



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE UM RESFRIADOR EVAPORATIVO EM ADOBE

Camila Catherine de Moraes Cassundé

2024

CAMPO GRANDE | MS

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE UM
RESFRIADOR EVAPORATIVO EM ADOBE**

CAMILA CATHERINE DE MORAIS CASSUNDÉ

Dissertação desenvolvida no Mestrado Profissional apresentada na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Andrea Naguissa Yuba

CAMPO GRANDE

ABRIL/2024



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



FOLHA DE APROVAÇÃO

Camila Catherine de Moraes Cassundé.

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE UM RESFRIADOR EVAPORATIVO EM ADOBE

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovado pela Banca Examinadora em 12 de abril de 2024, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

Banca examinadora:

Dra. Andrea Naguissa Yuba (Presidente - Interno)
Dra. Ana Paula da Silva Milani (Interno) (Suplente)
Dr. Joao Onofre Pereira Pinto (Externo)
Dr. Jose Alberto Ventura Couto (Externo) (Suplente)
Dr. Julio Alberto Peres Ferencz Junior (Interno)

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Andrea Naguissa Yuba, Professora do Magistério Superior**, em 29/04/2024, às 15:56, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Joao Onofre Pereira Pinto, Usuário Externo**, em 29/04/2024, às 15:59, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Julio Alberto Peres Ferencz Junior, Professor do Magisterio Superior**, em 29/04/2024, às 16:51, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4823539** e o código CRC **DOC102E6**.

COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária

Fone:

CEP 79070-900 - Campo Grande - MS

Referência: Processo nº 23104.010186/2024-28

SEI nº 4823539

Dedico meu mestrado à minha irmã querida,
que apesar de não estar mais conosco, sempre
acreditou em mim e me apoiou em tudo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil e com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes).

Agradeço à Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul e a todos do Programa de Pós Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade, em especial à minha orientadora, Prof.^a Dra. Andrea Naguissa Yuba por todo ensinamento e paciência, aos professores Júlio Ferencz e Ana Milani pelo apoio em todas as dificuldades que eu tive ao longo do curso, aos demais professores do curso e técnicos dos laboratórios Canteiro Experimental e BATLAB - Laboratório de Inteligência Artificial, Eletrônica de Potência e Eletrônica Digital que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e me permitiram crescer como profissional e pesquisadora.

Agradeço especialmente a todos que acreditaram no meu potencial e me ajudaram a dar o próximo passo na minha carreira acadêmica.

"Ce n'est rien de mourir ; c'est affreux de ne pas vivre."

Victor Hugo.

Les Misérables, vol. 2, cap. 5, livro 9, p. 1940.

RESUMO

A utilização de resfriamento evaporativo para conservação de alimentos utilizando técnicas construtivas artesanais em terra é uma alternativa para dar mais autonomia para comunidades vulneráveis, porém são necessários estudos que comprovem a sua eficiência. Um resfriador evaporativo de adobe com capacidade para 1 tonelada de hortifruti foi desenvolvido e construído por Davalo (2021) e demandou estudos complementares de comportamento e eficiência. Assim, esta pesquisa objetivou determinar as melhores condições de funcionamento desse resfriador por meio de medições reais complementares de desempenho higrotérmico e determinar suas melhores condições de funcionamento, contribuir para aprimorar a seleção e análise do comportamento típico do resfriador, em razão das múltiplas variáveis que interferem no seu comportamento a céu aberto, analisar as influências das condições climáticas para atingir a máxima eficiência de resfriamento com o menor uso de água, além de ponderar sobre o incremento no desempenho do resfriador pelo uso de adobes na eficiência do resfriamento evaporativo. Este trabalho, de caráter experimental, envolve dados secundários (revisão de literatura) e primários (medição) com análise estatística de resultados. Foram realizados três ciclos de medição in loco, sendo que o terceiro ciclo apresentou os melhores resultados nos volumes 0l, 100l e 200l, com maior diferença de temperatura (12,1°C com 100l de rega), maior ganho de umidade (66,4% com 200l de rega) e maior eficiência de resfriamento (96,5% com 200l de rega). O volume de rega de 200l obteve resultados mais promissores entre os quatro, considerando a maior eficiência de resfriamento usando a menor quantidade de água.

Palavras-chave: segurança alimentar, eficiência térmica; comportamento térmico; higroscopicidade; terra; ZECC; armazenamento pós-colheita; resfriamento evaporativo;

ABSTRACT

The use of evaporative cooling to preserve food using artisanal construction techniques on land is an alternative to provide more autonomy for vulnerable communities, but studies are needed to prove its efficiency. An adobe evaporative cooler with a capacity for 1 ton of produce was developed and built by Davalo (2021) and required additional studies of behavior and efficiency. Thus, this research aimed to determine the best operating conditions of this cooler through complementary real measurements of hygrothermal performance and determine its best operating conditions, contributing to improving the selection and analysis of the cooler's typical behavior, due to the multiple variables that interfere with its behavior in the open air, analyze the influences of climatic conditions to achieve maximum cooling efficiency with the least use of water, in addition to considering the increase in cooler performance through the use of adobes in the efficiency of evaporative cooling. This work, of an experimental nature, involves secondary (literature review) and primary (measurement) data with statistical analysis of results. Three on-site measurement cycles were carried out, with the third cycle showing the best results in volumes 0l, 100l, and 200l, with a greater temperature difference (12.1°C with 100l of irrigation), greater humidity gain (66.4% with 200l of irrigation) and greater cooling efficiency (96.5% with 200l of irrigation). The 200l irrigation volume obtained the most promising results among the four, considering the highest cooling efficiency using the least amount of water.

Keywords: food safety, thermal efficiency; thermal behavior; hygroscopicity; Earth; ZECC; post-harvest storage; evaporative cooling;

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Mapa da fome no mundo.</i>	18
Figura 2 - Resfriador evaporativo de parede de tijolos cerâmicos para aproximadamente 100 kg baseado nos estudos de Roy.....	22
Figura 3 - Resfriador evaporativo em tijolo cerâmico coberto desenvolvido por Seweh e Darko (2016).	24
Figura 4 - Resfriador evaporativo em tijolo cerâmico construído por Dirpan et al (2018).....	25
Figura 5 - Resfriador evaporativo cerâmico desenvolvido por Birhanu e Belay (2023).....	26
Figura 6 - Resfriador do Cerrado.	30
Figura 7 - Planta baixa do Resfriador do Cerrado.	30
Figura 8 - Corte do Resfriador do Cerrado.	31
Figura 9 - Interior do resfriador do Cerrado.....	31
Figura 10 - Fachadas do Resfriador do Cerrado.	32
Figura 11 - Relação entre o calor sensível e o resfriamento evaporativo segundo a carta psicrométrica.....	36
Figura 12 - Resfriamento evaporativo direto modelo Ecobrisa.	37
Figura 13 – Sistema de resfriamento evaporativo direto.	37
Figura 14 - Resfriamento evaporativo indireto.....	38
Figura 15 – Sistema de resfriamento evaporativo indireto.	38
Figura 16 – Sistema de resfriamento evaporativo em dois estágios.	39
Figura 17 - Resfriamento evaporativo em dois estágios (indireto-direto).....	40
Figura 18 - Funcionamento esperado do Resfriador do Cerrado.....	41
Figura 19 - Elemento de solo não saturado com presença de ar.....	42
Figura 20 - Mecanismos de difusão de vapor em materiais porosos (forças de Van der Waals).	43
Figura 23 - Comparação do comportamento térmico de diferentes materiais de parede.....	47
Figura 24 - Transferência de calor e massa em materiais porosos.....	48
Figura 25 - Localização dos sensores de temperatura e umidade.	57
Figura 26 - Localização dos sensores de temperatura e umidade	57
Figura 27 - Linha do tempo do experimento.....	62
Figura 28. Análise estatística dos dados do período com 0l de rega no ciclo 1 (a e b), ciclo 2 (c e d) e ciclo 3 (e e f).	63
Figura 29 – Comportamento higrotérmico período com 0l de rega no ciclo 1 (a e b), ciclo 2 (c e d) e ciclo 3 (e e f).	65

Figura 30. Análise estatística dos dados do período com 100l de rega no ciclo 1 (a e b), ciclo 2 (c e d) e ciclo 3 (e e f).	67
Figura 31 – Comportamento higrotérmico período com 100l de rega no primeiro ciclo (a e b), segundo ciclo (c e d) e terceiro ciclo (e e f).....	69
Figura 32. Análise estatística dos dados do período com 200l de rega no ciclo 1 (a e b), ciclo 2 (c e d) e ciclo 3 (e e f).	71
Figura 33 – Comportamento higrotérmico período com 200l de rega no primeiro ciclo (a e b), segundo ciclo (c e d) e terceiro ciclo (e e f).....	73
Figura 34. Análise estatística dos dados do período com 400l de rega no ciclo 1 (a e b), ciclo 2 (c e d) e ciclo 3 (e e f).	75
Figura 35 – Comportamento higrotérmico do período com 400l de rega no primeiro ciclo (a e b), segundo ciclo (c e d) e terceiro ciclo (e e f).....	77
Figura 36 - Eficiência de resfriamento nos ciclos 1, 2 e 3 dos volumes de rega 0l, 100l, 200l e 400l.	80
Figura 37 - Características imutáveis dos resfriadores da literatura comparadas com o Resfriador do Cerrado.....	84
Figura 38 - Evento anormal de queda de temperatura.	85
Figura 39 - Evento anormal de umidade.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades térmicas do adobe	45
Tabela 2 - Comportamento térmico do adobe no verão.	46
Tabela 3 - Comportamento térmico do adobe no inverno.	46
Tabela 4 - Resfriadores encontrados na literatura.....	50
Tabela 5 - Planejamento temporal do experimento	55
Tabela 6 - Dias de medição dos dados, substituídos.....	58
Tabela 7 - Dados recorrentes nos períodos com 0l de rega.....	64
Tabela 8 - Melhores desempenhos do período com 0l de rega, nos 3 ciclos.	66
Tabela 9 - Dados recorrentes nos períodos com 100l de rega	68
Tabela 10 - Melhores desempenhos do período com 100l de rega, nos 3 ciclos.	70
Tabela 11 - Dados recorrentes nos períodos com 200l de rega.....	72
Tabela 12 - Melhores desempenhos do período com 200l de rega, nos 3 ciclos.	74
Tabela 13 - Dados recorrentes nos períodos com 400l de rega.....	76
Tabela 14 - Melhores desempenhos do período de 400l de rega, nos 3 ciclos.	77
Tabela 15 - Resultados obtidos nos ciclos 1, 2 e 3.	79
Tabela 16 – Comparação entre resfriadores evaporativos	81

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Fórmula para calcular a eficiência do resfriamento.....	49
Equação 2 - Fórmula da Capacidade Térmica	60
Equação 3 - Fórmulas de Transmitância Térmica	60
Equação 4 - Fórmula de Resistência Térmica.....	60

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
(Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento e Ventilação).

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

Fundo Monetário Internacional (FMI)

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

NBR - Norma Brasileira

ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

UFMS – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

α - Absortância à radiação solar

A – Área (m^2).

c - Calor específico – (kJ/kgK)

CT - Capacitância térmica – (KJ/m^2K)

λ - Condutividade térmica – (W/mK)

ρ - Densidade de massa aparente – (kg/m^3).

$^{\circ}C$ – Graus célsius

m^2 - Metros quadrados

m^3 - Metros cúbicos

MPa – Mega Pascal

W – Watts

R - Resistência térmica (m^2K/W).

Rsi - Resistência da superfície interna (m^2K/W).

Re - Resistência da superfície externa (m^2K/W).

Rt – Resistência térmica total de face a face. (m^2K/W).

RT – Resistência térmica total com as superfícies (m^2K/W).

