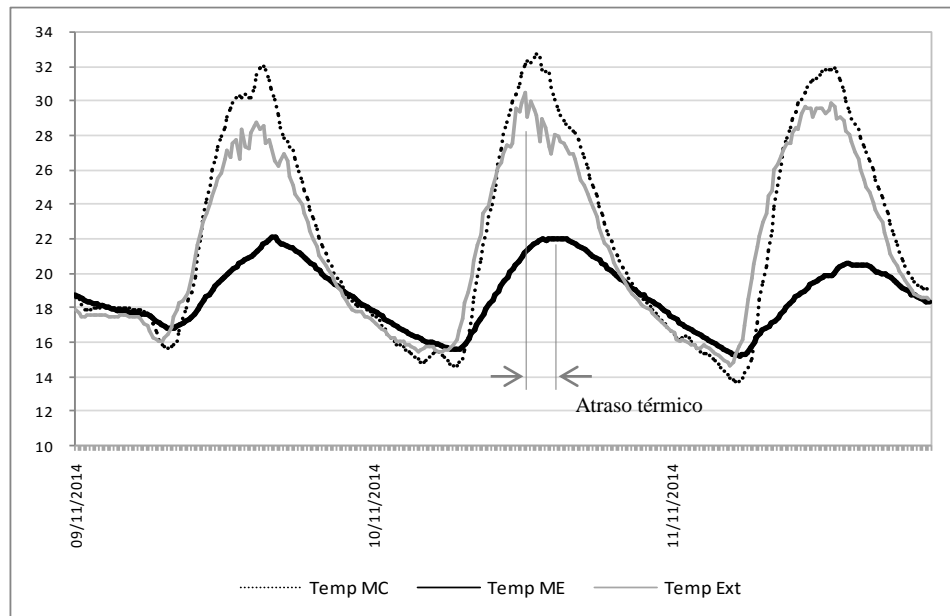


Figura 33 – Temperaturas do ar internas e externas medidas três dias de experimento – configuração 1

É possível observar que a temperatura interna no módulo de controle (T_c) acompanha o padrão das temperaturas externas, sem mostrar nem amortecimento térmico nem efeito de atraso térmico, mas apresenta um sobreaquecimento médio de cerca de 2 graus nas temperaturas externas máximas diárias. Já o módulo experimental, com o sistema passivo de resfriamento evaporativo, apresenta variação da sua temperatura interna (T_e) tanto com amortecimento e atraso térmicos, com significativa diferença para as temperaturas internas de MC e do ar externo.

A diferença térmica encontrada entre ambos os módulos mostra o benefício do sistema aplicado em ME. A amplitude térmica, em valores absolutos para o período, atingiu $22,7^{\circ}\text{C}$ no ambiente externo, $26,2^{\circ}\text{C}$ para o MC e apenas $14,1^{\circ}\text{C}$ para ME. Desta forma, enquanto MC aumentou em 15% a amplitude térmica externa, ME proporcionou uma redução de praticamente 40% nesta amplitude.

A Tabela 2 apresenta os valores médios de temperatura do período para o módulo de controle (T_c), para o módulo experimental (T_e) e para o ar externo (T_o).

Tabela 2 – Valores médios medidos de ME, MC e ar externo para o período (°C)

	To (ext)	Tc (MC)	Te (ME)
Média	21,1	21,7	19,2
Máxima	28,1	30,3	22,3
Mínima	16,4	16,2	16,6

Comparando as **temperaturas máximas** registradas, é possível verificar que $T_{e_{max}}=22,3^{\circ}\text{C}$ ficou $5,8^{\circ}\text{C}$ abaixo de $T_{o_{max}}=28,1^{\circ}\text{C}$, ou seja, uma redução de 21%, ao passo que $T_{c_{max}}=30,3^{\circ}\text{C}$ ficou $2,2^{\circ}\text{C}$ acima da $T_{o_{max}}$. A redução de $T_{e_{max}}$ em relação à $T_{c_{max}}$ foi de $8,0^{\circ}\text{C}$, ficando 26,4% abaixo.

Observando as **temperaturas médias**, no módulo experimental, $T_{e_{med}}$ ficou $1,9^{\circ}\text{C}$ abaixo da temperatura externa média $T_{o_{med}}$, enquanto o módulo de controle, $T_{c_{med}}$ ficou $0,6^{\circ}\text{C}$ acima de $T_{o_{med}}$.

Tanto em ME quanto em MC as **temperaturas mínimas** ficaram próximas da temperatura externa. No módulo experimental $T_{e_{min}}$ ficou $0,2^{\circ}\text{C}$ acima de $T_{o_{min}}$, mostrando que o sistema atua quando a temperatura externa se eleva.

Já a **amplitude térmica**, calculada agora para os valores médios do período, foi de $11,7^{\circ}\text{C}$ no ambiente externo, enquanto em ME esta amplitude foi de $5,7^{\circ}\text{C}$, uma redução média de 53%.

A Tabela 3 apresenta valores médios das diferenças encontradas entre os módulos MC e ME, e em relação à temperatura do ar **para o período diurno** (das 6:30 às 19:30, total de 13 horas). A temperatura média externa, quando observado o ciclo de 24h, foi de $T_{o_{med}}=21,1^{\circ}\text{C}$ (Tabela 1) e sobe para $T_{o_{med}^{dia}}=23,3^{\circ}\text{C}$ se considerado apenas o período diurno, desta forma, é possível observar a relevância desta análise devido à diferença significativa entre as duas médias.

Tabela 3 – Diferenças médias relativas de ME em relação à T_{ext} e entre os módulos para o período diurno (°C)

	(Te-To) dia	(Te-Tc) dia
Média	-3,6	-4,4
Máxima	-7,3	-8,7
Mínima	0,5	0,3

A Tabela 3 mostra que, no período diurno, ME reduziu sua temperatura máxima em relação ao ar externo ($T_{e_{max}}-T_{o_{max}}$) em $7,3^{\circ}\text{C}$, correspondendo a uma redução de 25%. Em

relação à MC ($T_{e_{max}} - T_{c_{max}}$), ME apresentou uma redução ainda maior, de $8,7^{\circ}\text{C}$, uma redução de 29%.

Durante o dia, a média da temperatura de ME em relação à temperatura externa ($T_{e_{med}} - T_{o_{med}}$) foi $-3,6^{\circ}\text{C}$, redução de 15% em relação à $T_{o_{med}}^{\text{dia}}$, e de $-4,4^{\circ}\text{C}$ em relação à MC. Como observado anteriormente, quando analisado a redução média em todo o período, está foi de $-1,9^{\circ}\text{C}$. Desta forma, a análise do período diurno, apresenta grande relevância, pois é neste período que o sistema é mais atuante.

Isto fica mais claro no gráfico da Figura 34, que mostra a comparação da diferença de temperatura ocorrida em ME e MC em relação à temperatura externa no último dia do experimento, dia 21/11/2014, dia de céu claro e sem precipitação. A diferença de temperatura nos módulos variou fortemente durante o ciclo de 24 horas sendo pouco nítida durante o período noturno e, extremamente acentuada, no período diurno.

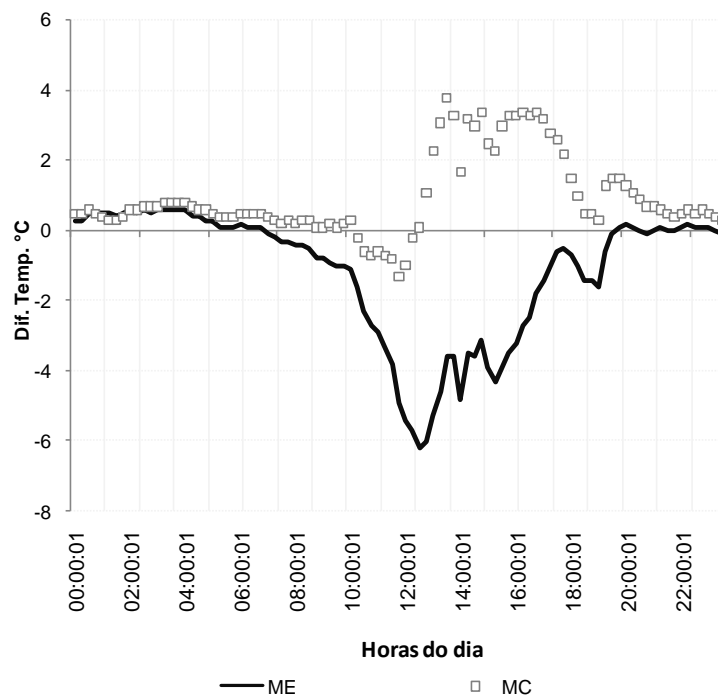


Figura 34 – Diferenças térmicas entre MC e ME em relação à temperatura externa para o último dia de medição

No gráfico, o eixo da abscissa representa a temperatura do ar externo e é possível verificar que a temperatura interna em ME apresenta um pico de redução de $6,2^{\circ}\text{C}$ às 12:30h, enquanto a temperatura interna em MC, sem o sistema passivo de resfriamento, apresentou um aumento em relação à temperatura do ar externo de aproximadamente $4,0^{\circ}\text{C}$ às 14h. Neste dia, a diferença de temperatura ocorrida em ME e MC atingiu um pico de $7,7^{\circ}\text{C}$ às 13:15h.

4.1.1 Temperatura de Bulbo Úmido e Desempenho Evaporativo

O potencial de resfriamento encontrado no módulo experimental ME com o sistema evaporativo para o período diurno, em termos absolutos, chegaria no máximo a 12,4°C, limite teórico dado pela TBU_{dep} máxima absoluta calculada no período. A redução máxima absoluta encontrada em ME, isto é, $(T_o - T_e)_{absoluta}$ foi de 12,5°C, mostrando um desempenho superior ao limite teórico para um sistema de resfriamento evaporativo.

A Tabela 4 apresenta os **valores médios** calculados para temperatura de bulbo úmido (TBU) e sua depressão (TBU_{dep}), calculados tanto para o período de 24h quanto para o período diurno.

Tabela 4 – Temperatura de bulbo úmido - médias para o período (°C)

	TBU	TBU_{dep}	TBU_{dep} (dia)
Média	18,5	2,6	3,7
Máxima	22,2	6,6	6,6
Mínima	15,4	0,6	0,7

Como se vê na Tabela 2 e Tabela 4, a temperatura interna média em ME, $T_{e_{media}}=19,2^\circ\text{C}$ se situa cerca de 0,7°C acima da $TBU_{media}=18,5^\circ\text{C}$ para o período monitorado. A média das máximas diárias, $T_{e_{max}}=22,3^\circ\text{C}$ está apenas 0,1°C acima da $TBU_{max}=22,2^\circ\text{C}$. Entretanto, os valores obtidos indicam um potencial de resfriamento máximo para o período diurno de $TBU_{dep_{max}}=6,6^\circ\text{C}$, ou seja, inferior ao resfriamento máximo observado em ME, que foi de $(T_e - T_o)_{max}=-7,3^\circ\text{C}$ (Tabela 3). Além disso, considerando o que foi observado quanto à temperatura média interna encontrada em ME estar muito próxima da TBU_{media} para o período monitorado, esse desempenho fica acima do valor sugerido por Erell. Desta forma, supõe-se que o efeito do aumento de massa térmica com a adição da lâmina d'água de 6,5cm e a placa de sombreamento tenham contribuído significativamente para o alto desempenho do sistema.

A Figura 35 mostra a correlação encontrada entre ME e a temperatura externa ($T_o - T_e$) e entre MC e a temperatura externa ($T_o - T_c$), ambas versus TBU_{dep} , para o período diurno, onde se nota que, de forma consistente, que 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.