T – Temperatura ($^{\circ}C$)

Tbs – Temperatura de bulbo seco ($^{\circ}C$)

Tbu – Temperatura de bulbo úmido ($^{\circ}C$)

Ttse – Temperatura externa ($^{\circ}C$)

Tbsi – Temperatura interna ($^{\circ}C$)

U - Transmitância térmica – (W/m^2K).

UR – Umidade relativa (%)

H – Entalpia (kJ/kg)

ΔT – Variação de temperatura ($^{\circ}C$)

ΔUR – Variação de umidade (%)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	2
RESUMO	4
ABSTRACT.....	5
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE TABELAS.....	8
LISTA DE EQUAÇÕES.....	9
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	10
LISTA DE SÍMBOLOS.....	11
1 Introdução.....	18
1.1 Objetivos	27
1.2 Estrutura.....	27
2 Revisão de literatura	29
2.1 O RESFRIADOR DO CERRADO	29
2.2 Resfriamento evaporativo e seus princípios físicos	35
2.3 O adobe e o conforto térmico.....	42
2.3.1 Higroscopicidade	42
2.3.2 Comportamento térmico	44
2.4 O desempenho dos resfriadores evaporativos existentes e suas medições.....	48
3 MÉTODO.....	54
3.1 Reconhecimento e definição do problema	54
3.2 Escolha das variáveis	54
3.3 Delineamento dos experimentos.....	55
3.4 Execução do experimento	56
3.5 Análise dos resultados.....	58
3.6 Pré tratamento dos dados.....	58
3.7 Análise estatística.....	59

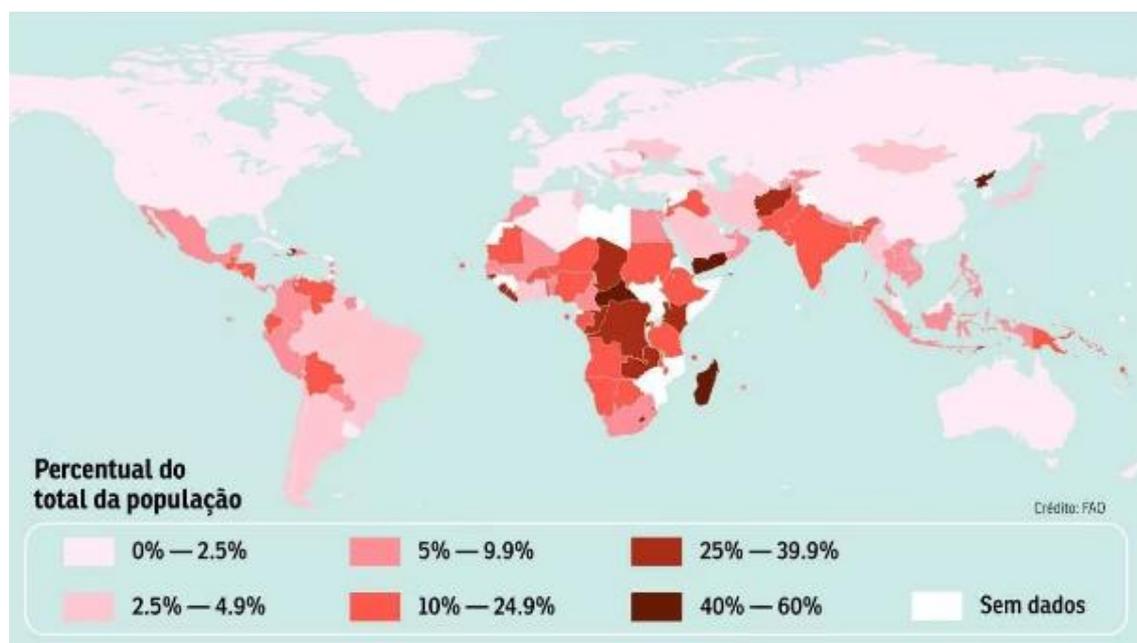
3.8	Seleção do dia típico	59
3.9	Análise de desempenho	59
4	RESULTADOS OBTIDOS.....	62
4.1	Ciclos 1 a 3, com rega de 0 litros por dia.....	62
4.2	Ciclos 1 a 3, com rega de 100 litros por dia	66
4.3	Ciclos 1 a 3, com rega de 200L por dia.....	70
4.4	Ciclos 1 a 3, com rega de 400L por dia.....	74
4.5	Análise do comportamento higrotérmico.....	79
4.6	Características térmicas imutáveis.....	82
4.7	Capacidade térmica do resfriador	82
4.8	Resistencia térmica do resfriador	82
4.9	Transmitância térmica do resfriador.....	83
4.10	Eventos anormais	85
5	Considerações finais.....	87
	REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

A situação de vulnerabilidade social em diversas comunidades de países emergentes, cuja principal fonte de subsistência é a agricultura familiar, é um problema considerado global e de difícil solução. Essa situação está ligada principalmente à fome e a insegurança alimentar que resultam dos problemas sociais e na cadeia produtiva mundial de alimentos.

A segurança alimentar foi tratada na última edição do relatório “O Estado da Insegurança Alimentar e Nutricional no Mundo”, onde estima-se que quase 690 milhões de pessoas passaram fome em 2019 (FAO, IFAD, et al., 2020). Em grande parte dos países ao sul do Equador, principalmente nos países mais pobres, cerca de 828 milhões de pessoas foram afetadas pela fome em 2022 (Figura 1). O mesmo relatório da FAO apresenta dados ainda mais alarmantes quanto aos países africanos, onde mais de 236 milhões de pessoas atualmente passam por severa insegurança alimentar, sendo considerado o continente com o maior número de pessoas afetadas pela fome.

Figura 1 - Mapa da fome no mundo.



Fonte: FAO (2022).

Além disso, as mudanças climáticas, cujos efeitos estão sendo sentidos pelo mundo todo, afetam principalmente os países menos desenvolvidos, o que diminui diretamente a produção de alimentos e pode agravar o cenário da fome nos próximos anos.

Mesmo no Brasil, cuja situação socioeconômica não se compara com a precariedade dos 100 países mais pobres do mundo segundo o Fundo Monetário Internacional (FMI), onde o Brasil é classificado

em 9º lugar em 2023, a quantidade de brasileiros que enfrentaram algum tipo de insegurança alimentar ultrapassou a marca de 60 milhões de pessoas (28% da população) em 2022 (FAO, 2023).

O combate à fome é um dos ODS da Agenda 2030 da ONU, mas o efetivo enfrentamento do problema, que é um misto de desafios ambientais, políticos, sociais e econômicos, ainda não ocorreu na escala necessária e discussões mais profundas permanecem restritas ao âmbito acadêmico, com poucas soluções práticas que podem ser adotadas em diversas realidades sociais.

Muitas das comunidades mais pobres dependem em grande parte da agricultura familiar para sua sobrevivência e vivem com recursos escassos, sem acesso à energia elétrica ou água, o que dificulta o desenvolvimento de uma cultura agrícola mais eficiente. Sendo assim, na necessidade de preparação para um cenário futuro mais agravado de vulnerabilidade dos países em desenvolvimento, é primordial uma mudança no tipo de abordagem com relação às cadeias produtivas alimentares para conseguir suprir as necessidades da população crescente nesses países (MOSSIN, STILLING, et al., 2018).

A falta de acesso a conhecimento e recursos das comunidades, agravada pela deficiência de infraestrutura de manuseio, transporte, armazenamento e comercialização, resulta em perdas pós-colheita de produtos hortícolas de quase 30%–40% em todo o mundo (RAHUL et al., 2015). Nesse cenário, enquanto países desenvolvidos utilizam o resfriamento convencional na manipulação pós-colheita de hortifrúteis perecíveis, pequenos agricultores de países em desenvolvimento ou em situação de vulnerabilidade não têm acesso ao resfriamento convencional ou à energia elétrica (AMBUKO et al., 2017).

Por “perdas”, entende-se que seja diminuição na quantidade ou na qualidade do alimento em algum dos estágios da cadeia de suprimentos, relacionadas às atividades de pós-colheita e infraestrutura de armazenamento, o que, conseqüentemente, reduz a quantidade ofertada ao consumidor final, com perda qualitativa também (CATTANEO et al., 2020).

Considerando a cadeia de suprimentos agroalimentar nos países mais pobres, os principais problemas são a perecibilidade e a baixa qualidade do produto, pois a vida útil é menor e a temperatura e ventilação têm que ser controlados no armazenamento e transporte de maneira precisa (HE et al., 2018). Na África, por exemplo, condições de temperatura de armazenamento acima do ideal, mau gerenciamento da cadeia de frio (como o pré-resfriamento) e manuseio durante o transporte são os principais contribuintes para as perdas pós-colheita nas cadeias de suprimentos de tomate (CHERONO, SIBOMANA, et al., 2018).

Alguns autores apresentam dados alarmantes sobre as perdas na cadeia agrícola em variadas partes do mundo: Lal Basediya, Samuel e Beera (2011) relatam o desperdício de cerca de 30 a 35% de frutas

e vegetais nas fases da colheita, armazenamento, classificação, transporte, embalagem e distribuição na Índia, terceiro maior produtor de frutas e legumes no mundo. Com a falta de armazenamento adequado pós-colheita, apenas 2% são aptos para o comércio e exportação.

Patel (2022) aponta que a produção de frutas e vegetais da Índia foi de 313,85 MT em 2019–2020, mas devido à falta de armazenamento adequado, os agricultores são obrigados a vender seus alimentos perecíveis localmente, logo após a colheita.

Islam e Morimoto (2011) constatam uma taxa de perda pós-colheita de 26% em Bangladesh, enquanto Ndukwu e Manuwa (2014) indicam que no sudoeste da Ásia as perdas podem variar de 10% a 50%.

Em países com clima tropical, a estocagem de produtos de hortifruti frescos depois da colheita é um dos problemas mais difíceis devido a sua alta temperatura e umidade, onde frutas e vegetais tem uma vida útil curta e são susceptíveis a apodrecer rapidamente (LAL BASEDIYA, 2011).

O desperdício de alimentos também está relacionado com as perdas derivadas da decisão de descartar alimentos que ainda têm valor (estimado em 30%) e se associa, principalmente, ao comportamento dos maiores e menores vendedores, serviços de venda de comida e consumidores. FAO (2011)

Cerca de 1,3 bilhões de toneladas de alimentos são desperdiçados ao ano em nosso planeta, o que representa, em área agrícola, o equivalente à soma dos territórios do Canadá e da Índia. Em números, a perda e desperdícios de alimentos causam um prejuízo em torno de US\$ 2,6 trilhões por ano, valor que corresponde ao PIB do Reino Unido (FAO apud SANTOS, 2022).

Jedermann et al. (2014) apontam que para minimizar as perdas e desperdícios de alimentos, presentes em todas as etapas da cadeia de suprimentos - produção, colheita, beneficiamento, transporte e abastecimento - é necessário entender o conjunto de operações e, posteriormente, implementar novas tecnologias, otimizando seu manuseio.

Para alimentos perecíveis (principalmente frutas, verduras e legumes), um dos parâmetros cruciais para diminuir as perdas e desperdícios é a temperatura. Por se tratar de produtos frescos que contêm elementos vivos, estes continuam seus processos fisiológicos após a colheita. Assim, o controle da temperatura consegue reduzir sua atividade metabólica, retardando o processo de maturação, a perda de água, e a atividade dos microrganismos, diminuindo as perdas e conservando a qualidade do produto (MERCIER et al., 2017). De acordo com Anami (2019), frutos colhidos e que são resfriados imediatamente apresentaram menores valores de incidência e severidade de podridões, mostrando a importância de ter-se um armazenamento imediato, de pelo menos 6 horas após a colheita.

Assim, as múltiplas causas das perdas de alimentos em diversas etapas da cadeia produtiva tornam o problema difícil de ser solucionado, principalmente se tratando de comunidades com baixo acesso a insumos primordiais. Entretanto, diversos autores tratam de pesquisas de técnicas construtivas mais sustentáveis que visam diminuir essas perdas, utilizando poucos recursos e reduzindo o impacto ambiental.

Na área do ambiente construído, o conforto ambiental, que envolve o conforto térmico, a adequação do edifício ao clima local e o comportamento dos materiais de construção pode ser explorado para amenizar esses danos, juntamente com a eficiência energética das edificações (FERRAZ JUNIOR, 1995).

Com esse propósito, a ONU valoriza novos componentes e soluções que diminuam o uso de recursos naturais não renováveis e enfatizem os materiais locais (NDUKWU; MANUWA, 2014; SOPONPONGPIPAT; KOSITCHAIMONGKOL, 2011). Com o intuito de desenvolver a comunidade afetada como um todo e contribuir com a sustentabilidade social, há que se considerar as necessidades dos cidadãos envolvidos desde os estágios iniciais de planejamento da tecnologia, e todas as partes interessadas devem ser envolvidas no processo (MOSSIN, STILLING, *et al.*, 2018).

Em muitas dessas comunidades faltam estruturas e insumos básicos, como materiais e energia elétrica, por isso a instalação de tecnologias adaptadas, que possam ser desenvolvidas/reproduzidas pela própria população e ensinadas para outros pode contribuir proporcionando uma melhoria na qualidade de vida da população e diminuir a dependência de países desenvolvidos fornecedores de insumos. Esse tipo de tecnologia precisa ser simples, de pequena escala, de baixo custo e que substitua a tecnologia pela mão de obra intensiva.

Apesar de sua conveniência, o uso de resfriadores evaporativos apresenta desafios inerentes à sua aplicação, de acordo com Lal Basediya (2011), tais como:

- viabilidade de utilização para a estocagem de determinados hortifrutis;
- necessidade de preparar combinações específicas de hortifrutis;
- dependência da umidade relativa do ar no local;
- necessidade de água para a rega do resfriador para melhor desempenho;
- necessidade de diferentes percentuais de umidade e temperatura para diferentes tipos de alimentos;
- necessita controle de propagação de fungos e bactérias;

Buscando soluções para atender essas comunidades, resfriadores evaporativos já foram idealizados por diversos autores. Segundo Ambuko (2017) e Islam (2012), as câmaras de resfriamento evaporativo são equipamentos viáveis para a conservação de hortifrutis em comunidades socialmente vulneráveis

que têm sua subsistência baseada na agricultura, pois trata-se de um equipamento ambientalmente não nocivo com a finalidade de estocagem de alimentos independente de energia elétrica, criando assim condições ideais para a conservação dos alimentos por períodos maiores se comparados aos mesmos *in natura*.

Os resfriadores evaporativos são compostos por uma parede feita com material poroso que retém água pelo qual o ar pode fluir. São equipamentos que podem ser construídos utilizando mão de obra e materiais locais e técnicas construtivas de fácil acesso. O uso dos princípios do resfriamento por evaporação permite às câmaras resfriadoras manter temperaturas internas abaixo da temperatura ambiente e com umidade elevada dependendo da estação (LAL BASEDIYA; SAMUEL; BEERA, 2011). Além disso, sua utilização se torna vantajosa ao agricultor em áreas de vulnerabilidade pois proporcionam desenvolvimento local e independência a essas comunidades.

Assim, sua elegibilidade para a conservação de alimentos em comunidades socialmente vulneráveis tem sido amplamente estudada, por ser uma alternativa para o armazenamento de hortifruti com controle de temperatura e umidade, visando aumentar o tempo de estocagem de produtos agrícolas (JHA; CHOPRA, 2006; DADHICH, et al., 2008; ODESOLA; ONYEBUCHI, 2009, ISLAM E MORIMOTO, 2011; apud REMPEL; REMPEL, 2016, SEWEH e Darko, 2016; YAN et al, 2021).

O modelo mais conhecido é o “ZECC”, ou *zero energy cool chamber* (Figura 2), que tem autoria atribuída a S. K. Roy, cujo projeto e idealização tem como objetivo favorecer as necessidades de pequenos agricultores presentes na Índia e que não possuem acesso à energia elétrica.

Figura 2 - Resfriador evaporativo de parede de tijolos cerâmicos para aproximadamente 100 kg baseado nos estudos de Roy.



Fonte: Islam e Morimoto (2015).

O modelo consiste em paredes duplas de alvenaria, preenchidas com areia e irrigadas com água periodicamente. O resfriador tem uma tampa para permitir a ventilação e evaporação. Roy elaborou diversos estudos sobre o tema, sendo experimentada em campo não só na Índia, mas em outros países como Bangladesh, Nigéria, Gana e demais regiões da África Subsaariana e sul da Ásia, utilizando

diferentes capacidades de armazenamento (de 50kg a 1 tonelada) e diversos materiais e técnicas construtivas de baixo custo.

Alguns dos pesquisadores que desenvolveram conteúdo experimental sobre câmaras de resfriamento evaporativo e suas origens foram abordados por Davalo (2021), que realizou uma revisão de literatura sobre os diferentes tipos de resfriadores existentes e suas características construtivas para desenvolver um resfriador evaporativo inédito para atender comunidades vulneráveis.

Nesta revisão de literatura, os estudos abordados foram agrupados de acordo com o modelo utilizado por eles, que variam desde os mais simples até os que agregam tecnologias mais complexas.

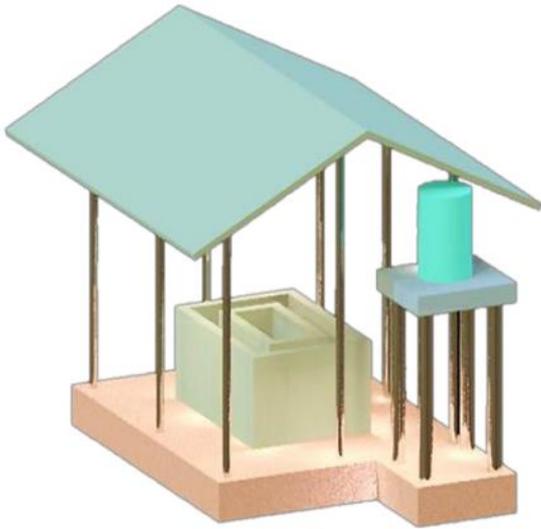
Os principais autores têm seus modelos baseados no modelo de Roy, como os desenvolvidos por Singh et al. (2010); Abano et al. (2011); Kulkarni e Rajput (2013); Islam e Morimoto (2014, para estudos de laboratório com temperatura ambiente e velocidade de vento controladas, além de avaliar a durabilidade e perecibilidade dos alimentos armazenados neles. Também foram exploradas câmaras semienterradas (ISLAM, MORIMOTO e HATOU, 2012), com parede de placa de rocha porosa (ISLAM e MORIMOTO, 2014) e utilização de placas de energia solar para gerar energia auxiliar no sistema e potencializar seu desempenho (ISLAM e MORIMOTO, 2014).

Também baseado no modelo de Roy, porém agregando novas tecnologias, Rempel e Rempel (2016) utilizaram um sistema de fluxo de ar controlado em laboratório de diversas potências, utilizando tecnologias como sprinklers para a umidificação do sistema de forma computadorizada a fim de aumentar a eficiência de resfriamento de forma previsível e assim potencializar a eficiência

Outros modelos não abordados por Davalo (2021), mas que obtiveram resultados significativos são de:

- Seweh e Darko (2016): com proteção solar e a permeabilidade de ar para o resfriamento do resfriador baseado no modelo de Roy, construído em tijolos cerâmicos e com cobertura de palha umedecida abastecida por um sistema de caixa d'água (Figura 3). Esse modelo, apesar de utilizar tecnologia relativamente barata, ilustra um investimento grande com a estrutura utilizada na cobertura e no reservatório de água, o que possivelmente acarretaria um custo elevado para ser replicado em outras comunidades.

Figura 3 - Resfriador evaporativo em tijolo cerâmico coberto desenvolvido por Seweh e Darko (2016).



Fonte: Seweh e Darko (2016).

- Yanhua et al. (2017): utilizou simulações numéricas de temperatura e umidade do modelo de resfriador evaporativo em tijolos cerâmicos coberto com palha e semienterrado, baseado nos estudos de Islam e Morimoto (2014), a fim de determinar as possíveis mudanças no desempenho do seu próprio resfriador, ainda em fase de projeto. Após as simulações foi estipulado que a transferência de temperatura está diretamente relacionada à espessura do colchão úmido, sendo realizadas poucas alterações no design original.
- Kim et al. (2018) desenvolveram estudos utilizando materiais reciclados derivados do plástico, com fluxo de ar controlado em laboratório e recirculação de água. Apesar da intenção de utilizar menos água que outros modelos, os próprios autores apontam que essa solução pode levar ao acúmulo de contaminação microbiana e causar doenças respiratórias. Assim, esse modelo também se mostrou de difícil reprodução em comunidades com baixo acesso à insumos tecnológicos.
- Dirpan et al (2018) seguiram os estudos de Roy, Islam e Morimoto (2014) avaliando a perecibilidade de frutas tropicais (manga) em um resfriador evaporativo de tijolo cerâmico baseado no modelo do ZECC de Roy (Figura 4), comparando os resultados com frutos armazenados em temperatura ambiente e em um refrigerador comercial, atestando que o resfriador permite maior durabilidade comparado com o armazenamento ao ar livre, porém com menor eficiência se comparado ao comercial que utiliza energia elétrica.

Figura 4 - Resfriador evaporativo em tijolo cerâmico construído por Dirpan et al (2018).



Fonte: Dirpan et al (2018).

- De Antonellis et al (2020) empregaram tecnologias de direcionamento de fluxo de ar e controle do fluxo de água para aumentar o desempenho de um resfriador evaporativo indireto (ver item 2.2), estudando como a variação da forma e a intensidade do ar utilizados podem contribuir para o desempenho de um modelo de resfriador comercial metálico.
- Com o intuito de atender comunidades com pouco acesso à insumos elaborados, Birhanu e Belay (2023) desenvolveram um estudo voltado à preservação de uma comida típica da Etiópia chamada “Injera” em um resfriador evaporativo de escala individual feito em cerâmica (Figura 5), com o intuito de atender individualmente as famílias em situação de vulnerabilidade. Apesar dos resultados encontrados que permitiram o armazenamento do alimento por 9 dias sem apresentar deterioração, a solução atende apenas a microescala, não permitindo o desenvolvimento dos produtores agrícolas no campo comercial.

Figura 5 - Resfriador evaporativo cerâmico desenvolvido por Birhanu e Belay (2023).



Fonte: Birhanu e Belay (2023).

- Silva e Pinheiro (2018), instalaram uma estação meteorológica Vantage Pro2 Plus™ da marca Davis Instruments no ambiente externo da edificação de adobe e sete sensores HOBO H8 RH/Temp Loggers da marca Onset no ambiente interno, distribuídos nos cômodos da construção de 45m² de área e 135m³ de volume. A Estação foi acoplada a cerca de 3 metros de altura. Os dados coletados no lado externo foram comparados com aqueles verificados no ambiente interno, para avaliar o comportamento higrotérmico da construção monitorada (SILVA, PINHEIRO, 2018).

Desde 2019, ano de execução do resfriador elaborado por Davalo, até 2023, não foram identificados outros estudos na literatura de desenvolvimento e aprimoramento de resfriadores de grande capacidade feitos em terra crua, cuja reprodução possa ser feita pela própria comunidade de forma autônoma.