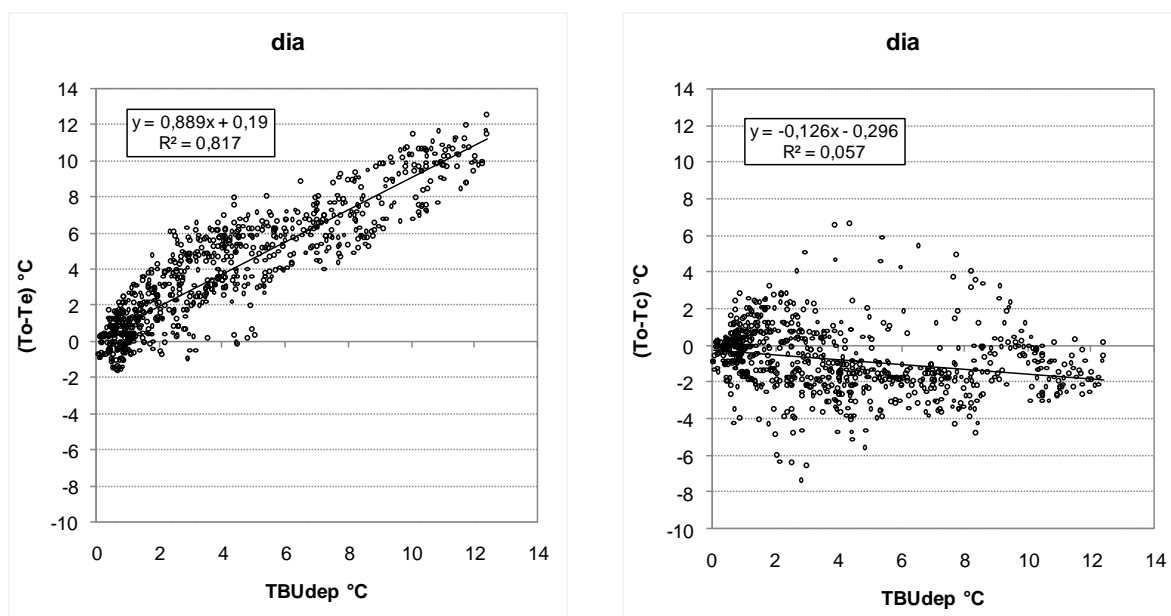


Figura 35 – Correlação encontrada entre (T_o-T_e) e TBU_{dep} (a) e entre (T_o-T_c) e TBU_{dep} (b) para o período diurno

4.1.2 Coeficiente de Performance (COP) e Potencial de Resfriamento Médio (PRM)

Para o período monitorado, o “*coefficient of performance*” (COP) foi obtido com os dados médios diários, gerando valores de COP acima de 100% (Figura 32), ou seja, um desempenho acima do que seria fisicamente possível com um sistema REI. Sendo assim, é de se supor, mais uma vez, que ME se beneficia não apenas do efeito de resfriamento evaporativo, porém também do efeito de aumento da capacidade térmica da cobertura (Figura 28 e Figura 29).

A Figura 36 também apresenta valores calculados do potencial de resfriamento médio (PRM), dia a dia. 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 $286 \text{Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$, para Florianópolis. Com alguma variação, como por exemplo, para os dias 7 e 14 de novembro, onde ocorreu uma queda brusca de temperatura e a umidade relativa permaneceu alta, o valor médio se aproxima de $200 \text{Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$, sendo que o pico verificado para o período foi de $337 \text{Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$, 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 $(T_{o_{max}}-T_{o_{min}})_{24h}$ como possível indicador da estabilidade atmosférica diária, nota-se que esse fator é fundamental para um alto desempenho do sistema.

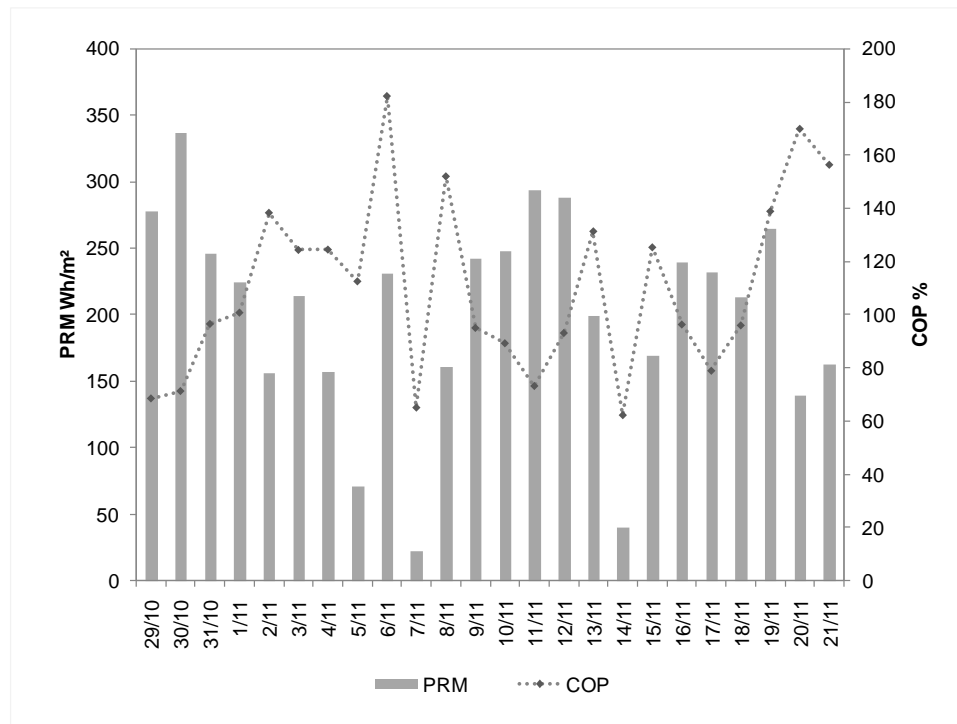


Figura 36 – Valores de COP e PRM para os 24 dias de experimento

4.1.3 Condições de conforto térmico

Adotando-se como T_{med} a temperatura média registrada no local para o período monitorado (cf. Tabela 2), obtém-se $24,3^{\circ}\text{C}$ como temperatura de conforto. Calculando-se o somatório de diferenças de temperatura acima dessa temperatura-base, obtém-se então um total de $493,2^{\circ}\text{C.h}$ para o ambiente externo, $772,7^{\circ}\text{C.h}$ para MC e apenas $10,9^{\circ}\text{C.h}$ para ME. Reduzindo o desconforto térmico em relação ao ar externo em 98%.

Se considerado 90% de aceitabilidade térmica, com a faixa de 5°C a partir de T_{comf} , quando observamos agora o excedente acima desta faixa temos um total de $198,5^{\circ}\text{C.h}$ para o ambiente externo, $408,4^{\circ}\text{C.h}$ para MC e de 0°C.h para ME. Desta forma, nesta configuração, o desconforto térmico foi nulo se considerado 90% de aceitabilidade térmica.

4.2 TETO-RESERVATÓRIO VEDADO E ISOLADO (CONFIGURAÇÃO 2)

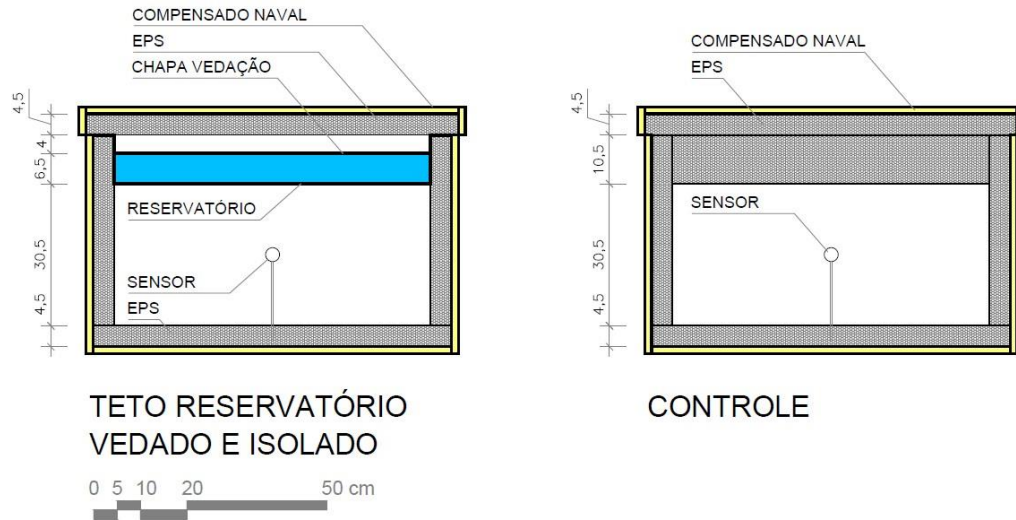


Figura 37 – Configuração 2: Módulo experimental (ME) e módulo de controle (MC)

A Figura 38 mostra os dados internos e externos de temperatura medidos nos módulos experimental (ME) e controle (MC) no período de 27/12/2014 e 11/01/2015, 15 dias de monitoramento. No período monitorado a temperatura externa variou entre 18,5°C e 33,6°C, com correspondente variação na umidade relativa. A umidade relativa mínima registrada foi de 54% e a média do período ficou em 88%.

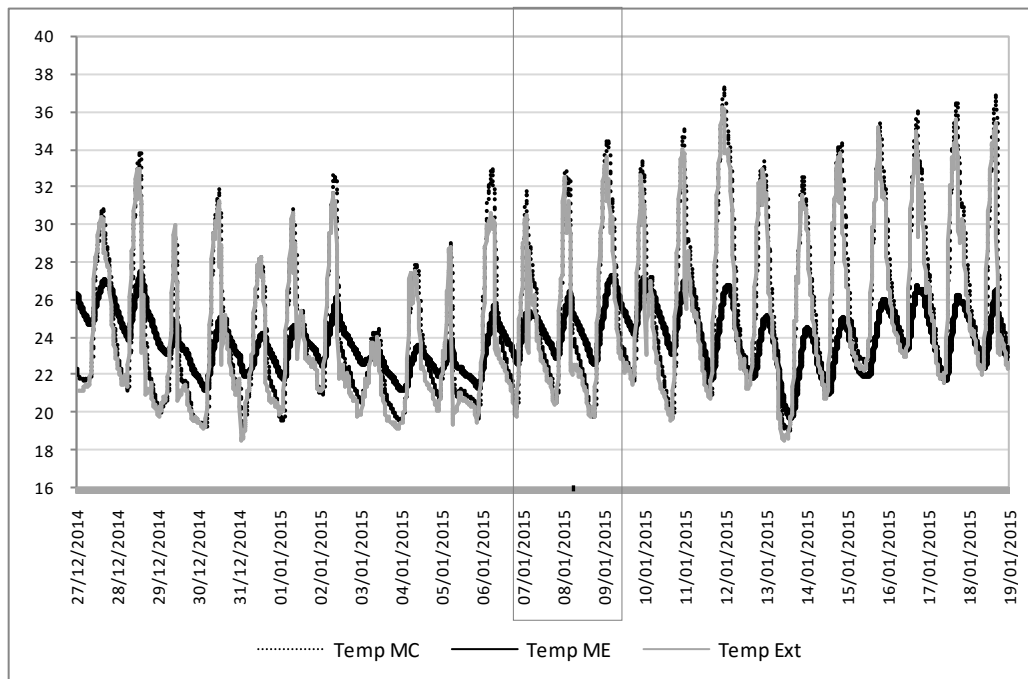


Figura 38 – Temperaturas do ar internas e externas para o período completo

A Figura 39 mostra os resultados para três dias do monitoramento. Estes dias apresentaram características típicas do mês de janeiro, céu claro na maior parte do dia e com precipitação no final da tarde.

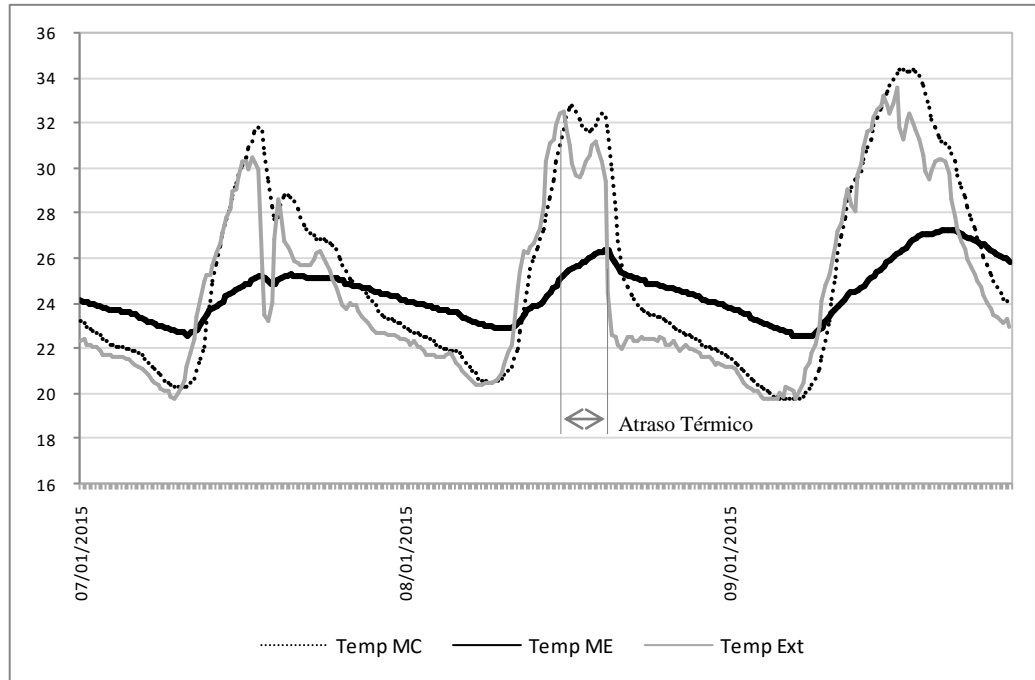


Figura 39 – Temperaturas do ar internas e externas para três dias de medição

É possível observar que o módulo de controle (MC) acompanha o padrão das temperaturas externas, sem mostrar nem amortecimento térmico nem efeito de atraso térmico, mas apresenta um sobreaquecimento médio de cerca de $0,5^{\circ}\text{C}$ nas temperaturas externas máximas diárias. O módulo experimental com TR vedado e isolado mostra ambos os efeitos: amortecimento e atraso térmico com significativa diferença para as temperaturas internas medidas no MC.