Davalo (2021) projetou, construiu e analisou o desempenho de um resfriador evaporativo em escala real para atendimento às condições restritivas de agricultores em locais remotos, denominado Resfriador do Cerrado (ver item 2.1 da revisão de literatura). A câmara usa paredes duplas de adobe, preenchidas de areia úmida para induzir a ocorrência do resfriamento evaporativo e nele foram realizados testes iniciais de desempenho no estado seco e úmido, com diferentes volumes de água. Os resultados mostraram dados promissores, mas ainda demandam estudos complementares mais aprofundados para comprovar seu bom desempenho.

Tendo em vista a continuidade do estudo idealizou-se este estudo, baseado em experimentos mais prolongados do resfriador em períodos diferentes e a análise higrotérmica para verificar a eficiência do equipamento em diversas condições meteorológicas.

1.1 Objetivos

O **objetivo geral** é avaliar o desempenho térmico do resfriador do Cerrado, tendo como **objetivos específicos**:

- Contribuir para aprimorar a seleção e análise do comportamento típico do resfriador, em razão das múltiplas variáveis que interferem no seu comportamento a céu aberto.
- Analisar as influências das condições climáticas para atingir a máxima eficiência de resfriamento com o menor uso de água.
- Ponderar sobre o incremento no desempenho do resfriador pelo uso de adobes.

1.2 Estrutura

A estrutura do trabalho contém os seguintes itens:

- **Introdução:** apresenta a relevância do problema da insegurança alimentar nas comunidades vulneráveis, introduzindo a utilização de resfriadores evaporativos para a conservação de alimentos como uma forma de mitigar as perdas na cadeia produtiva de hortifruti. São apresentados os objetivos da pesquisa, direcionados para o diagnóstico do comportamento higrotérmico do resfriador do Cerrado. Faz um panorama da situação atual e a importância de estudos que apresentem soluções para problemas sociais de difícil resolução.
- **Revisão de literatura:** Apresenta o alvo dos estudos, o Resfriador do Cerrado e seu funcionamento, incluindo os princípios do resfriamento evaporativo, sua utilidade em comunidades sem acesso à energia elétrica. Também explora as características das construções feitas de terra e suas vantagens no conforto térmico das edificações, assim como o seu uso em projetos de resfriadores evaporativos. São apresentados também os principais elementos necessários para o entendimento do comportamento higrotérmico da construção. Caracteriza o estado da arte que existe atualmente e permite a compreensão de diversos aspectos físico-químicos responsáveis pelos fenômenos apresentados no estudo.
- **Materiais e métodos:** É apresentada a metodologia e planejamento experimental dos três ciclos executados neste trabalho, e descrevendo os parâmetros medidos e calculados para a caracterização do comportamento higrotérmico do resfriador. Permite entender as diferenças

do experimento em relação ao trabalho de Davalo (2021) e as escolhas metodológicas para determinar cada variável do estudo.

- Resultados obtidos: são analisados os dados obtidos durante o experimento, a influência do clima nas variáveis medidas, assim como o desempenho térmico do resfriador. Por fim, são comparados os resultados obtidos com os encontrados por diversos autores da literatura. Pondera-se sobre a influência de cada variável no sistema, assim como indica possíveis estudos futuros que englobariam aspectos não abordados.
- Considerações finais: Definida a capacidade de atendimento do resfriador, são apresentadas as conclusões do estudo sobre as melhores condições de funcionamento, comparando-as com a literatura e estabelecendo ponderações para lacunas não preenchidas que podem ser exploradas por trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura deste estudo está organizada em quatro partes: a descrição do Resfriador do Cerrado (Figura 6); os princípios do resfriamento evaporativo; as construções em adobe e o conforto ambiental e o desempenho higrotérmico dos resfriadores estudados até então. A escolha por iniciar a revisão de literatura com a apresentação do objeto de estudo do experimento se deve ao fato dele já estar concluído anteriormente a este estudo, com autoria de Davalo (2021). Desse modo, sua caracterização permite o melhor entendimento da revisão realizada e das comparações com modelos de resfriadores evaporativos estudados.

2.1 O RESFRIADOR DO CERRADO

Em 2019, Davalo concebeu um resfriador evaporativo em tamanho real e exposto às intempéries, chamado de Resfriador do Cerrado. O trabalho de mestrado objetivou projetar, construir e analisar o desempenho do resfriador para atendimento às condições restritivas de agricultores em locais remotos.

Os princípios adotados para a concepção do resfriador foram:

- usar massivamente recursos naturais, com mínimo processamento;
- garantir durabilidade a todos os materiais utilizados, especialmente os que estão sujeitos às intempéries;
- usar sistemas construtivos vernaculares, por serem familiares às comunidades e de mais fácil entendimento.

Uma vez que foram estudadas as condicionantes locais e sociais, as soluções técnicas adotadas se adequaram ao produto, de forma a internalizar conhecimento empírico da comunidade-alvo, mesclando-a com o conhecimento técnico.

O resfriador proposto utiliza paredes duplas de adobes, preenchidas com areia úmida e uma cobertura metálica simples. O colchão de areia úmida induz a ocorrência do resfriamento evaporativo, liberando umidade para o interior da câmara, através das paredes porosas de adobe. Os hortifrúteis podem ser armazenados empilhados no chão ou em prateleiras no interior da câmara. O ar entra por uma abertura sob a porta da câmara e percorre o ambiente, perpassando os produtos armazenados. A exaustão do ar aquecido é feita pelo teto da câmara, pois sob a cobertura metálica, que tem a função de proteger da insolação direta, há um forro de material plástico em forma de coifa. O centro da coifa é uma chaminé que recorta o telhado metálico e permite a saída do ar quente para fora da câmara.

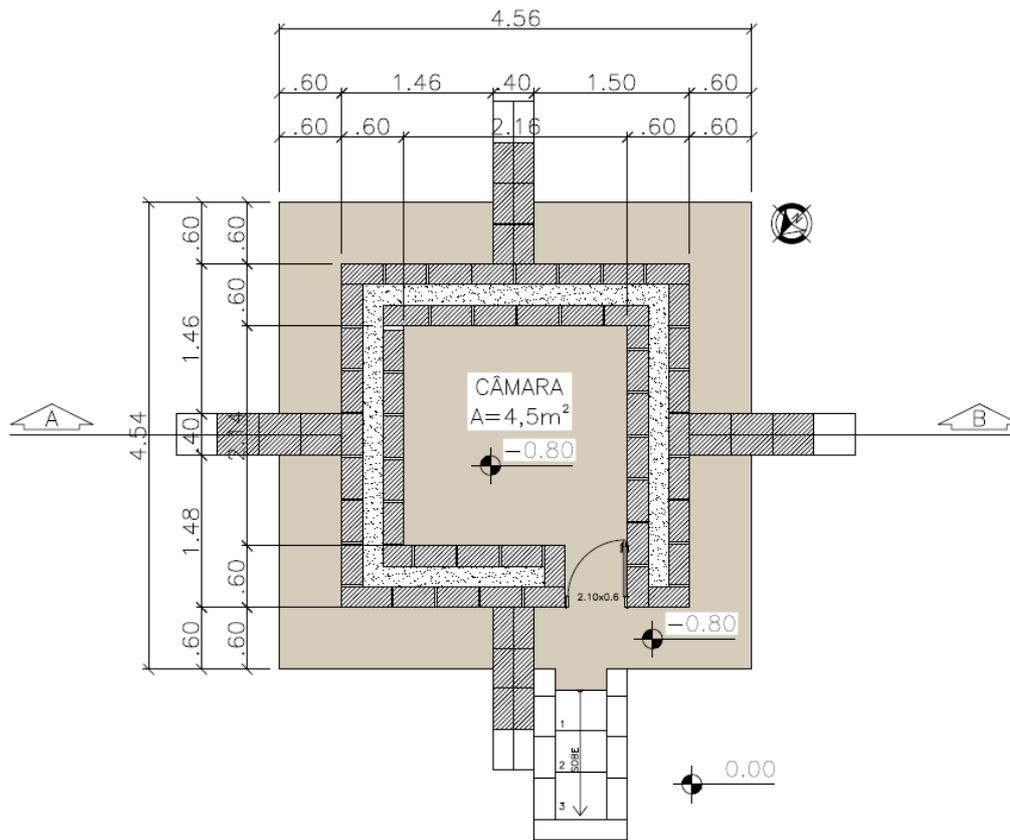
Para evitar o uso de armadura metálica e conter o empuxo da areia, foram construídos contrafortes de adobe (exterior) e fincadas tábuas largas de madeira (interior).

Figura 6 - Resfriador do Cerrado.



Fonte: Autora.

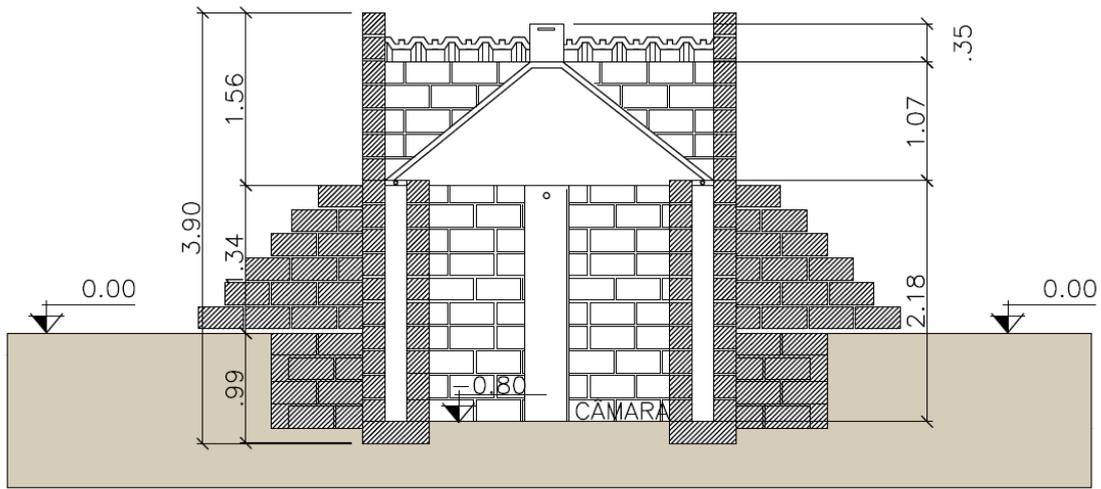
Figura 7 - Planta baixa do Resfriador do Cerrado.



PLANTA

Fonte: Autora.

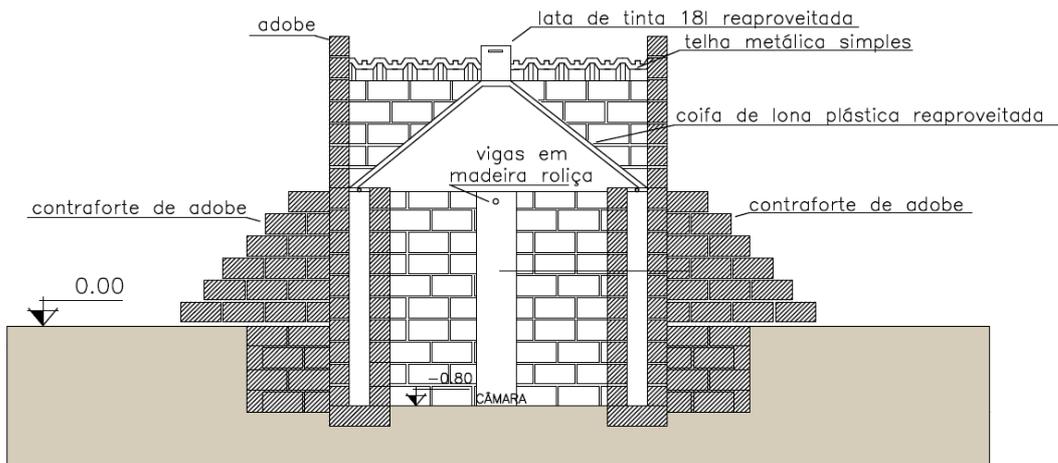
Figura 8 - Corte do Resfriador do Cerrado.