A diferença térmica encontrada entre ambos os módulos mostra o benefício do sistema em relação ao caso-base sem aplicação do mesmo. A amplitude térmica, em valores absolutos, para o período, atingiu $15,1^{\circ}\text{C}$ no ambiente externo, $15,2^{\circ}\text{C}$ para o MC e apenas $6,3^{\circ}\text{C}$ para ME. Desta forma, MC praticamente manteve a amplitude térmica externa, enquanto ME proporcionou uma redução de 58%.

A Tabela 5 apresenta os valores médios de temperatura do período para o módulo de controle (T_c), para o módulo experimental (T_e) e para o ar externo (T_o).

Tabela 5 – Valores médios medidos de ME, MC e To para o período (°C)

	To (ext)	Tc (MC)	Te (ME)
Média	23,6	24,1	23,9
Máxima	30,4	30,9	25,5
Mínima	19,9	20,3	22,5

Comparando as **temperaturas máximas** registradas, é possível verificar que $T_{e_{max}}=25,5^{\circ}\text{C}$ ficou $4,9^{\circ}\text{C}$ abaixo de $T_{o_{max}}=30,4^{\circ}\text{C}$, ou seja, uma redução de 16%, mesmo sem o efeito do resfriamento evaporativo, ao passo que $T_{c_{max}}=30,9^{\circ}\text{C}$ ficou $0,5^{\circ}\text{C}$ acima da $T_{o_{max}}$.

Tanto em ME quanto em MC as **temperaturas médias** ficaram próximas da temperatura externa. No módulo experimental $T_{e_{med}}$ ficou $0,3^{\circ}\text{C}$ acima de $T_{o_{med}}$ enquanto $T_{c_{med}}$ ficou $0,2^{\circ}\text{C}$ acima de $T_{e_{med}}$.

Observando as **temperaturas mínimas**, no módulo experimental, $T_{e_{min}}$ ficou $2,6^{\circ}\text{C}$ acima da temperatura externa mínima $T_{o_{min}}$, enquanto o módulo de controle, $T_{c_{min}}$ ficou apenas $0,4^{\circ}\text{C}$ acima de $T_{o_{min}}$, esta diferença já mostra o efeito da massa térmica isolada.

Já a **amplitude térmica**, para os valores médios do período, foi de $10,5^{\circ}\text{C}$ para o ar externo, enquanto em ME esta amplitude foi de apenas $3,0^{\circ}\text{C}$, uma redução de 71%.

A Tabela 6 apresenta valores médios das diferenças encontradas entre os módulos MC e ME, e em relação à temperatura do ar **para o período diurno** (das 6:30 às 19:30, total de 13 horas). A temperatura média externa quando observado o ciclo de 24h foi de $T_{o_{med}}=23,6^{\circ}\text{C}$ (Tabela 1) e sobe para $T_{o_{med}^{dia}}=23,8^{\circ}\text{C}$ se considerado apenas o período diurno.

Tabela 6 – Diferenças médias relativas de ME em relação à T_{ext} e entre os módulos para o período diurno (°C)

	(Te-To) dia	(Te-Tc) dia
Média	-1,2	-1,6
Máxima	-5,6	-5,8
Mínima	3,1	2,3

A Tabela 6 mostra que, no período diurno, ME reduziu sua temperatura máxima em relação ao ar externo ($T_{e_{max}}-T_{o_{max}}$) em $5,6^{\circ}\text{C}$, correspondendo a uma redução de 18%. Em relação à MC ($T_{e_{max}}-T_{c_{max}}$), ME apresentou uma redução ainda maior, de $5,8^{\circ}\text{C}$, uma redução de 19%. Durante o dia, a média da temperatura de ME em relação à temperatura externa ($T_{e_{med}}-T_{o_{med}}$) foi $-1,2^{\circ}\text{C}$, redução de 5% em relação à $T_{o_{med}^{dia}}$, e de $-1,6^{\circ}\text{C}$ em relação à MC.

A diferença de temperatura nos módulos também variou fortemente durante o ciclo de 24 horas, sendo agora também percebida no período noturno e sendo bastante acentuada no período diurno. A Figura 40 mostra a comparação da diferença de temperatura ocorrida em ME e MC em relação à temperatura externa no dia 09/01/15, dia de céu claro com precipitação no final do dia.

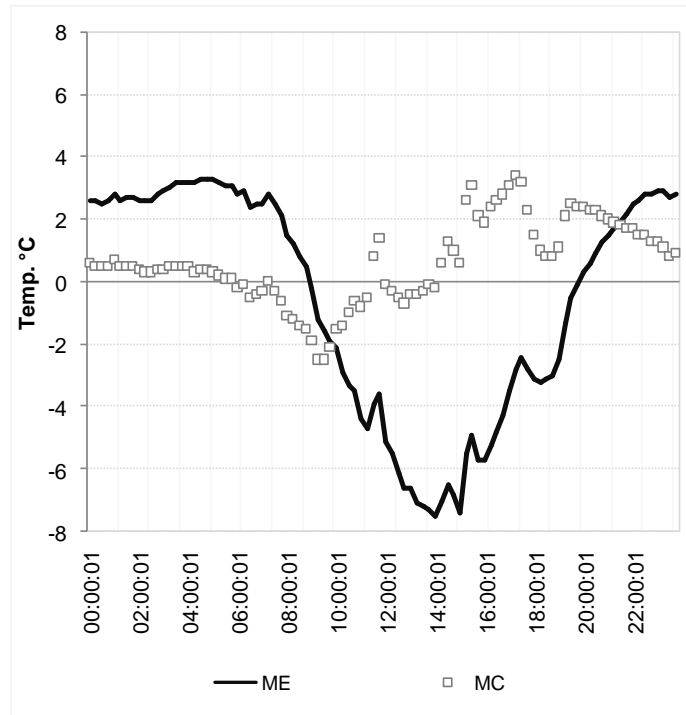


Figura 40 – Diferenças térmicas entre MC e ME em relação à temperatura externa para um dia de céu claro (em 09/01/2015)

No gráfico é possível verificar que ME apresenta um pico de redução de 7,5°C às 14h, enquanto MC, sem o sistema passivo de resfriamento, apresentou um aumento máximo em relação a temperatura do ar externo de 3,4°C às 17:15h. Neste dia, a diferença de temperatura ocorrida em ME e MC, durante o dia, atingiu um pico de 8,1°C às 15:15h. Já no período noturno, ME manteve-se com temperatura superior em relação à temperatura externa e de MC, atingindo 3,3°C às 5h em relação ao ar externo.

Como essa configuração empregada para o sistema (ME) não se baseia no resfriamento evaporativo, a “depressão da temperatura de bulbo úmido” (ou TBU_{dep}) não é considerada um indicador relevante para análise do seu desempenho.

Importante observar que a característica construtiva deste módulo faz com que a massa de água da bacia fique completamente isolada do contato com o ambiente externo, isso aumenta significativamente o atraso e o amortecimento térmicos em relação ao ar externo, o que não

ocorre no ME da configuração 1, onde a bacia com água sujeita à evaporação está em contato direto com o ambiente externo, aquecendo e resfriando também por convecção. Desta forma, parte da redução de temperatura observada no TR vedado e isolado é devida à ausência de trocas por convecção durante o dia, o que traria ganhos de calor para o reservatório d'água, tal qual ocorre em TR aberto e sombreado (configuração 1). Enquanto a inércia térmica gerada pela massa de água isolada, e por conta de seu calor específico, gerou um ganho mais lento de calor durante o dia, no período noturno, a mesma cedeu calor sensível para o ar do interior do módulo.

4.2.1 Potencial de Resfriamento Médio (PRM)

Da mesma forma que fora calculado para a configuração 1 e também para comparação com o experimento similar realizado por González em Maracaibo (GONZÁLEZ-GARCIA, 2010), o potencial de resfriamento médio (PRM) obtido para o TR vedado e isolado é apresentado na Figura 41. Uma vez que a segunda configuração não emprega trocas por evaporação, o COP, cujo cálculo baseia-se no processo evaporativo, é desconsiderado para esta análise.

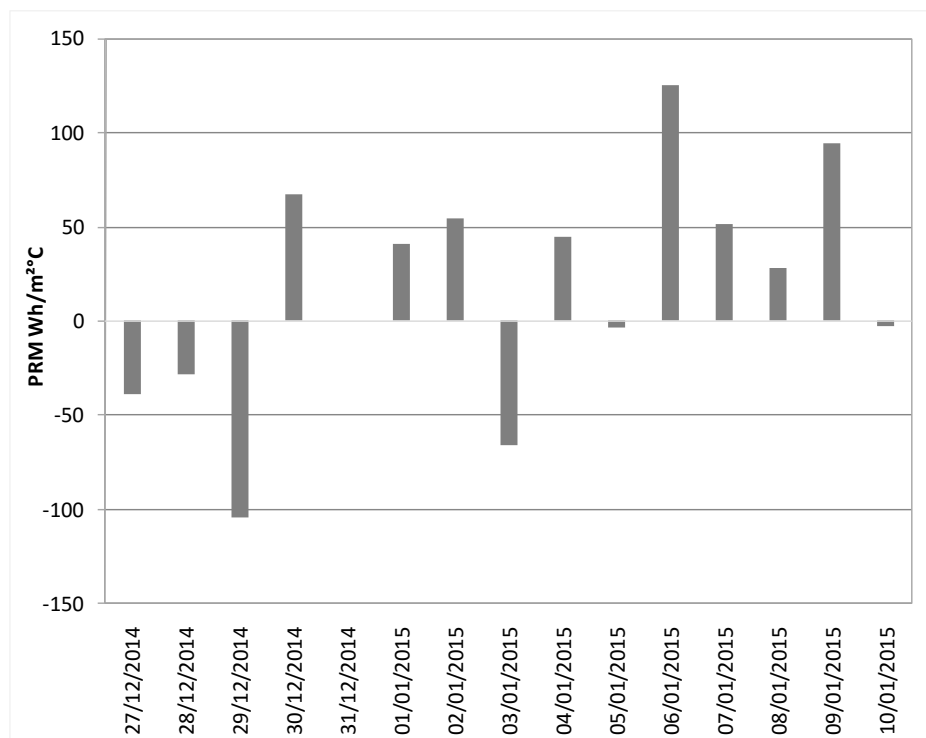


Figura 41 – Valores de PRM para os 18 dias de experimento

Conforme verificado por González-Garcia, em Maracaibo, em seu Experimento 4 (GONZÁLEZ-GARCIA, 2010), os valores de PRM são baixos e oscilam entre negativo e positivo, sendo sugerido por González que o ME apresenta comportamento térmico similar ao módulo de controle.

4.2.2 Condições de conforto térmico

Conforme calculado para a configuração 1, a temperatura de conforto (T_{conf}) é determinada a partir da temperatura média mensal externa. Adotando-se como T_{omed} a temperatura média registrada no local para o período monitorado (cf. Tabela 5), obtém-se $25,1^{\circ}\text{C}$ como temperatura de conforto. Calculando-se o somatório de diferenças de temperatura acima dessa temperatura-base, obtêm-se então um total de $338,6^{\circ}\text{C.h}$ para o ambiente externo, $428,2^{\circ}\text{C.h}$ para MC e de $57,2^{\circ}\text{C.h}$ para ME. Reduzindo o desconforto em relação ao ambiente externo em 83%.

Se considerado 90% de aceitabilidade térmica a partir de T_{comf} , quando observamos agora o excedente acima desta faixa temos um total de $135,1^{\circ}\text{C.h}$ para o ambiente externo, $198,1^{\circ}\text{C.h}$ para MC e de 0°C.h para ME. Desta forma, nesta configuração também o desconforto térmico foi nulo se considerado 90% de aceitabilidade térmica.