CORTE AB

Fonte: Autora.

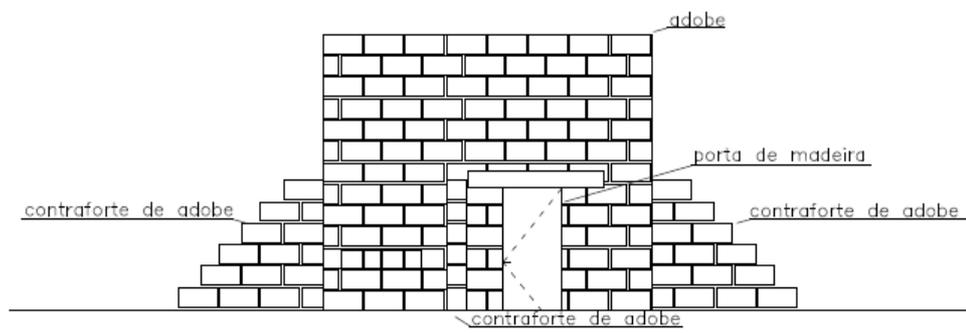
Figura 9 - Interior do resfriador do Cerrado



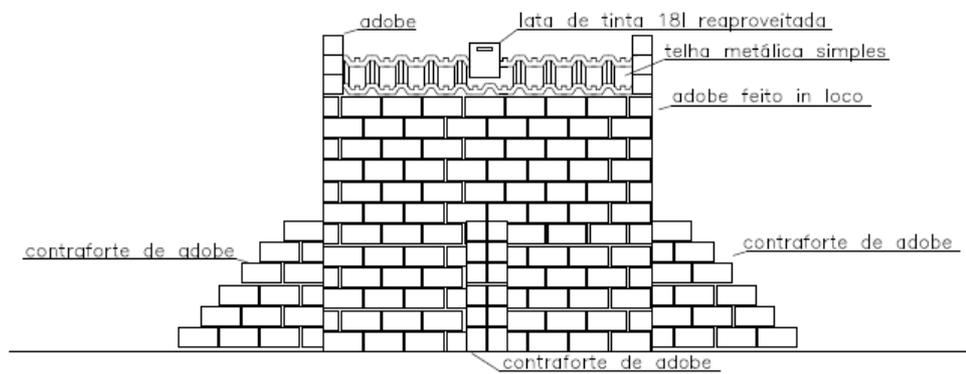
INTERIOR

Fonte: Autora.

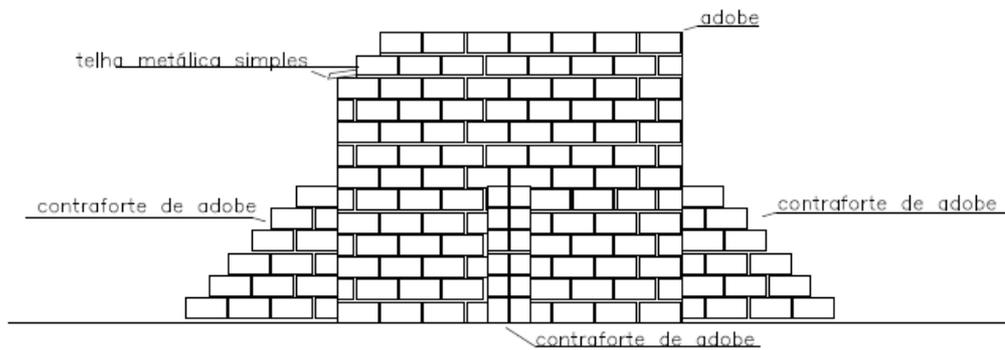
Figura 10 - Fachadas do Resfriador do Cerrado.



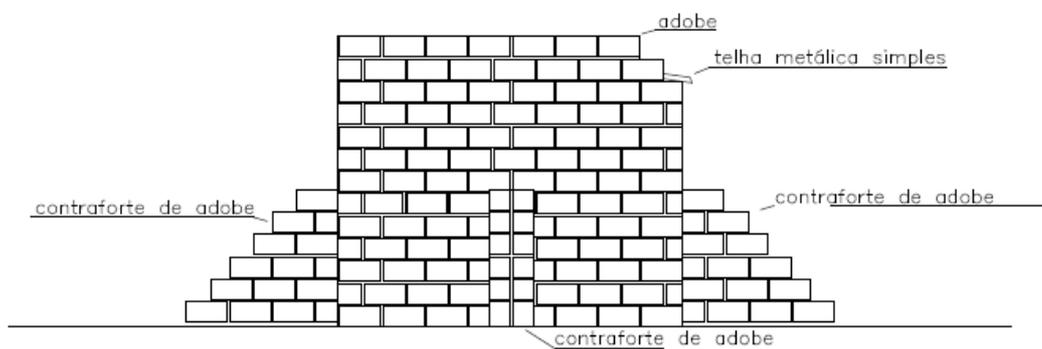
FACHADA FRONTAL



FACHADA POSTERIOR



FACHADA LATERAL ESQUERDA



FACHADA LATERAL DIREITA

Fonte: Autora.

Todos os materiais têm uma ou mais das seguintes características:

- produzido no local da obra
- facilmente encontrado no comércio varejista local
- material de reaproveitamento

O resfriador foi construído no campus da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, em Campo Grande, na latitude -20,5068046 e longitude -54,6162555. Está cercado por uma reserva particular de

patrimônio natural (RPPN) de 50,11 hectares, com vegetação de cerrado (num raio de 10 m) e dista 250 m de um corpo d'água (Lago do Amor).

Ressalta-se que o protótipo do produto foi construído em Campo Grande pelas condições facilitadas de medição, mas destina-se ao uso em comunidades remotas e sem acesso à energia elétrica. Por isso a análise de eficiência é fator crucial para determinar o seu desempenho (mais do que a temperatura), pois era sabido que as condições ambientais nas quais foi construído não são as ideais para obter o seu máximo desempenho.

No protótipo foram realizados testes iniciais de desempenho no estado seco e úmido, com diferentes volumes de água. Os estudos de Davalo foram realizados com o resfriador vazio e não englobou testes de longevidade de hortaliças. A autora coletou dados de temperatura e umidade, com resultados promissores de desempenho. Mas como tratou-se de um ciclo de medição e com perda de dados, houve prejuízo para a realização de uma análise aprofundada e conclusiva. Dados de vento e radiação solar não fizeram parte do estudo dessa autora.

A escolha do adobe como material de construção deve-se ao intuito de viabilizar a implantação desse tipo de equipamento em comunidades remotas e tradicionais. Uma vez que a produção e o transporte dos materiais de construção são responsáveis por parte da poluição emitida pela indústria, (JOHN, 2017). o uso de solo local tem o intuito de evitar o impacto ambiental causado pelo transporte de materiais, além de ser um recurso barato e em abundância.

O Resfriador do Cerrado tem um espaço de armazenamento de 4,5m² de área e 17,1m³ de volume. Davalo (2021) realizou testes usando 40 a 800 litros de água/dia com duração de 15 dias para cada volume de água. Os resultados encontrados mostram uma redução de temperatura de 13,24 graus abaixo da temperatura ambiente.

Dado que o protótipo está exposto aos intemperismos naturais, foi constatado que as perturbações causadas por mudanças abruptas de temperatura (por chuva, por exemplo) demandavam um período maior do que 15 dias para acomodação e retomada das medições. Também, os resultados obtidos com os volumes de 40 litros/dia e 800 litros/dia não mostraram contribuições significativas, além de representar um consumo de água questionável para regiões secas, no caso do último. Por fim, a contribuição do comportamento dos materiais terrosos na eficiência de resfriamento da câmara não foi explorada.

Tais dados motivaram a elaboração de novo plano de rega, com menos variação de volumes de água e períodos mais prolongados para cada volume (ver item Método).

2.2 Resfriamento evaporativo e seus princípios físicos

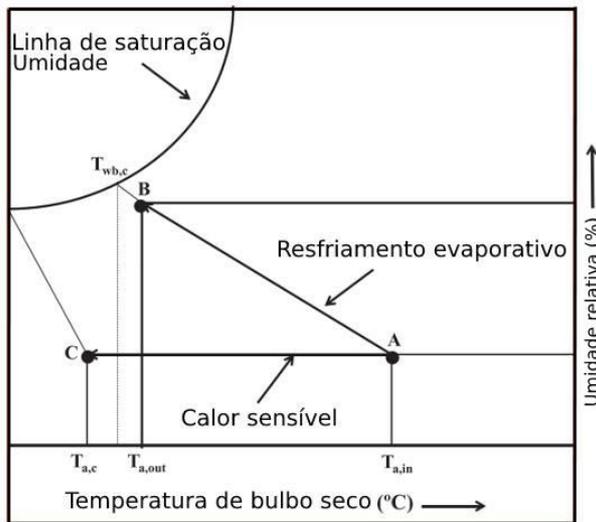
A utilização de resfriamento evaporativo é uma das mais antigas e mais eficientes maneiras de se resfriar de forma passiva as edificações em climas secos. Watt (1963) realizou a primeira análise rigorosa dos sistemas evaporativos direto e indireto, enumerando suas vantagens e desvantagens, indicando suas aplicações e estabelecendo considerações sobre o projeto. Pode-se dizer que, a partir de seus trabalhos, o resfriamento evaporativo começou a ser investigado cientificamente.

Segundo Kulkarni e Rajput (2013) e Kim et al. (2018), a utilização do processo termodinâmico de resfriamento evaporativo (ou saturação adiabática de ar) consiste na evaporação da água, que retira calor do ambiente ou de determinado material sobre o qual a evaporação acontece naturalmente utilizando essa energia (aproximadamente 2260 kJ/kg) para fazer a transição da água do estado líquido para vapor (AMBUKO, WANJIRU, *et al.*, 2017, REMPEL, REMPEL, 2016).

As trocas térmicas que advêm de mudança de estado de agregação da água, do estado líquido para o estado de vapor e do estado de vapor para o estado líquido, são denominadas trocas úmidas, cujos mecanismos são evaporação e condensação. A evaporação necessita de um certo dispêndio de energia (FROTA, 2001).

Assim como apresentado na carta psicrométrica adaptada de PATEL (2022) na Figura 11, o resfriamento evaporativo ocorre quando a conversão de calor sensível em calor latente realiza o resfriamento do ar circundante (Li et al., 2014). Seguindo a leitura da carta psicrométrica, conforme a temperatura de bulbo seco do ar externo aumenta (A) e a umidade do ar diminui (B), a área do triângulo do resfriamento evaporativo aumenta, uma vez que está relacionada ao calor sensível do ar (C), até chegar ao seu limite estabelecido pela linha de saturação, quando a umidade atinge a saturação máxima e a temperatura alcança a temperatura de bulbo úmido.

Figura 11 - Relação entre o calor sensível e o resfriamento evaporativo segundo a carta psicrométrica.