4.3 TETO-RESERVATÓRIO ABERTO E SOMBREADO COM MASSA TÉRMICA (CONFIGURAÇÃO 3)

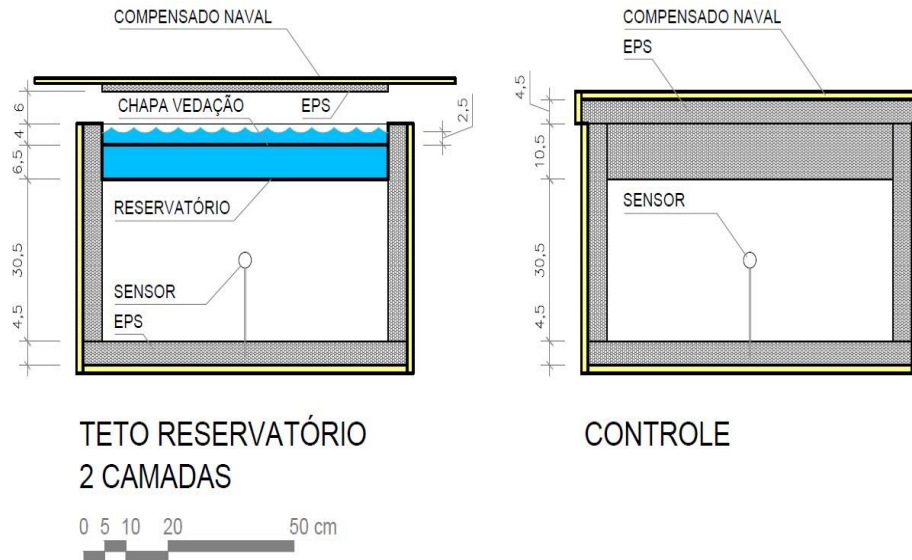


Figura 42 – Configuração 3: Módulo experimental (ME) e módulo de controle (MC)

A Figura 43 mostra os dados internos e externos de temperatura medidos nos módulos experimental (ME) e controle (MC) no período de 12/01/2015 e 08/02/2015, ao longo de 26 dias de monitoramento. No período monitorado a temperatura externa (T_o) variou de 16,7°C a 36,2°C. A umidade relativa (UR) média no período foi de 46% e a mínima registrada foi de 84%.

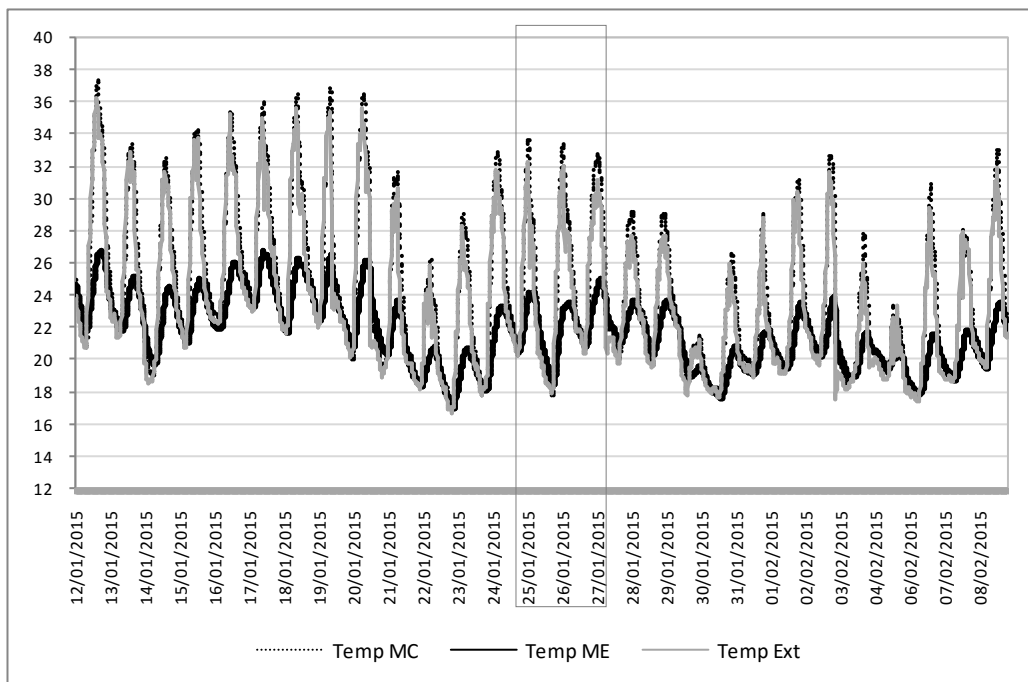


Figura 43 – Temperaturas do ar internas e externas medidas do período completo

A Figura 44 mostra os resultados para três dias do monitoramento. Estes dias apresentaram características semelhantes de céu claro com precipitação no final do dia.

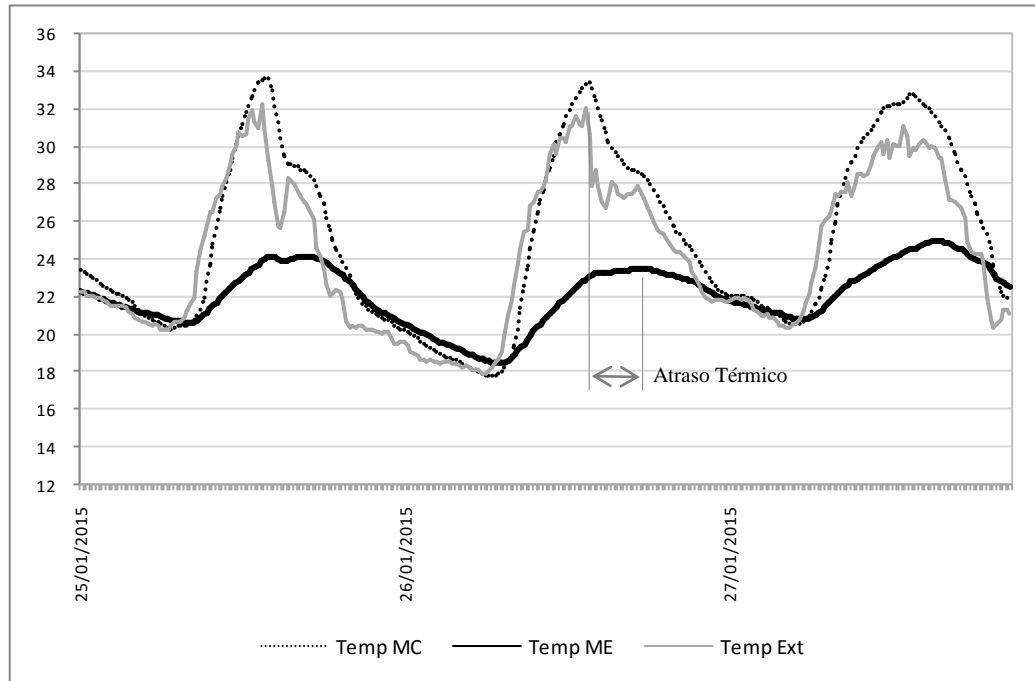


Figura 44 – Temperaturas do ar internas e externas medidas em três dias

É possível observar que a temperatura interna no módulo de controle (MC) acompanha o padrão das temperaturas externas, sem mostrar nem amortecimento térmico nem efeito de atraso térmico, mas apresenta um sobreaquecimento médio de cerca de 1 grau nas temperaturas externas máximas diárias. O módulo experimental com TR aberto e sombreado com a camada adicional de água mostra ambos os efeitos: amortecimento e atraso térmico, com significativa diferença para as temperaturas internas medidas no MC.

A diferença térmica encontrada entre ambos os módulos mostra o benefício do sistema em relação ao caso-base sem aplicação do mesmo. A amplitude térmica, em valores absolutos, para o período, atingiu 19,5°C no ambiente externo, 20,4°C para o MC e apenas 9,7°C para ME. Desta forma, MC aumentou em 5% amplitude térmica externa, enquanto ME proporcionou uma redução de praticamente 50%.

A Tabela 7 apresenta os **valores médios** de temperatura do período para o módulo de controle (T_c), para o módulo experimental (T_e) e para o ar externo (T_o).

Tabela 7 – Valores médios medidos de ME, MC e ar externo para o período (°C)

	To (ext)	Tc (MC)	Te (ME)
Média	23,5	24,3	21,7
Máxima	30,6	31,5	23,7
Mínima	19,3	19,7	19,9

Comparando as **temperaturas máximas** registradas, é possível verificar que $T_{e_{max}}=23,7^{\circ}\text{C}$ ficou $6,9^{\circ}\text{C}$ abaixo de $T_{o_{max}}=30,6^{\circ}\text{C}$, ou seja, uma redução de 23%, ao passo que $T_{c_{max}}=31,5^{\circ}\text{C}$ ficou $0,9^{\circ}\text{C}$ acima da $T_{o_{max}}$.

Observando as **temperaturas médias**, no módulo experimental, $T_{e_{med}}$ ficou $1,8^{\circ}\text{C}$ abaixo da temperatura externa média $T_{o_{med}}$, enquanto o módulo de controle, $T_{c_{med}}$ ficou $0,8^{\circ}\text{C}$ acima de $T_{o_{med}}$.

Tanto em ME quanto em MC as **temperaturas mínimas** ficaram próximas da temperatura externa. No módulo experimental $T_{e_{min}}$ ficou $0,6^{\circ}\text{C}$ acima de $T_{o_{min}}$, mostrando novamente que o sistema atua quando a temperatura se eleva.

Já a **amplitude térmica**, calculada agora para os valores médios do período, ficou em $11,3^{\circ}\text{C}$ no ambiente externo, enquanto em ME esta amplitude foi de $3,8^{\circ}\text{C}$, uma redução média de 66%.

A Tabela 8 apresenta valores médios das diferenças encontradas entre os módulos MC e ME, e em relação à temperatura do ar **para o período diurno** (das 6:30 às 19:30, total de 13 horas). A temperatura média externa quando observado o ciclo de 24h foi de $T_{o_{med}}=21,1^{\circ}\text{C}$ (Tabela 1) e sobe para $T_{o_{med}^{dia}}=25,4^{\circ}\text{C}$ se considerado apenas o período diurno.

Tabela 8 – Diferenças médias relativas de ME em relação à T_{ext} e entre os módulos para o período diurno (°C)

	(Te-To) dia	(Te-Tc) dia
Média	-3,7	-4,2
Máxima	-7,8	-8,4
Mínima	0,9	0,2

A Tabela 8 mostra que, no período diurno, ME reduziu sua temperatura máxima em relação ao ar externo ($T_{e_{max}}-T_{o_{max}}$) em $7,8^{\circ}\text{C}$, correspondendo a uma redução de 25%. Em relação à MC ($T_{e_{max}}-T_{c_{max}}$), ME apresentou uma redução ainda maior, de $8,4^{\circ}\text{C}$, uma redução de 27%. Durante o dia, a média da temperatura de ME em relação à temperatura externa ($T_{e_{med}}-T_{o_{med}}$) foi $-3,7^{\circ}\text{C}$, redução de 15% em relação à $T_{o_{med}^{dia}}$, e de $-4,2^{\circ}\text{C}$ em relação à MC.

A Figura 45 mostra a comparação da diferença de temperatura ocorrida em ME e MC em relação à temperatura externa no dia 16/01/2015, dia de céu claro com precipitação no final do dia. A diferença de temperatura nos módulos variou fortemente durante o ciclo de 24 horas, sendo baixa durante o período noturno e extremamente acentuada no período diurno.

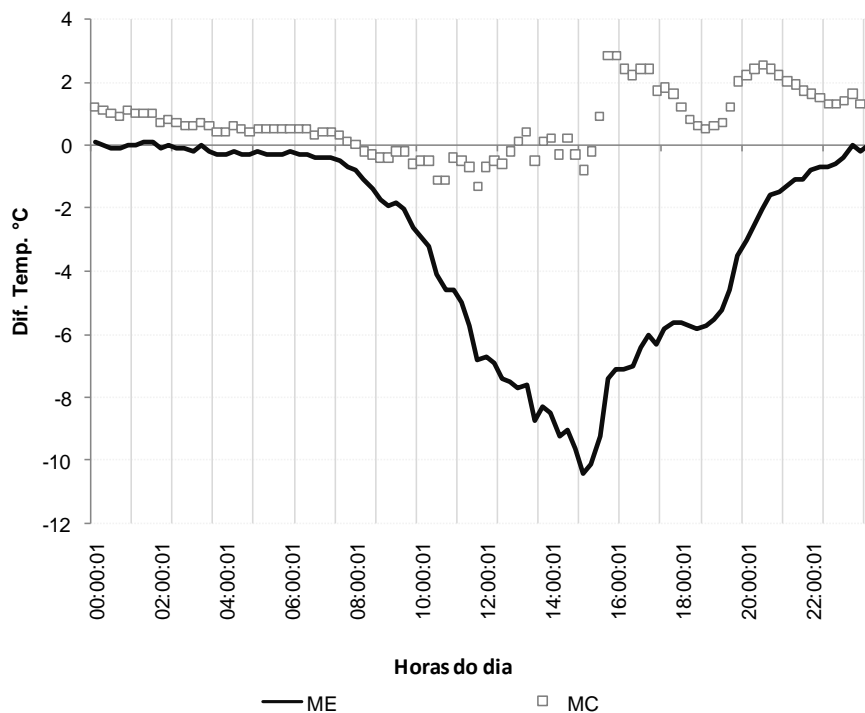


Figura 45 – Diferenças térmicas entre MC e ME em relação à temperatura externa para o dia 16/01/15

No gráfico é possível verificar que a temperatura interna em ME apresenta um pico de redução em relação ao ar externo de $10,4^{\circ}\text{C}$, às 15h, enquanto MC, sem o sistema passivo de resfriamento, apresentou um aumento em relação à temperatura do ar externo de aproximadamente $2,8^{\circ}$ às 16h. Neste dia, a diferença de temperatura ocorrida em ME e MC atingiu um pico de $10,2^{\circ}\text{C}$ às 15:45h.

4.3.1 Temperatura de Bulbo Úmido e Desempenho Evaporativo

O potencial de resfriamento encontrado no módulo experimental ME com o sistema evaporativo para o período diurno, em termos absolutos, chegaria no máximo a $9,9^{\circ}\text{C}$, limite teórico dado pela TBU_{dep} máxima absoluta calculada no período. A redução máxima absoluta

encontrada em ME, isto é, $(T_o - T_e)_{\text{absoluta}}$ foi de $10,5^\circ\text{C}$, mostrando um desempenho superior ao limite teórico para um sistema de resfriamento evaporativo.

A Tabela 9 apresenta os **valores médios** calculados para temperatura de bulbo úmido (TBU) e sua depressão (TBU_{dep}), calculados tanto para o período de 24h quanto para o período diurno.

Tabela 9 – Temperaturas de bulbo úmido para o período ($^\circ\text{C}$)

	TBU	TBU_{dep}	TBU_{dep} (dia)
Média	21,3	2,3	3,1
Máxima	25,5	5,9	5,9
Mínima	18,4	0,6	0,7

Como se vê na Tabela 7 e Tabela 9, a temperatura interna média em ME, $T_{\text{media}}=21,7^\circ\text{C}$ se situa $0,4^\circ\text{C}$ acima da $TBU_{\text{média}}=21,3^\circ\text{C}$ para o período monitorado. Entretanto, a média das máximas diárias, $T_{\text{max}}=23,7^\circ\text{C}$ está $1,8^\circ\text{C}$ abaixo da $TBU_{\text{max}}=25,5^\circ\text{C}$. Os valores obtidos indicam um potencial de resfriamento máximo para o período diurno de $TBU_{\text{dep,max}}=5,9^\circ\text{C}$, ou seja, inferior ao resfriamento máximo observado em ME, que foi de $(T_e - T_o)_{\text{max}}=-7,8^\circ\text{C}$ (Tabela 5). Além disso, considerando o que foi observado quanto à temperatura média interna encontrada em ME estar muito próxima da $TBU_{\text{média}}$ para o período monitorado, esse desempenho fica acima do valor sugerido por Erell (2007). Desta forma, supõe-se que o efeito do aumento de massa térmica com a adição da lâmina d'água de 6,5cm, mais a camada adicional de água e a placa de sombreamento tenham contribuído significativamente para o alto desempenho do sistema.

A Figura 46 mostra a correlação encontrada entre a diferença entre ME e a temperatura externa ($T_o - T_e$) e entre MC e a temperatura externa ($T_o - T_c$), versus TBU_{dep} , para o período diurno, onde novamente 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. Nota-se que o coeficiente de determinação (R^2) reduziu-se em relação ao REI sem o efeito adicional de aumento da massa térmica.

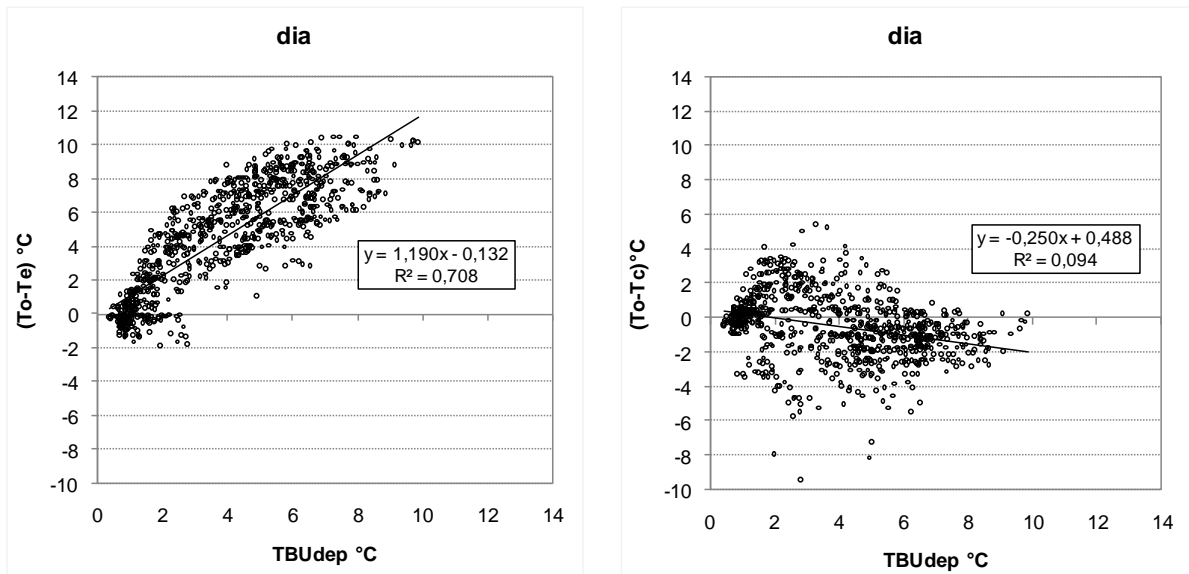


Figura 46 – Correlação encontrada entre (T_o-T_e) e TBU_{dep} (a) e entre (T_o-T_c) e TBU_{dep} (b) para o período diurno

4.3.2 Coeficiente de Performance (COP) e Potencial de Resfriamento Médio (PRM)

Para o período monitorado, o “*coefficient of performance*” (COP) foi obtido com os dados médios diários, gerando novamente valores de COP acima de 100% (Figura 47), ou seja, um desempenho acima do que seria fisicamente possível com um sistema REI. Sendo assim, é de se supor mais uma vez que ME se beneficia não apenas do efeito de resfriamento evaporativo, porém também do efeito de aumento da massa térmica e do sombreamento, o que explica o amortecimento e o pequeno atraso térmico verificados nesse conjunto de células-teste (Figura 43 e Figura 44).

A Figura 47 também apresenta valores calculados do potencial de resfriamento médio (PRM), dia a dia. Os valores de PRM se assemelham aos obtidos no Experimento 5 referido em Gonzalez et al. (2014), PRM máximo de $307,0 \text{Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$, para Florianópolis. O valor médio verificado em Curitiba foi de $207 \text{Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$, sendo que o pico verificado para o período foi de $307 \text{Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$, sendo exatamente a mesma observada em Florianópolis, o que mostra novamente coerência nos resultados aqui observados.

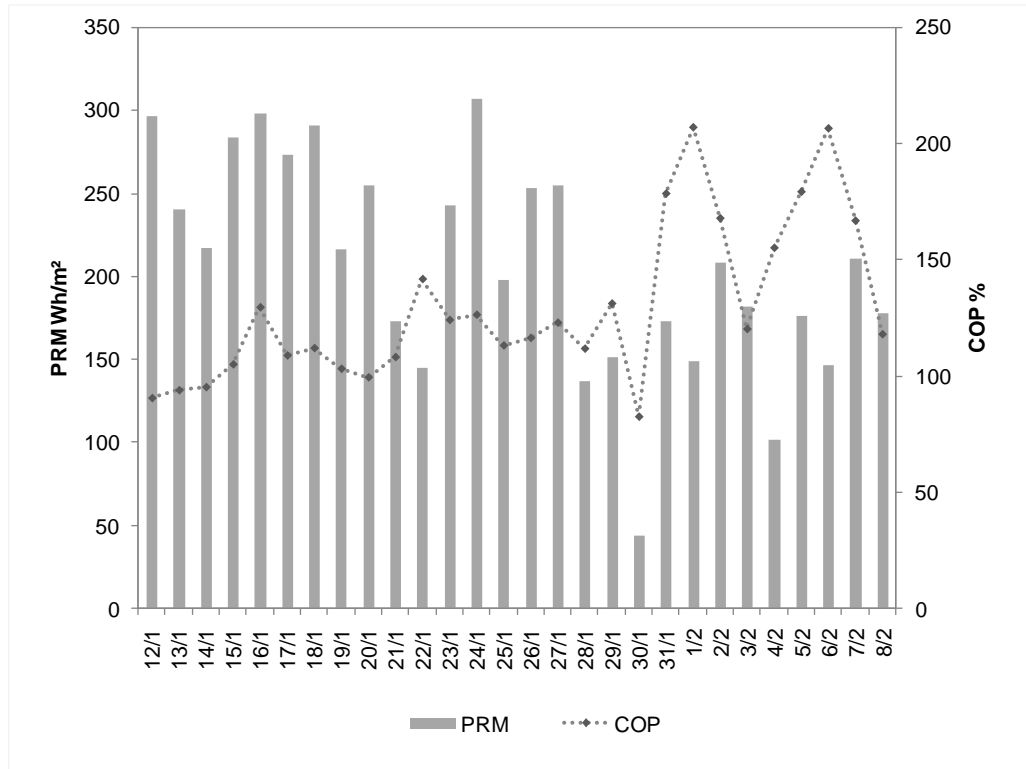


Figura 47 – Valores de COP e PRM para os 24 dias de experimento

4.3.3 Condições de conforto térmico

Adotando-se como $T_{o_{med}}$ a temperatura média registrada no local para o período monitorado (cf. Tabela 7), obtém-se $25,1^{\circ}\text{C}$ como temperatura de conforto. Calculando-se o somatório de diferenças de temperatura acima dessa temperatura-base, obtêm-se então um total de $778,0^{\circ}\text{C.h}$ para o ambiente externo, $978,8^{\circ}\text{C.h}$ para MC e apenas $32,8^{\circ}\text{C.h}$ para ME. Isto é, em ME, o desconforto foi reduzido em 96% se comparado com o ambiente externo.

Se considerado 90% de aceitabilidade térmica a partir de T_{comf} , quando observamos agora o excedente acima desta faixa temos um total de $398,8^{\circ}\text{C.h}$ para o ambiente externo, $563,5^{\circ}\text{C.h}$ para MC e de 0°C.h para ME. Desta forma, nesta configuração também o desconforto térmico foi nulo se considerado 90% de aceitabilidade térmica.

4.4 COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DAS CONFIGURAÇÕES

Apesar dos estudos terem sido realizados em períodos diferentes, com condições ambientais distintas, os resultados das variáveis estudadas das três configurações podem ser comparados na Tabela 10 em termos relativos.

Tabela 10 – Comparação de desempenho das configurações estudadas

	Redução da $T_{e_{max}}$		Redução da $T_{o_{med}}$ diurno	Redução Amplit. Térmica	COP		PRM (Wh/m ²)		Redução desconforto térmico
	$T_{o_{max}} - T_{e_{max}}$	Máxima			médio	máx.	médio	máx.	
Config 1	21%	25%	15%	51%	110%	182%	201	337	98%
Config 2	16%	18%	5%	71%			18	125	83%
Config 3	23%	25%	15%	66%	129%	207%	207	307	96%

A configuração 3, TR aberto e sombreado com camada adicional de água apresentou o melhor desempenho na redução das **temperaturas máximas**. A $T_{e_{max}}$ foi reduzida em 23% em relação à $T_{o_{max}}$, a primeira configuração também, com o sistema de resfriamento evaporativo, apresentou uma redução pouco inferior de 21%, enquanto a configuração 2, com a camada de água isolada apresentou redução de 16% em relação a $T_{o_{max}}$.

A redução máxima atingida chegou em 25% tanto na configuração 1 quanto na configuração 3. Esta redução máxima ocorre devido ao atraso térmico de ME: enquanto a temperatura externa ($T_{o_{max}}$) atinge seu pico próximo das 15h, a temperatura dentro de ME, $T_{e_{max}}$ só atinge seu pico 1,5h depois, aproximadamente às 16:30h. Assim, a “redução máxima” corresponde ao pico da temperatura externa máxima ($T_{o_{max}}$) e a temperatura interna em ME (T_e) naquele momento. Na configuração 2 esta redução atingiu 18% da $T_{o_{max}}$.

Quando comparamos o desempenho das três configurações quanto à redução da **temperatura média diurna** ($T_{o_{med}}^{dia}$), ambas as configurações com o sistema REI apresentaram a mesma redução de 15%, enquanto que o sistema com aumento da massa térmica teve uma redução de apenas 5% em relação a temperatura externa média.