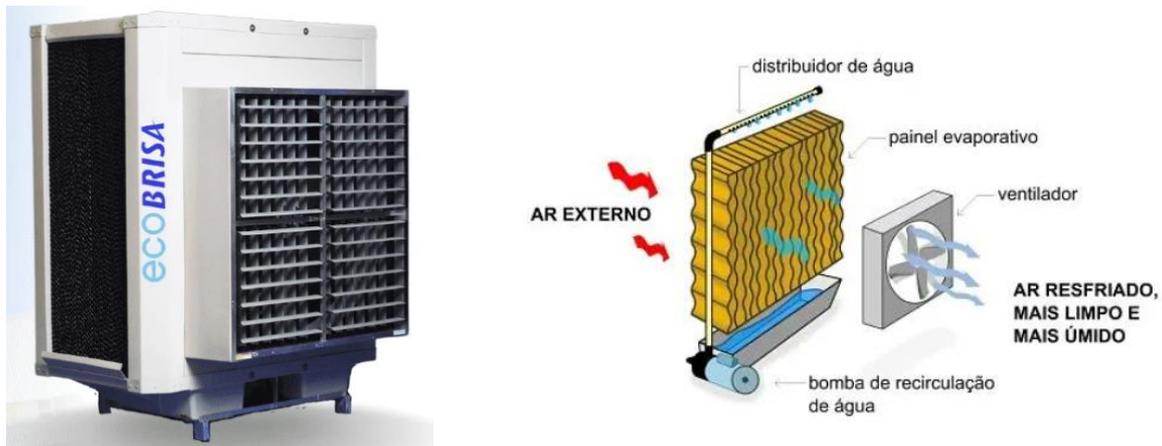
Fonte: Adaptado de PATEL (2022).

Os processos de resfriamento evaporativo, apesar de utilizarem tecnologia relativamente simples, são ainda muito pouco utilizados em regiões de clima tropical, como no Brasil (CAMARGO, 2003). Os fluidos de trabalho são o ar e a água e a principal característica é ser mais eficiente quando as temperaturas são mais elevadas. Além disso, em regiões secas, o aumento da umidade é benéfico e proporciona melhor qualidade do ar.

Considerando a interação desses fatores, a velocidade de evaporação é função do estado higrométrico do ar. A uma determinada temperatura, o ar tem capacidade de conter apenas uma certa quantidade de vapor d'água, inferior ou igual a um valor máximo denominado vapor saturante. Portanto, o grau higrométrico é a relação entre o peso de vapor d'água contido no ar, a uma certa temperatura, e o peso de vapor saturante do ar à mesma temperatura (FROTA, 2001).

Divididos de acordo com o tipo do seu funcionamento, os sistemas de resfriamento evaporativo existentes podem ser classificados em três categorias: direto (RED), indireto (REI) ou em dois estágios (indireto-direto). O sistema de resfriamento evaporativo direto (RED) utiliza tipicamente a água, em contato com o ar umidificado (Figura 12), enquanto o sistema de resfriamento evaporativo indireto (REI) mantém o objeto a ser resfriado fora do contato com o ar umidificado (Figura 14), proporcionando a troca de calor através de um sistema intermediário (SILVA, 2004).

Figura 12 - Resfriamento evaporativo direto modelo Ecobrisa.



Fonte: Ecobrisa. Disponível em: < <https://www.tecnoventi.com.br/> > Acesso em 16/04/2024.

No sistema RED, o ar cede diretamente 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), como por exemplo o uso de microaspersão em armazenamento de hortifruti. Este é um processo adiabático onde o ar quente e seco é reciclado para resfriar o ar úmido (Figura 13) e sua eficiência varia de 55% a 70% (ODESOLA; ONYEBUCHI, 2009).

Figura 13 – Sistema de resfriamento evaporativo direto.



Fonte: Adaptado de PATEL (2022).

O Resfriamento Evaporativo Indireto (REI), como é o caso do ZECC projetado por Roy (Figura 14) caracterizado pela umidificação de componentes da construção sem haver saturação da umidade do ar 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).

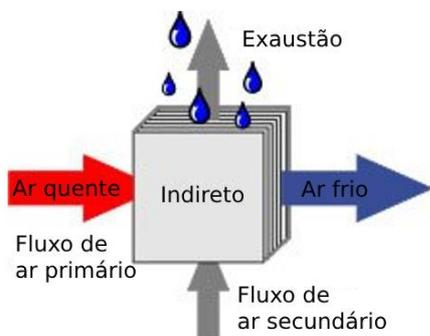
Figura 14 - Resfriamento evaporativo indireto.



Fonte: World vegetable center (2016).

Esse processo resfria o ar seco com ar frio e úmido produzido pela evaporação, e o ar de baixa temperatura resultante é jogado para resfriar um ambiente fechado (câmara com exaustão de ar) (Figura 15). Assim, ao adicionar a quantidade ideal de água no colchão úmido entre as paredes do resfriador, é possível intensificar o efeito de resfriamento sem aumentar a umidade relativa do ar interno.

Figura 15 – Sistema de resfriamento evaporativo indireto.

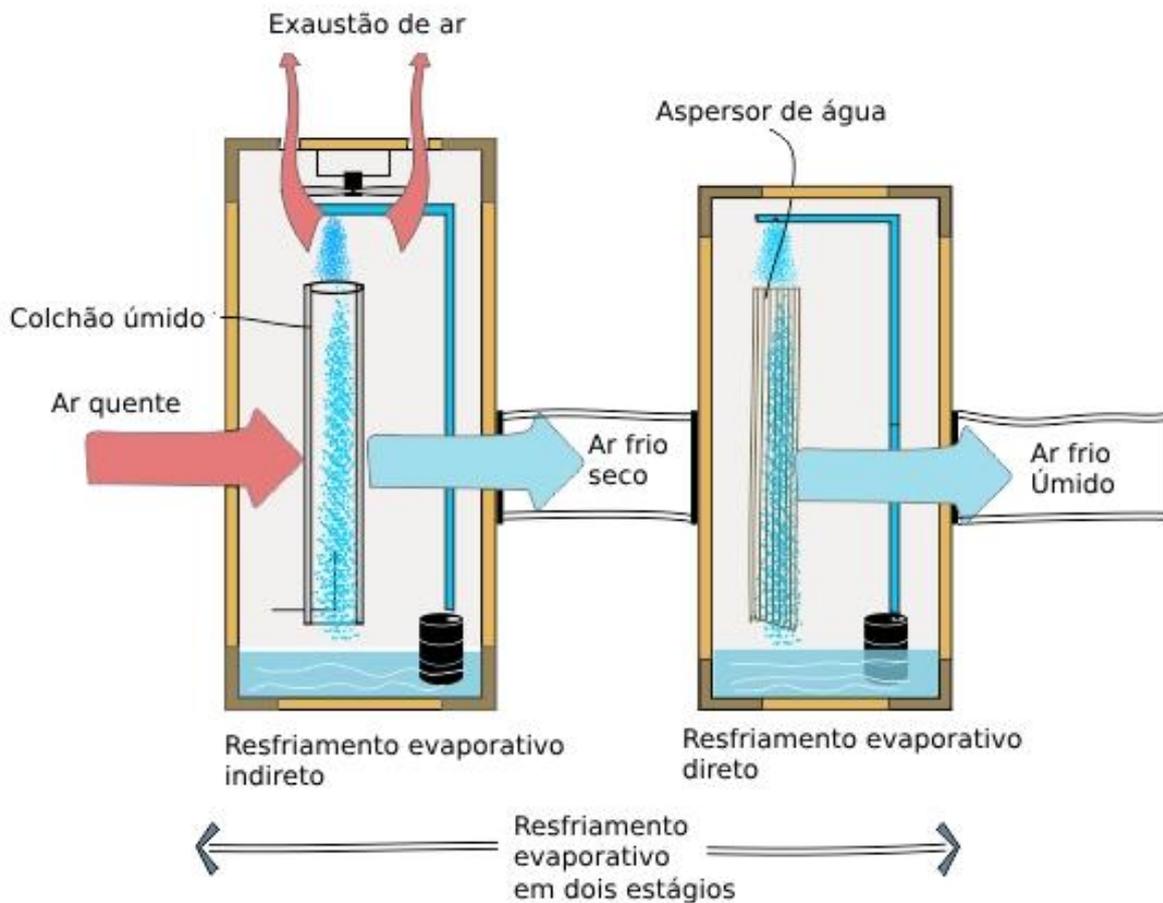


Fonte: Adaptado de PATEL (2022).

A utilização deste sistema deve ser feita em colchão úmido separado do ambiente ou em concordância com os sistemas de exaustão zenital, pois a velocidade do ar que sai é responsável pelo aumento da velocidade de evaporação por convecção. Por consequência, a efetividade do sistema indireto é cerca de 75%, porém, segundo LAL BASEDIYA; SAMUEL; BEERA (2011) requer o uso de energia elétrica para

promover a circulação forçada de água e ar. O resfriamento do ar é obtido pela circulação contínua de água sobre o colchão úmido e apesar de sua operação simples, o material utilizado na camada intermediária das paredes pode gerar estagnação da água na parede, limitando sua capacidade de resfriamento (ABARANJI, PANCHABIKESAN, *et al.*, 2020).

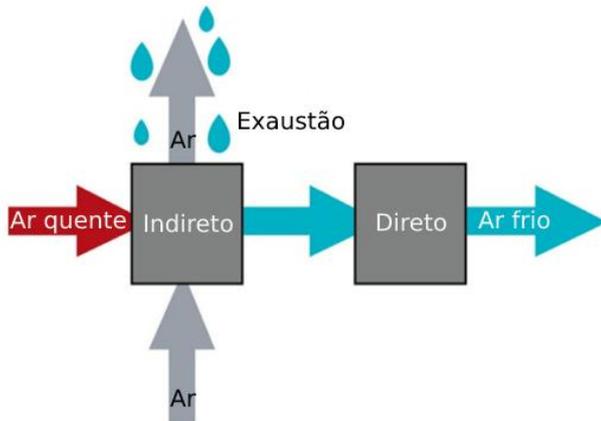
Figura 16 – Sistema de resfriamento evaporativo em dois estágios.



Fonte: Adaptado de USAID (2020).

Por fim, existe a possibilidade de um sistema misto (Figura 16). O sistema de resfriamento evaporativo em 2 estágios é composto de um sistema indireto seguido de um direto (Figura 17), no qual o ar é resfriado primeiramente pelo sistema indireto para então ser encaminhado ao sistema direto e, com o acréscimo de umidade proporcionado por ele, reduzir sua temperatura em níveis maiores que os sistemas simples conseguiriam realizar. Esse sistema pode alcançar de 100 a 115% de eficiência de resfriamento, reduzindo a temperatura abaixo da temperatura externa de bulbo úmido em climas áridos e temperatura externa alta (LAL BASEDIYA; SAMUEL; BEERA, 2011).

Figura 17 - Resfriamento evaporativo em dois estágios (indireto-direto).



Fonte: Adaptado de PATEL (2022).

No entanto, estudos indicam que os sistemas de resfriamento evaporativo de dois estágios podem não ser adequados para todos os climas ou ambientes, pois funcionam melhor em climas secos com baixos níveis de umidade. Em áreas com altos níveis de umidade, o efeito de resfriamento pode ser limitado e pode resultar em até mesmo condensação da água no edifício (MOH, JIN et al., 2023)

O grau de resfriamento de um sistema é determinado pela velocidade da evaporação, sendo assim, a taxa de evaporação em um espaço aberto será mais rápida quanto maior a área superficial da água e a velocidade do ar e menor for a umidade relativa do ar. Se o ar se torna saturado, o processo de evaporação cessa e conseqüentemente cessa a queda de temperatura. Portanto, quanto mais seco for o clima, maior será a aplicabilidade de tais sistemas.

Da Ponte (2012) alerta que em zonas climáticas temperadas e frias, onde o vapor de água procura atravessar a parede de dentro para fora da edificação, pode ocorrer a condensação deste vapor no interior da parede, levando à redução da capacidade de isolamento térmico e da resistência mecânica, além da possibilidade de aparecimento de mofo.