Se olharmos o desempenho na redução da **amplitude térmica** a configuração 2 apresenta um desempenho superior aos dois sistemas REI com 71% de redução da amplitude térmica em relação a amplitude do ar externo. Entretanto, comparando os dois sistemas REI, mais uma vez a configuração 3 apresentou um melhor desempenho que a configuração 1, reduzindo em 66% essa amplitude, contra 51% da configuração 1. Como a diferença entre as

duas configurações com sistema evaporativo passivo é apenas o acréscimo de 4,0cm de água, sugere-se que esse acréscimo tenha sido responsável pela redução desta amplitude.

Esse melhor desempenho da configuração 3 em relação a configuração 1 pode ser reforçado quando observamos o coeficiente de performance médio, COP de 129% para a configuração 3 contra 110% para a configuração 1. O PRM médio também demonstra essa situação, apresentando um potencial de resfriamento médio para a configuração 3 pouco superior ao da configuração 1, de 207Wh/m² contra 201Wh/m² respectivamente.

Entretanto, observando a redução de desconforto proporcionada por ambas as configurações baseadas no resfriamento evaporativo, a configuração 1 apresentou um desempenho ligeiramente superior, de 98% contra 96%. Aqui, o fato dos estudos terem sido realizados em períodos diferentes pode explicar este melhor desempenho, pois a amplitude térmica observada no período de monitoramento da configuração 1 foi pouco superior ao período da configuração 3, de 11,7°C contra 11,3°C. Entretanto, quando considerado aceitabilidade térmica de 90%, o desconforto térmico é nulo nas duas configurações.

Em ambos os casos, tanto da configuração 1 quanto da configuração 3, baseadas no resfriamento evaporativo passivo, o desempenho do SRP foi superior ao limite teórico para um sistema REI. Desta forma, é possível afirmar que o excelente desempenho destas SPRs, nestes casos, foi devido à massa térmica de água da bacia e, também, do sombreamento do teto-reservatório.

A configuração 2, com o teto-reservatório vedado e isolado, apresenta uma estratégia de resfriamento passivo diferente da configuração 1 e 3. Neste caso, a estratégia é apenas a massa térmica vedada e isolada, sem o processo evaporativo. O sistema baseado na massa de água vedada e isolada apresentou um desempenho de redução de temperatura inferior ao sistema evaporativo com redução de 16% em relação $T_{O_{max}}$ e diferença máxima atingindo 20% de redução, contra 25% dos sistemas REI. Entretanto, a redução da amplitude térmica foi superior, atingindo 71% no período monitorado em relação ao ar externo sendo significativamente superior às outras duas configurações. Verificando a redução do desconforto térmico em relação ao ar externo, a configuração 2 atingiu importante redução de 86%, mas bem inferior ao alcançado pelos sistemas REI. Entretanto, se observado a aceitabilidade térmica de 90%, neste caso, assim como nos sistemas baseados no REI, a configuração apresentou desconforto térmico nulo.

4.4.1 Comparação entre a Configuração 1 (Evaporativo) e Configuração 2 (Massa Térmica) a partir de Equação Preditiva

A comparação entre o desempenho da configuração 1 monitorada e da configuração 2 estimada para o período da configuração 1 pode ser observado no gráfico da Figura 48 e Figura 49.

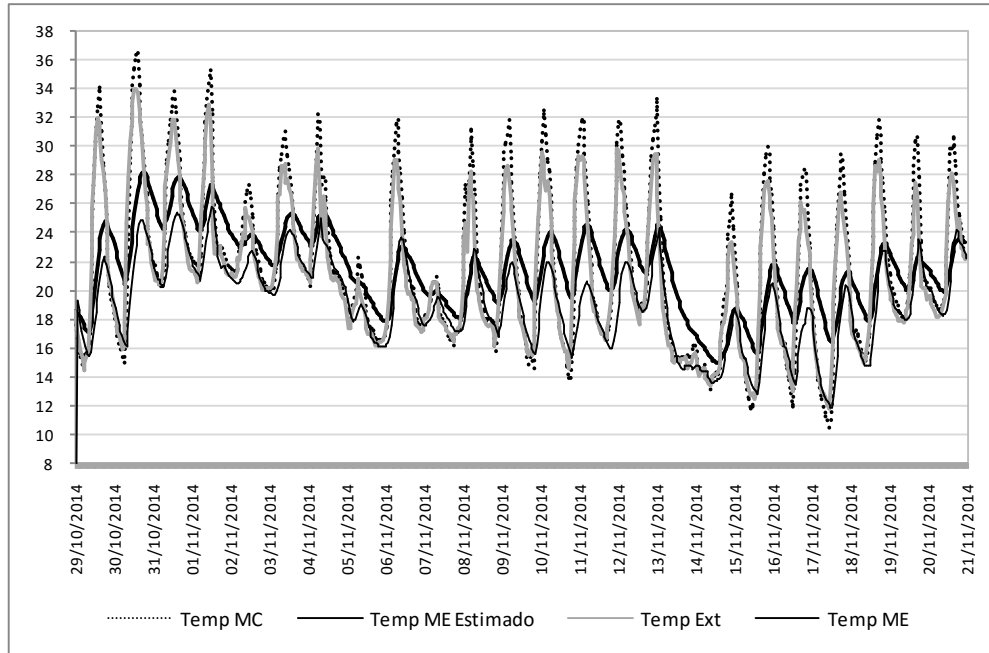


Figura 48 –Comparação entre a configuração 1 e a configuração 2 via método preditivo

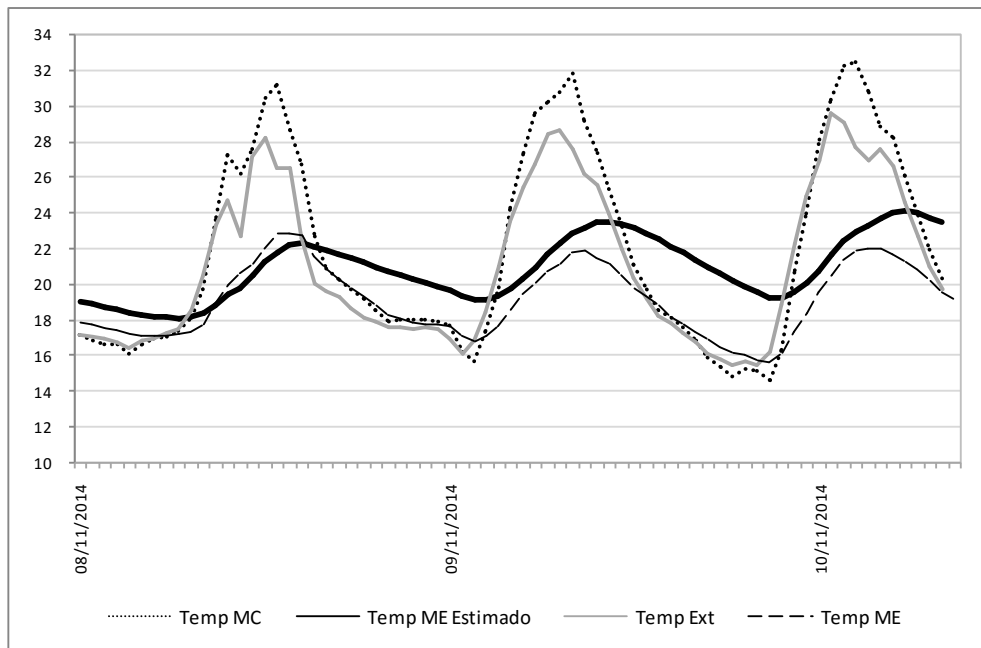


Figura 49 – Temperaturas do ar internas e externas medidas e estimadas em três dias

Nota-se um comportamento térmico dessemelhante entre as duas configurações, cada qual com um fenômeno responsável pela curva de temperatura obtida: para o caso do sistema de resfriamento evaporativo atuante, nota-se uma redução da temperatura interna maior para os dias mais quentes ou com maior oscilação térmica; para a segunda configuração, o efeito da massa térmica diminui a amplitude da curva, porém a queda de temperatura durante o período diurno, apesar de bastante significativa, não é tão acentuada como na configuração 1.

A Tabela 11 mostra a comparação entre as configurações 1 medida, e configuração 2 estimada.

Tabela 11 – Comparação de desempenho das configurações 1 e 2 no mesmo período

	Redução da $T_{e_{max}}$		Redução da $T_{o_{med}}$ diurno	Redução Amplit. Térmica	COP		PRM (Wh/m ²)		Redução desconforto térmico
	$T_{o_{max}} - T_{e_{max}}$	Máxima			médio	máx.	médio	máx.	
Config 1	21%	25%	15%	51%	110%	182%	201	337	98%
Config 2 est.	16%	20%	8%	66%			14	213	86%

O sistema baseado em REI teve, para este período, um desempenho superior ao sistema baseado no aumento da massa térmica com relação à redução das $T_{e_{max}}$, reduzindo 21% contra 16% da configuração 2, e chegando numa diferença máxima de 25% em relação ao ar externo, contra 20% da configuração 2. A temperatura externa média ($T_{o_{med}}^{dia}$) para o período diurno foi reduzida em 15% para o sistema evaporativo, enquanto o sistema com massa térmica isolada reduziu apenas 8%, mostrando mais uma vez um desempenho bastante superior da configuração 1 no que se refere à redução de temperatura.

Quanto à redução do desconforto térmico em relação ao ar externo, o desempenho da configuração 1 também foi significativamente superior, 98% contra 86%. Entretanto, quando se analisa a redução da amplitude térmica em relação ao ar externo, a configuração 2 apresentou um desempenho superior ao sistema evaporativo, de 66% contra 51%.

Em relação ao módulo de controle (MC), Tabela 12, ambas as configurações promoveram reduções significativas de temperatura, mostrando um desempenho superior para o sistema de resfriamento evaporativo.

Tabela 12 – Comparativo para o período, diferenças em termos de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) encontradas nos dois módulos para a configuração 1 (função evaporativa) e para a configuração 2 (função massa térmica)

	T_o	T_c (MC)	T_e (ME)		Função evaporativa		Função massa térmica	
			evap.	massa	$(T_e - T_o)$ dia	$(T_e - T_c)$ dia	$(T_e - T_o)$ dia	$(T_e - T_c)$ dia
Média	21,1	21,7	19,1	21,5	-3,6	-4,4	-1,9	-2,8
Máximo	28,1	30,3	22,3	23,5	-7,3	-8,7	-5,5	-7,1
Mínimo	16,4	16,2	16,6	19,5	0,5	0,3	3,2	3,1

Enquanto a redução máxima na configuração 1 foi de $8,7^{\circ}\text{C}$, no sistema com massa térmica foi de $7,1^{\circ}\text{C}$, diferença de $1,6^{\circ}\text{C}$ em favor do sistema com resfriamento evaporativo. Entretanto, quando observamos as temperaturas mínimas, a massa térmica vedada e isolada mantém as temperaturas mínimas $3,1^{\circ}\text{C}$ acima da temperatura interna de MC, ficando o sistema evaporativo, por não estar vedado e isolado, com temperatura praticamente igual às temperaturas mínimas externas, mostrando que, a falta de isolamento, contribuiu para o equilíbrio térmico mais rápido do ar externo com a água do reservatório.

Comparando o desempenho térmico dos MEs com a temperatura do ar externo, temos uma redução máxima de temperatura no sistema evaporativo de $7,3^{\circ}\text{C}$, contra $5,5^{\circ}\text{C}$ no sistema com massa térmica. A amplitude térmica observada na configuração 1 foi de $5,7^{\circ}\text{C}$ e de apenas $4,0^{\circ}\text{C}$ na configuração 2.

Desta forma, foi possível observar que, apesar de ambos os sistemas possuírem a mesma massa de água, o fato de uma estar isolada e outra não, gera diferenças significativas no desempenho do teto-reservatório. A diferença relativa entre MC e ME nas duas configurações mostra um desempenho significativamente maior para a configuração 1 no que se refere ao resfriamento do ambiente interno. A configuração 2, com a massa térmica atuante, traz maiores benefícios para a manutenção do calor no ambiente interno e redução da amplitude térmica.

5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O presente capítulo tem o objetivo de discutir os resultados observado na cidade de Curitiba juntamente com alguns estudos similares já realizados em outras localidades que também se utilizaram de células-teste. É importante lembrar que os mesmos foram realizados em tempos e condições ambientais distintas. A Tabela 13 traz um levantamento de dados de alguns destes estudos, conforme apresentado no capítulo da revisão bibliográfica juntamente com os registrados em Curitiba. Os valores não preenchidos na tabela não foram encontrados nas fontes estudadas.

Tabela 13 – Comparativo entre alguns estudos realizados utilizando células-teste

Cidade	Tipo	dias	24h				diurno			
			Te-Tc		Te-To		Te-Tc		Te-To	
			med	máx	méd	máx	med	máx	méd	máx
Sede Boqer (1984)	Evap		-3,5	-3	-2					
Maracaibo (2010)	Evap	6	-4,1	-8,8	-4,5	-10,5				
Florianópolis (2014)	Evap	15	-2,3		-2,4					
Curitiba (2015)	Evap	24	-2,5	-8	-1,9	-5,8	-4,4	-8,7	-3,6	-7,3
Maracaibo (2010)	Evap+MT	21	-3,3	-8,2	-3,5	-7,7				
Florianópolis (2014)	Evap+MT	15	-3,2	-7,7	-3,4					
Curitiba (2015)	Evap+MT	26	-2,6	-7,8	-1,8	-6,9	-4,2	-8,4	-3,7	-7,8
Maracaibo (2010)	MT	4	-0,3	-4,8	0,1	-5,6				
Curitiba (2015)	MT	15	0,2	-5,4	0,3	-4,9	-1,6	-5,8	-1,2	-5,6

Onde:

Evap= Sistema com teto-reservatório aberto e sombreado

Evap+MT= Sistema com teto-reservatório aberto e sombreado com massa térmica

MT= Sistema com teto-reservatório vedado e isolado

To= Temperatura do ar externo

Te= Temperatura no interior da célula-teste experimental

Tc= Temperatura no interior da célula-teste de controle

Com exceção do estudo realizado por Givoni, em Sede Boqer, Israel, no ano de 1984, os demais estudos utilizaram células-testes similares o que facilita a comparação. Esse pode ser um dos motivos da discrepância encontrada nos resultados obtidos por Givoni em Sede Boqer e os demais de Maracaibo, de Curitiba e de Florianópolis com relação à redução da temperatura máxima. Givoni também utilizou o caso base com sombreadamento, o que muda a referência em relação aos demais estudos que se utilizaram apenas da célula-teste sem o teto-reservatório e sombreadamento. Enquanto os sistemas evaporativos das outras regiões apresentaram redução $(Te-Tc)_{max}$ entre -7,7 e -8,8°C, o experimento de Sede Boqer apresentou redução de apenas -3,0°C. Nas células utilizadas por Givoni, as dimensões são reduzidas em

relação aos demais e o teto-reservatório foi feito de concreto, o que aumenta sua massa térmica, enquanto os demais foram confeccionados com chapa de aço.

Na cidade de Maracaibo, obteve-se, com os sistemas evaporativos, a melhor redução de temperatura máxima $(T_e - T_c)_{\max}$, de $-8,8^\circ\text{C}$, enquanto em Curitiba o resultado foi praticamente o mesmo de Florianópolis, $-7,8^\circ\text{C}$ e $-7,7^\circ\text{C}$ respectivamente.

Quando observamos a redução da temperatura média em relação ao ar externo $(T_e - T_o)_{\text{med}}$, os resultados obtidos em Curitiba mostram coerência com os resultados sugeridos por Givoni, que um sistema baseado em REI apresenta reduções internas de aproximadamente $2,0^\circ\text{C}$ em relação ao ambiente externo (GIVONI, 1984). Em Curitiba, os resultados foram de $-1,8^\circ\text{C}$ e $-1,9^\circ\text{C}$ nos dois experimentos com a estratégia evaporativa.

Quando observamos a redução da temperatura média em relação ao caso base $(T_e - T_c)_{\text{med}}$, do sistema apenas com o resfriamento evaporativo, os estudos realizados em Curitiba e Florianópolis apresentaram resultados muito próximos, de $-2,5^\circ\text{C}$ e $-2,3^\circ\text{C}$ respectivamente.

Já, quando a bacia foi vedada e acrescido água (Evap+MT), o sistema apresentou um melhor desempenho de redução $(T_e - T_c)_{\text{med}}$ para a cidade de Florianópolis, em relação ao sistema apenas evaporativo (Evap), ficou praticamente igual em Curitiba e ocasionou uma piora de desempenho para a cidade de Maracaibo em relação às outras duas cidades.

Os experimentos utilizando a estratégia apenas de aumento da massa térmica (MT) ocorreram de forma similar nas cidades de Maracaibo e Curitiba, e é possível constatar que as reduções das temperaturas máximas em relação ao caso base $(T_e - T_c)_{\text{med}}$ ficaram próximas, sendo de $-4,8^\circ\text{C}$ e $-5,4^\circ\text{C}$ respectivamente.

A tabela também mostra que as análises levando-se em conta apenas o **período diurno** não foram consideradas pelos demais autores. Entretanto, é possível verificar a relevância deste estudo se observado o desempenho, por exemplo, do sistema da configuração 1 (Evap) quanto à redução das temperaturas médias e máximas em relação ao ar. Para o período de 24h tem-se $(T_e - T_o)_{\text{med}}^{24\text{h}} = -1,9^\circ\text{C}$, mas a redução aumenta para $(T_e - T_o)_{\text{med}}^{\text{diurno}} = -3,6^\circ\text{C}$ quando analisado apenas o período diurno. Observando a redução máxima, a diferença é também significativa, sendo de $(T_e - T_o)_{\max} = -5,8^\circ\text{C}$, aumentando a redução para $(T_e - T_o)_{\max}^{\text{diurno}} = -7,3^\circ\text{C}$. Como o período diurno é aquele que, em geral, apresenta maior necessidade de resfriamento, o fato da análise sempre ocorrer juntamente com o período noturno acarreta em distorções quanto ao real desempenho do sistema.

Assim, é possível constatar que os estudos realizados em Curitiba apresentam coerência com os demais, mostrando reduções significativas de temperatura para todas as

variações estudadas tanto para o sistema baseado no resfriamento evaporativos, quanto para o sistema baseado apenas no incremento da massa térmica.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou resultados iniciais de estudo sobre a utilização de uma tecnologia de baixo consumo energético para condicionamento térmico em ambientes internos, aplicada a células-teste em condições de primavera/verão em Curitiba.

O estudo mostrou a efetividade do sistema de resfriamento passivo (SRP) para um período relativamente seco da primavera curitibana e para um verão relativamente quente e úmido. Ficou evidente que o sistema evaporativo REI contribuiu para uma maior redução da temperatura do ar interna, reduzindo a mesma, em média, 2,5°C, e apresentando redução da temperatura máxima de 8,0°C em relação ao caso base.

A configuração baseada apenas na massa térmica isolada proporcionou um significativo aumento do conforto térmico, porém inferior ao observado no REI. O desconforto térmico foi completamente eliminado para todas as configurações quando considerado 90% de aceitabilidade térmica.

Também foi observada uma forte correlação entre a depressão da temperatura de bulbo úmido e a redução da temperatura interna quando aplicado o sistema de resfriamento evaporativo, apresentando correlação $R^2=0,817$.

Na comparação com a configuração 2, baseada apenas no uso de massa térmica, o sistema com o resfriamento evaporativo atuante REI, das configurações 1 e 3, mostrou-se mais eficaz para o resfriamento do ambiente interno.

Na comparação com outros estudos realizados ficou evidente que a análise no período diurno pode contribuir significativamente para uma melhor interpretação da eficácia do SRP baseado em REI, visto que a análise de valores médios de 24 horas apresenta reduções significativas de temperatura devido ao período noturno. No primeiro caso estudado, a média da temperatura do ar, para o ciclo de 24 horas, foi de 21,1°C, enquanto se considerado apenas o período diurno, de 7 a 19 horas, a média subiu para 23,3°C. Como o REI foi atuante apenas no período diurno, a análise de sua eficácia, no período em que está atuante, apresenta resultados mais reais sobre seu desempenho.

O presente estudo utilizou duas células-teste, uma experimental e outra de controle. Sugere-se, para estudos futuros, a utilização de outras células-teste, podendo assim comparar diversas estratégias no mesmo período. A medição do volume de água evaporado também é de grande relevância, não sendo este contemplado por este experimento nem observado nos demais estudos analisados.

O experimento de Curitiba mostrou a efetividade do REI para contribuir de forma significativa para a redução do consumo energético em edificações, apresentando resultados superiores aos sugeridos pela carta bioclimática. Soluções passivas, com baixo consumo energético estão alinhadas com a busca de um mundo mais sustentável. A utilização de tecnologias que promovam maior integração da sociedade com a natureza, são de extrema relevância num planeta que já se mostra hostil ao desequilíbrio gerado pós era industrial.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220**: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ADRIAZOLA, Marcia K. O. **Avaliação experimental por meio de protótipos e por simulação de painéis de madeira para habitação de interesse social**. 2008. 315 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- ANDRADE, Nixon C. de; RORIZ, Maurício. **Comportamento térmico de cobertura verde utilizando a grama brachiaria humidicola na cidade de São Carlos, SP**. 2008. Fortaleza: Anais do ENTAC, 2008.
- BALCOMB, J. Douglas. **Passive Solar in the United States: 1976-1986**. Colorado: [s.n.], 1987.
- BATISTA, Juliana; LAMBERTS, Roberto. **Estimativas de redução da temperatura do ar: uso do resfriamento evaporativo direto no semi-árido alagoano**. 2007. Ouro Preto: Anais do ENCAC, 2007.
- BUTTI, Ken; PERLIN, John. **A golden thread: 2500 years of solar architecture and technology**. Palo Alto: Cheshire Books, 1981. 265 p.
- CALDEIRA, Jorge. **Mauá: Empresário do Império**. São Paulo: Companhia da Letras, 1995.
- CARDOSO, Grace T.; VECCHIA, Francisco; NETO, Salvador C. **Espuma Rígida de Poliuretano (PU) Derivada de Óleo Vegetal (Ricinus communis) para Isolamento Térmico em Sistemas de Cobertura**. Sinop: [s.n.], 2011. p.12.
- CARDOSO, Grace T.; VECCHIA, Francisco. Comparison of thermal performance between test cells with different coverage systems for experimental typical day of heat in Brazilian Southeastern. **Frontiers of Architectural Research** v. 3, n. 3, p. 271–282, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263514000260>>.
- CASTRO, Adriana P. A. S.; LABAKI, Lucila C.; AMO, Viviane A.; CARAM, Rosana M. **Análise do Comportamento de Vidros Refletivos Pirolíticos em Relação às Temperaturas Superficiais Através de Medições em Células-Teste**. 2010. Canela: Anais do ENTAC, 2010.
- CASTRO, Adriana P. A. S.; GUTIERREZ, Grace C. R.; LABAKI, Lucila C.; BALDAN, Victor J. S.; CARAM, Rosana M. **Desempenho térmico de películas poliméricas em fachadas envidraçadas**. 2008. Fortaleza: Anais do ENTAC, 2008.
- CASTRO, Adriana P. A. S. **Desempenho termico de vidros utilizados na construção civil: estudo em celulas-teste**. Universidade Estadual de Campinas, 2006. 184 p. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/>>.

CASTRO, Adriana. P. A. S. BUENO-BARTHOLOMEI, Carolina L.; LABAKI, Lucila C.; CARAM, Rosana M. **Estudo do ganho de calor em vidros planos e refletivos através de células-teste**. Ouro Preto: Anais do ENCAC, 2007. p.369–378.

CAVALCANTI, J. R. de S. **Estudo experimental comparativo entre resfriamento evaporativo e radioativo em ambientes cobertos com telhas de fibrocimento em região de clima quente e úmido**. Orientação de Racine Tadeu Araújo Prado. 2001. 173f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

CAVALCANTI, J. R. de S.; PRADO, Racine T. A. **Estudo experimental comparativo entre resfriamento evaporativo e radiativo em ambientes cobertos com telhas de fibrocimento em região de clima quente e úmido**. São Paulo. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, n. 302, 2001.

COSTA, Fernando J. M. **Do modelo geométrico ao modelo físico: O tridimensional na educação do Arquiteto e Urbanista**. 2013. 235 f. Tese (Doutorado em Conforto no Ambiente Construído; Forma Urbana e Habitação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

CUNHA, Eduardo G. **Elementos de arquitetura de climatização natural**. Porto Alegre: Masquatro, 2006. .

CUTCLIFFE, Stephen. **La emergencia de CTS como campo acadêmico**. In: Ideas, Máquinas y Valores. Los Estudios de Ciencia, Tecnología y Sociedad. Barcelona: Anthropos, 2003.

De DEAR, Richard J.; BRAGER, Gail. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE standard 55. **Energy and Buildings**, julho 2002.

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.

FERNANDES, Leandro C; KRÜGER, Eduardo L., ROSSI, Francine A.; GRZYBOWSKI, Jose M. V.; LANGE, Sérgio C. **Estimativa de temperaturas internas horárias de pequenas edificações a partir de temperaturas externas: proposta de método alternativo**. 2015, Campinas: Anais do ENCAC, 2015.

FERNANDES, Leandro C; LANGE, Sérgio C; KRÜGER, Eduardo L. **Estudo do Potencial de um Sistema de Resfriamento Evaporativo Indireto no Clima de Curitiba**. 2015, Campinas: Anais do ENCAC, 2015.