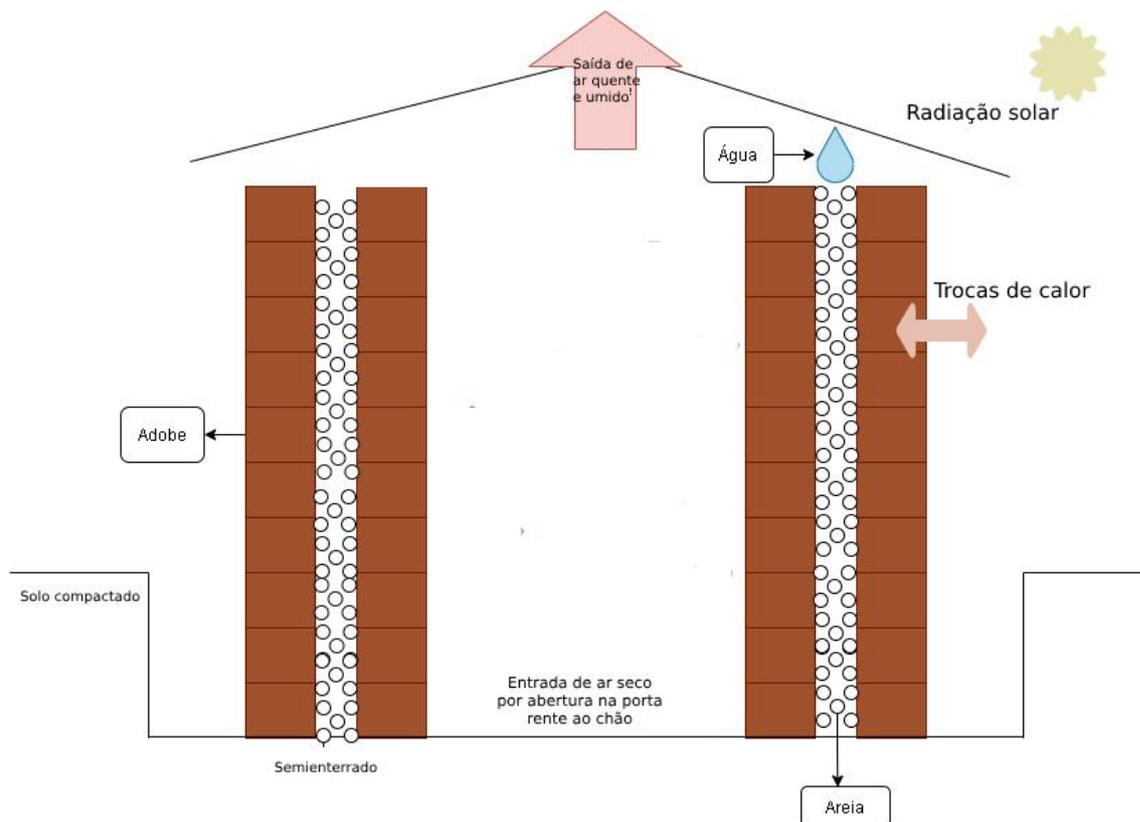
Uma variável importante de um sistema termodinâmico é a entalpia (H), que consiste na quantidade de energia (ou calor) que pode ser movimentada naquele sistema. Sendo assim, um sistema pode ter um maior ou menor potencial de resfriamento evaporativo, que é mensurado pela entalpia contida nele. Os valores de entalpia podem ser calculados utilizando os princípios da carta psicrométrica, padronizados pela ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ver Método). O processo acontece quando a água é vaporizada dentro da corrente de ar e o calor e massa transferidos entre o ar e a água reduzem a temperatura de bulbo seco (TBS) do ar e aumentam sua umidade, mantendo constante a entalpia (resfriamento adiabático).

No resfriamento evaporativo direto (RED) há um resfriamento do ar (redução na entalpia) e a mínima temperatura que se pode atingir é a de bulbo úmido do ar que entra no sistema. No resfriador evaporativo indireto (REI), o ar que será utilizado para condicionar o ambiente (ar primário) transfere calor para uma corrente de ar secundária ou para um líquido, que foram resfriados evaporativamente. A entalpia do ar do lado seco é, assim, reduzida, em contraste à redução adiabática de temperatura de um resfriador evaporativo direto (CAMARGO, 2003).

O sistema de dois estágios (indireto-direto) consegue alcançar uma eficiência de resfriamento maior que 100%, uma vez que a entalpia do sistema é reduzida no ar seco ao passar pelo sistema indireto e em seguida novamente há uma redução ao passar pelo sistema direto, que ao adicionar a evaporação no ar diminui a temperatura abaixo da temperatura de bulbo úmido (PATEL, 2022).

Analisando o processo que ocorre no resfriador do Cerrado, este pode ser classificado como resfriador evaporativo indireto, uma vez que a água é adicionada ao colchão úmido e não entra em contato diretamente com o ar da câmara interna (Figura 18).

Figura 18 - Funcionamento esperado do Resfriador do Cerrado.



Fonte: Autora.

Apesar do processo de REI geralmente não alterar a umidade do ar presente no sistema, há uma variação significativa de umidade dentro do Resfriador do Cerrado, o que se deve às propriedades higrótérmicas das paredes de adobe, tratadas no próximo item.

2.3 O adobe e o conforto térmico

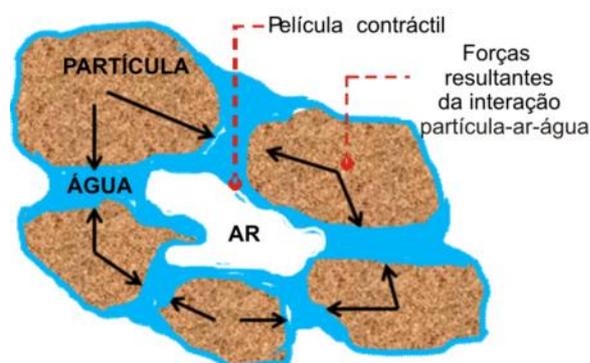
O uso de materiais em terra crua (sem queima) como uma opção sustentável para o resfriamento evaporativo é bastante promissor, uma vez que tanto a terra quanto o vapor de água presente no ar são recursos abundantes, gratuitos e renovável (água) / reversível (terra).

A terra possui propriedades higroscópicas que absorvem e liberam umidade, transferindo o calor naturalmente, e por isso é usada como matéria prima em técnicas construtivas de menor impacto ambiental (REMPEL, REMPEL, 2016), podendo chegar a uma redução de 50%, em comparação com paredes de materiais industrializados convencionais (LIANG, TAN, *et al.*, 2022).

2.3.1 Higroscopicidade

A higroscopicidade, capacidade de realizar regulação da umidade consiste em retirar umidade da atmosfera e vice-versa, fenômeno este que é amplamente estudado por vários autores (WEIMER, 2012; VOGEL, 1977; Freitas et al., 2008; Hall & Allinson, 2009; Liuzzi, Hall, Stefanizzi e Casey, 2013). Um material higroscópico consegue fixar moléculas de água por adsorção. Esses materiais, como é o caso dos solos, possuem interações intermoleculares entre a superfície do material e a água, suficientemente fortes, para fixá-la na estrutura da molécula. Ocorre em materiais com grande área superficial, como carvão ativo, as zeólitas, a areia e o solo. Quando há adsorção, a água fica retida na superfície adsorvente, sem ser incorporada ao volume do material (Figura 19). A essa estrutura é composta por matéria sólida (solo) e vazios preenchidos por fluidos (ar ou água) conforme o teor de umidade (HALL, ALLINSON, 2009).

Figura 19 - Elemento de solo não saturado com presença de ar.



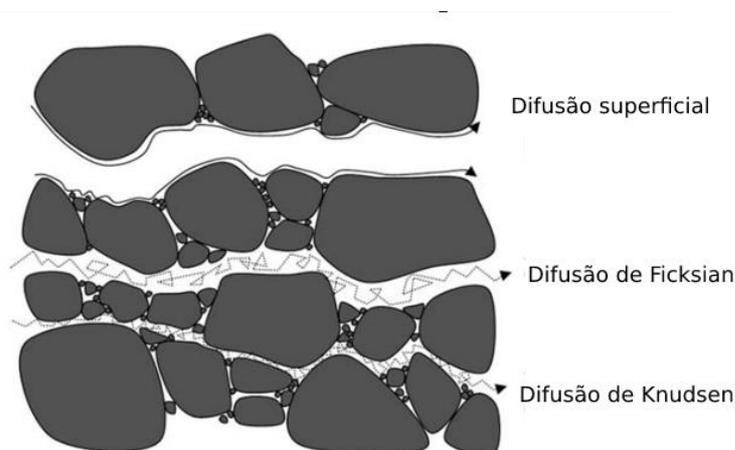
Fonte: Bueno (1979).

Cancela (2013) ressalta que o tijolo em terra crua absorve 10 vezes mais umidade do ar que tijolos cerâmicos tradicionais, de forma que contribui para a manutenção dos níveis de umidade no interior da edificação entre 40% e 60% (MARQUES, 2018) e Rempel R. e Rempel W. (2016) indicam um potencial higroscópico de edifícios feitos a partir de terra para se resfriar por evaporação por meio da absorção de umidade do ar úmido da noite e evaporação durante o calor do dia seguinte.

Tipos de solo diferentes foram estudados por Cagnon et al (2014) e foram constatados que as características higrótérmicas medidas foram muito próximas em todas as cinco amostras feitas a partir de solos distintos, confirmando que o material terroso tinha uma permeabilidade muito alta ao vapor de água independente de sua composição. Assim, o que acontece com os materiais terrosos é uma constante absorção de moléculas de água, o que ocorre quando um material higroscópico é colocado no ar, dependendo da umidade relativa do ambiente e da temperatura (GIUFFRIDA, CAPONETTO, *et al.*, 2019).

O que explica isso é a teoria das forças intermoleculares ou forças de Van der Waals (Figura 20), em que a adsorção é devida a estas forças, que atuam na interface sólido-fluido no interior dos poros (Freitas et al., 2008). Há uma transferência de vapor de água através da espessura da parede devido ao gradiente de umidade entre o interior e o exterior: a rede aberta de nanoporos nos materiais terrosos facilita a absorção/liberação de umidade e dependendo do tamanho do espaço entre eles sua movimentação pode ser superficial, de Ficksian ou de Knudsen (HALL, ALLINSON, 2009; GIUFFRIDA, CAPONETTO, *et al.*, 2019).

Figura 20 - Mecanismos de difusão de vapor em materiais porosos (forças de Van der Waals).



Fonte: Adaptada de Hall e Allinson (2009).

Uma vez que o Resfriador do Cerrado possui paredes duplas em adobe, a área de exposição superficial é bastante relevante. Durante o período noturno, há a adsorção da água do ar e o aumento da entalpia, formando películas de água em torno dos grãos e umedecendo todo o envoltório do resfriador. E, durante as horas mais quentes do dia quando há incidência solar, há a liberação dessa umidade e o processo higroscópico é responsável por diminuir a temperatura e aumentar a umidade interna da câmara, em conjunto com o REI que acontece no colchão úmido do resfriador.

Devido às conexões não perfeitas entre os diferentes constituintes dos solos e misturas, todos os materiais terrosos apresentam uma rede porosa que permite o fluxo de gás e líquido, (GIUFFRIDA, CAPONETTO, *et al.*, 2019), o que é afetado quando há a adição de cimento.

Embora a adição de cimento no adobe aumente as propriedades mecânicas do solo, seu uso diminui suas propriedades higrotérmicas (SAIDI, CHERIF, *et al.*, 2018; ARRIGONI *et al.*, 2017), porque há redução da quantidade de poros e canais.

Costantini romero, Francisca, *et al.*, (2021) constataram menor quantidade de moléculas de água e bolsas de ar presentes na composição granulométrica de adobes estabilizados com cimento, interferindo diretamente na condutividade térmica λ . Giuffrida *et al.* (2019) observaram evaporação e condensação dentro dos poros do adobe como resultado de mudanças de temperatura causadas pela passagem da onda térmica.