FERNANDES, Leandro C; GRZYBOWSKI, Jose M. V.; RIBEIRO, Anderson A. G. A. **Desenvolvimento, Execução e Teste de Simulador de Trajetória Solar Aparente**. 2013, Brasília: Anais do ENCAC e ELACAC, 2013.

FERNANDES, Leandro C. **Utilização de equações preditivas para estimativa da temperatura interna de edificações de interesse social**. 2005. 189 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - UTFPR, C, uritiba2005.

FERNANDES, Leandro C; CUNHA, Eduardo da. **Ensino de Geometria Solar: Proposta de Heliodon Alternativo**. 2011, Armação de Búzios: [s.n.], 2011. p.1–10.

FERNANDES, Leandro C.; GRZYBOWSKI, José M. V.; SAUGO, Andréia. **Desenvolvimento de simulador de trajetória solar aparente de precisão**. 11 nov. 2014, Maceió: ANTAC, 11 nov. 2014. p.804–813. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac2014/artigos/paper_483.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2014.

GIVONI, Baruch. Building design principles for hot humid regions. **Renewable Energy**. v. 5, p. 908–916, 1994.

_____. Options and Applications of Passive Cooling. **Energy and Buildings**, 1984.

_____. **Passive and Low Energy Architecture**. [S.l.]: Elsevier, 1983. 339-352 p.

_____. **Experimental studies on radiant and evaporative cooling of roofs. Proceedings of the International Passive and Hybrid Cooling Conference**. Miami Beach, American Section of the International Solar Energy Society, USA, 1981. 279-283 p.

GONZALEZ, Eduardo C.; MIZGIER, Martín O.; PEREIRA, Fernando R; GÜTHS, Saulo. **Estudo experimental com sistemas de resfriamento passivo em Florianópolis**. 2014. Maceió: Anais do ENTAC, 2014.

GONZÁLEZ, Eduardo C.; KRÜGER, Eduardo L. **Enfriamento evaporativo indireto: predicción del comportamiento térmico en ciudades brasileñas**. 2013. Brasília: Anais do ENCAC/ENLACAC, 2013.

GONZÁLEZ, Eduardo C.; KRÜGER, Eduardo L.; GIORDANO, Dominique E. **Estudo da aplicabilidade de um sistema de resfriamento evaporativo indireto para otimização do conforto térmico em residências no território brasileiro**. 2014. Maceió: Anais do ENTAC, 2014.

GONZALEZ, Eduardo C.; GONZALEZ-GARCIA, Sabrina I. Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estanque para el enfriamiento pasivo en clima húmedo. **Ambiente Construído** p. 149–171, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ac/v13n4/v13n4a11.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2015.

GONZÁLEZ-GARCIA, Sabrina. **Estudio experimental del comportamiento térmico de sistemas pasivos de enfriamiento en clima cálido-húmedo**. [S.l: s.n.], 2010.

GUTIERREZ, Grace C. R; LABAKI, Lucila C. **Ensaio experimental para medição do fator solar de sistemas de aberturas**. 2007, Ouro Preto: Anais do ENCAC, 2007. p.2110–2111.

HAY, R. Harold; YELLOTT, John I. International aspects of air conditioning with moveble insulation. **Solar Energy**. n12 (4). Novembro, 1969. p.427-438.

HITCHIN, Roger. Editorial. **Building and Environment** v. 28, n. 2, p. 105–106 , 1993.

HUGHES, Thomas P. **La evolución de los grandes sistemas tecnológicos in: Actos, actotes y artefactos: sociologia de la tecnologia**. Bernal: Universidade Nacional de Quilmes. 2008. pp. 101-146

IBIAPINA, Marcia B; SILVA, Vanessa G.; ILHA, Marina S. de O.; KOWALTOWSKI, Doris C. C. K. **Pesquisa experimental para avaliar a qualidade da água e a capacidade de retenção de água pluvial em coberturas verdes em Campinas - Brasil**. 2010, São Paulo: SindusCon-SP, 2010.

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.

JARDIM, Patrícia R. S. A. **Desempenho térmico de coberturas: Um estudo comparativo entre as telhas de material reciclado, de fibra e betume, fibrocimento e cerâmica**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010. 125 p.

JIMÉNEZ, M. J.; MADSEN, H. Models for describing the thermal characteristics of building components. **Building and Environment** v. 43, n. 2, p. 152–162 , 2008.0360-1323.

KANNING, Rodrigo C; AGUIAR, Ely C. C de; PEREIRA, Luciano A.; SILVÉRIO, Cassio D.V. **ISOPET – Análise do Desempenho Térmico de um Protótipo Habitacional Construído com Blocos de Concreto com Isopor e Garrafas PET**. 2004, São Paulo: ICTR, 2004.

KOMENO, Márcio H; SPOSTO, Rosa M; KRÜGER, Eduardo L. **Metodologia para Avaliação de Desempenho Térmico de Sistemas Não-Convencionais de Paredes de Vedação Através de Monitoramento em Test-Cells e Simulação Computacional**. 2006, Florianópolis: Anais do ENTAC, 2006. p.466–475.

KREIMER, Pablo. **Estudios Sociales de la Ciencia y la Tecnologia en America Latina; Para qué? Para Quien?**.Redes, 26(13), 55-63, 2007. Disponível por: <http://www.iec.unq.edu.ar/images/redes/RedesN26/03%20Kreimer.pdf>

KRÜGER, Eduardo L; RORIZ, Maurício. **Previsão horária de temperaturas internas do ar: aplicação no estudo de células-teste**. 2004, Maceió: Anais do ENTAC, 2004. p.948–957.

KRÜGER, Eduardo L; SUETAKE, Graziela Y; ADRIAZOLA, Márcia K O. **Comparação do desempenho térmico de coberturas manta reflexiva e placas de EPS**. 2006, Florianópolis: Anais do ENTAC, 2006. p.476–483.

KRÜGER, Eduardo L.; RODRIGUES, Estelamaris L.; KOBAY Geísa F.; CERRI, José A.; NAKAMURA, Maiara. **O uso de protótipos experimentais de baixo custo para avaliação de materiais de vedações quanto ao seu desempenho térmico**. 2004. São Paulo: Anais do ENTAC, 2004. p.10. 8589478084. .

KRUGER, Eduardo L. O uso de equações preditivas na avaliação do desempenho térmico de um protótipo habitacional constituído de materiais alternativos. **Ambiente Construído** v. 3, n. 2, p. 77–86 , 2003.

KRÜGER, Eduardo. 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**. 2004. São Paulo: Anais do ENTAC, p.10, 2004.

KRÜGER, Eduardo L.; RORIZ, Maurício. **Previsão horária de temperaturas internas do ar: aplicação no estudo de células-teste**. 2004. Maceió: Anais do ENTAC. p.948–957, 2004.

LABAKI, Lucila C.; TEIXEIRA, Carla F.; TAVARES, Sérgio F. **Desempenho térmico de técnicas passivas em coberturas: resfriamento evaporativo e radiante**. 2005. Maceió: Anais do ENCAC, 2005.

LIMA, Douglas M. de. AMORINA, Mariana M.; LIMA JR, Humberto C.; BARBOSA, Normando P.; WILRICH, Fábio L. Avaliação do desempenho estrutural de treliças Howe de Bambu Laminado Colado. **Ambiente Construído** v. 15, n. 3, p. 85–102 , set. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212015000300085&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>.

LITTLER, John. Test cells: Do we need them? **Building and Environment** v. 28, n. 2, p. 221–228, 1993.

LOPES, E.; LABAKI, Lucila C. **Desempenho Térmico da Espuma Poliuretana à Base de Óleo de Mamona Utilizada em Componentes da Edificação** (Subcoberturas), Estudo em Ilha Solteira - SP. 2012, Juíz de Fora: Anais do ENTAC, 2012. p.3954–3964.

MARX, Leo; SMITH, Merrie R. **Does technology drive history? The Dilemma of Technological Determinism**. Cambridge,: MIT Press.1996. Disponível em: <http://www.open.ac.uk/blogs/sirg/wpcontent/uploads/2011/05/1-Marx+Smith-DoesTechnologyDriveHistory-Intro2.pdf>

MIANA, Anna C. **Avaliação do desempenho térmico de brises transparentes: ensaios em células-teste**. 2005. 200 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MICHELATO, Rubia. **Avaliação do Desempenho Térmico de Vidros Refletivos: Estudo de Caso em Células-Teste**. 2007. 226f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MONTEIRO, José R. V. **Influência da Envoltória Vertical Opaca de Edificações nas Temperaturas Internas do Ar**. 2013. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

- MORELLI, Denise D. de O. **Paredes verdes: vegetação como qualidade ambiental no espaço construído**. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- MUMFORD, L., **Técnicas autoritárias y democráticas**. em *Anthropos, Tecnologia, Ciencia, Naturaleza y Sociedad*. Antologia de autores y textos, suplemento 14, 1989.
- NASCIMENTO, Gustavo R. **Refrigeração evaporativa de telhados por meio de gotejamento de água. Experimento em bancada de testes**. 2005. 86f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.
- OLGYAY, Victor. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. 1 ed. 5ª reimpressão. Espanha: Gustavo Gili, 2008.
- OGOLI, David M. Predicting indoor temperatures in closed buildings with high thermal mass. **Energy and Buildings** v. 35, n. 9, p. 851–862, 2003.
- OLGYAY, Victor. **Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. 5 ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2008.
- ORGANIZAÇÕES DAS NAÇÕES UNIDAS. **World population projected to reach 9.7 billion by 2050**. Disponível em:
<<https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2015-report.html>> Acesso em 23/04/2016.
- PERALTA, Gizela. **Desempenho Térmico de Telhas: Análise de Monitoramento e Normalização Específica**. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- RORIZ, Victor; RORIZ, Maurício. **Resfriamento evaporativo por aspersão de água sobre telhas de fibrocimento em clima semi-úmido**. 2008, Fortaleza: ANTAC, 2008.
- SÁNCHEZ, Luis H. G. **Evaluación de un Techo Estanque Como Sistema de Enfriamiento Pasivo en un Clima Cálido Sub-húmedo**. 1993.
- SEIXAS, Grace T. C. **Climatologia aplicada à Arquitetura: investigação experimental sobre a distribuição de temperaturas internas em duas células de teste**. 2015. 126f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- SHARIFI, Ayyoob; YAMAGATA, Yoshiki. Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review. **Applied Energy**, n. 160, p. 336 - 367, 2015.
- SILVA, Antonio C. S. B. **Simulação de resfriamento evaporativo por microaspersão d'água**. 2004. 241f. Florianópolis, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SPANAKI A.; KOLOKOTSA D; TSOUTSOS T, ZACHAROPOULOS I. Assessing the passive cooling effect of the ventilated pond protected with a reflecting layer. **Applied Energy**, 2014;123:273–80

SPOSTO, Rosa M.; KOMENO, Márcio H.; KRÜGER, Eduardo L. Viabilidade energético-econômica de habitações de interesse social em Brasília com uso de blocos de concreto e entulho. **Rem: Revista Escola de Minas** v. 60, n. 3, p. 519–524, 2007.

STRACHAN, P. a.; BAKER, P. H. Outdoor testing, analysis and modelling of building components. **Building and Environment** v. 43, n. 2, p. 127–128 , 2008.

STRACHAN, P. a.; VANDAELE, L. Case studies of outdoor testing and analysis of building components. **Building and Environment** v. 43, n. 2, p. 129–142 , 2008.

TEIXEIRA, Carla F. B.; LABAKI, Lucila C. **Resfriamento evaporativo em coberturas: estudo de caso em Campinas-SP**. 2006, Florianópolis: Anais do ENTAC, 2006. p.902–909.

VACCAREZZA, Leonardo S. **Ciencia, Tecnología y Sociedad: el estado de lá cuestión en América Latina**. Revista do Observatório do Movimento pela Tecnologia Social da América Latina. vol. 1, num. 1, 2011. Disponível por:
<<http://www.red.unb.br/index.php/cts/article/view/3841/3298>.>

VECCHIA, Francisco; MASIERO, Érico. **Resfriamento evaporativo e condicionamento de ar convencional: estudo experimental comparativo para a obtenção do conforto humano**. 2006. Florianópolis: ANTAC, 2006.

VECCHIA, Francisco; SILVA, Adeildo C. da; FERREIRA, Osny P. **Utilização de Resíduos Sólidos, Tetra Pak, na Construção de Edificações Sustentáveis: Análise do Comportamento Térmico de Subcoberturas na Situação Transicional Primavera – Verão**. 2002, São Paulo: NUTAU, 2002. p.1518–1526.

WINNER, Langdon. **Do artifacts have politics?** In: Mackenzie, Donald & Wajcman, Judy. *The Social Shaping of Technology*. Buckingham, Philadelphia: Open University Press, 1996. Tradução para o português em:
<<http://www.necso.ufrj.br/Trads/Artefatos%20tem%20Politica.htm>>