A adição de estabilizadores químicos além de reduzirem a permeabilidade ao vapor de água, aumentam a transferência de calor através dos materiais terrosos e (Saidi, Soukaina Cherif, *et al.*, 2020; Narloch, Piatkiewicz, *et al.*, 2021). Mesmo com adição de cal, que aumenta a durabilidade, a alteração de resistência e permeabilidade ao vapor ainda existe, modificando significativamente as propriedades higrotérmicas do adobe (MUHEISE-ARAALIA, PAVIA, 2021).

Esse comprometimento gera o impasse sobre o uso ou não de estabilizantes no adobe, ainda que sempre haja a possibilidade de mais investimento em detalhamento de projeto para contornar as fragilidades de um adobe não estabilizado.

2.3.2 Comportamento térmico

Outra característica importante dos materiais terrosos é a condutividade térmica, ou a habilidade dos materiais de conduzir energia térmica.

A NBR 15220-1 define a condutividade térmica é a capacidade de um material de conduzir maior ou menor quantidade de calor através de uma superfície por uma unidade de tempo (ABNT, 2005). Os materiais com baixa condutividade térmica consegue absorver, armazenar e liberar grandes

quantidades de energia de forma lenta, ajudando a manter a temperatura do ar interno estável (ALLINSON, HALL, 2010).

Comparado com os materiais de construção convencionais, o adobe tem menor condutividade térmica, capacidade de calor específico comparável, maior teor de umidade de equilíbrio e maior permeabilidade ao vapor de água (ZHANG, SANG, *et al.*, 2020).

Quanto menor for a condutividade térmica, menor será a variação da temperatura interior (amplitude térmica), dificultando o aquecimento interno dos ambientes. Com esse fenômeno, as temperaturas internas que foram diminuídas pelo resfriamento evaporativo tendem a se manter estáveis, mesmo sob forte incidência solar e variação da temperatura de bulbo seco exterior.

De modo geral, a condutividade térmica do adobe é diretamente proporcional à sua densidade, ou seja, quanto maior a densidade maior o valor da condutividade e, portanto, menor a resistência térmica deste material (MARQUES, 2018, p. 67).

O adobe também apresenta uma elevada inércia térmica, devido às grandes espessuras de suas vedações, o que contribui para sua eficiência no controle da temperatura interior das edificações, principalmente em climas quentes (Da Ponte, 2012, p. 235). Materiais assim são classificados como “estáveis” termicamente, uma vez que estabilidade térmica é tipicamente atribuída à inércia térmica do material maciço da terra. Estudos de Rempel e Rempel (2016) sugerem que o resfriamento evaporativo intrínseco contribui significativamente para o conforto térmico dos edifícios de adobe, compensando o eventual ganho de calor sensível devido ao comportamento térmico dos materiais terrosos.

Essa característica está ligada a outras, como o calor específico e a absorvância do material. O calor específico (quantidade de calor necessária para a variação da temperatura de 1° C por cada grama do material) e a absorvância (quantidade de energia - radiação solar - que é absorvida em relação à energia incidente em determinada superfície), somados à condutividade térmica, são determinantes no desempenho térmico final do material (Tabela 1).

Tabela 1 - Propriedades térmicas do adobe

Identificação	Descrição	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)
Material n. 4	Alvenaria de bloco de adobe	1700	0,56	1001

Fonte: Adaptado de Orui (2015).

Sendo assim, conforme a composição do material utilizado, suas propriedades (densidade, condutividade térmica e calor específico) podem sofrer variações (FROTA, SCHIFFER, 2001).

Em uma edificação a transmissão do calor irá ocorrer quando existir uma diferença entre as temperaturas da superfície externa e interna, sendo que o fluxo de calor irá sempre da superfície mais quente para a mais fria. Assim, em climas quentes e secos, a transmissão de calor é percebida quando a temperatura do ar externo, mais alta que a do ar interno, eleva a temperatura da superfície externa do elemento (seja ele cobertura, esquadrias ou parede) e permite a troca de calor no interior do material (FROTA, SCHIFFER, 2001).

O comportamento térmico também é altamente dependente do clima no qual estão inseridos, por exemplo, Ferraz Junior (1995) determina em seus estudos que, para regiões climática com uma maior variação de temperatura, e no geral quente e secos, são indicadas paredes de maior inércia, sendo o adobe considerado uma boa alternativa, devido à sua maior massa para amortecer e retardar o calor ganho durante o dia, e liberar somente à noite, quando as temperaturas do ambiente são mais baixas.

Marques (2018) comprovou o comportamento térmico do adobe em seus estudos em relação ao verão (Tabela 2) e ao inverno (Tabela 3) e fazendo uma comparação com outros materiais, constatando a maior eficiência térmica do adobe para climas quentes e secos (Figura 21), além de concluir que, quando o material passa por queima, o aumento da temperatura de queima aumenta a retração linear da sua composição molecular, reduzindo a absorção de água, a porosidade aparente e aumentando a massa específica aparente do material final.

Tabela 2 - Comportamento térmico do adobe no verão.

Dia Típico de verão				
Espessura da parede (cm)	Timáx (°C)	Temáx (°C)	Timáx – Temáx (°C)	Nível de desempenho
15	30,4	31,9	-1,5	Mínimo
	30,5		-1,4	Mínimo
	30,8		-1,1	Mínimo
20	30,2		-1,7	Mínimo
	30,7		-1,2	Mínimo
30	29		-2,9	Mínimo

Fonte: Adaptado de Marques (2018).

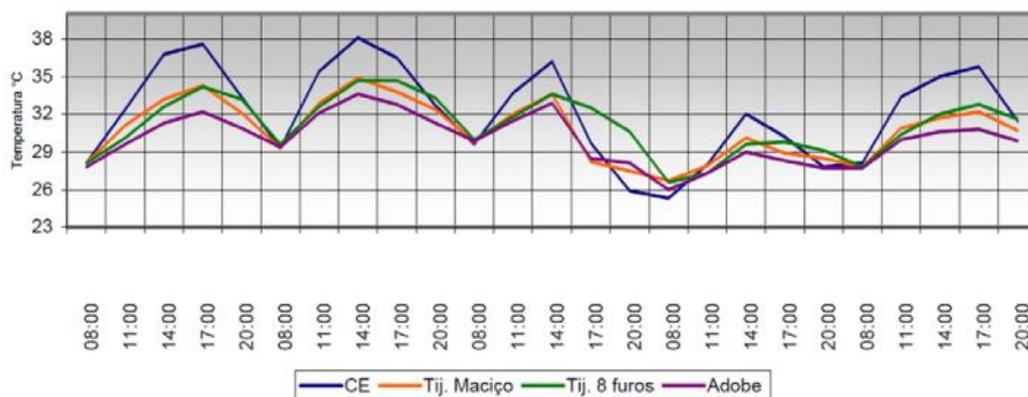
Tabela 3 - Comportamento térmico do adobe no inverno.

Dia Típico de inverno				
Espessura da parede (cm)	Timáx (°C)	Temáx (°C)	Timáx – Temáx (°C)	Nível de desempenho
15	12,2	6,3	5,9	Intermediário
	12,2		5,9	Intermediário
	11,9		5,6	Intermediário
20	12,6		6,3	Intermediário

	12		5,7	Intermediário
30	13,2		6,9	Superior

Fonte: Adaptado de Marques (2018).

Figura 21 - Comparação do comportamento térmico de diferentes materiais de parede.



Fonte: Marques (2018).

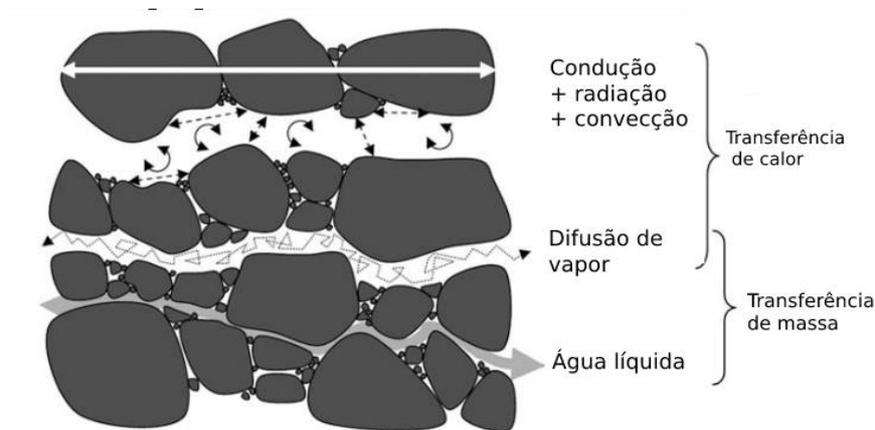
A partir dessa comparação, Marques (2018) afirma que os valores de umidade e densidade podem ser utilizados para mudar o desempenho térmico do adobe.

Devido a essas características dos materiais terrosos, o comportamento térmico não é simples de ser diagnosticado. Entre outros fatores, o edifício está exposto às diversas influências e condições dinâmicas do ambiente externo (radiação, chuva, temperatura, vento e umidade). Sob todas essas condições, o envelope está sujeito a fenômenos complexos de transferência de calor e massa (BOUKHELF, TRABELSI, *et al.*, 2022).

A transferência de calor e massa em meios porosos ocorre por condução, convecção e radiação, sendo que a condução prevalece na fase sólida (partículas), a convecção prevalece no fluido dos poros e a radiação surge nas interfaces entre partículas e o ar circundante.

A porosidade do solo, densidade, tensão efetiva, tamanho de partícula, tipo de compactação e umidade são propriedades fundamentais que controlam a condutividade térmica, e, portanto, transferência de calor (Figura 22). Em adição, as trocas das águas dos poros podem, portanto, contribuir para um aumento da inércia térmica e resultar em uma ganho de eficiência térmica da parede de adobe (LABOREL-PRÉNERON, MAGNIONT, *et al.*, 2018).

Figura 22 - Transferência de calor e massa em materiais porosos.



Fonte: Adaptada de Hall e Allinson (2009).

Essas trocas de calor e massa são tão significativas para o comportamento higrotérmico que mesmo uma pequena mudança na composição do material pode afetar seu desempenho e conforto térmico. Por isso são encontradas tantas lacunas em estudos envolvendo o comportamento higrotérmico de materiais terrosos.

Segundo Alkan e Yazicioglu (2021), a avaliação do desempenho higrotérmico requer a avaliação do fluxo de calor por condução, convecção e radiação, da umidade fluindo por difusão de vapor, convecção e transporte de líquido e dos fluxos de ar causados por forças naturais, externas ou mecânicas. Porém tais medições não são viáveis quando o experimento não está em ambiente controlado de laboratório.

Além disso, na revisão da literatura realizada por Giuffrida et al (2019), destaca-se a falta na normalização dos protocolos experimentais para a avaliação do desempenho higrotérmico de matérias-primas terrosas, indicando que as propriedades avaliadas em diferentes condições de contorno não podem ser imediatamente comparáveis.

Devido a todos esses fatores de influência, muitos autores têm dificuldade em medir o desempenho higrotérmico do adobe de seus experimentos, pois seriam necessários muitos e distintos equipamentos para averiguar todas as características específicas de cada material utilizado.

2.4 O desempenho dos resfriadores evaporativos existentes e suas medições

Este item retrata os principais experimentos encontrados na literatura e o modo como são medidos os parâmetros estudados e os instrumentos utilizados para determinar o desempenho térmico.

Um dos estudos de desempenho encontrados é a de Camargo (2003), que fez experimentos em um resfriador de tijolos cerâmicos (modelo de Roy) e obteve a variação das temperaturas de bulbo seco médias durante o dia (8h às 18h), com uma diferença de temperatura de até 7,4°C entre a temperatura de bulbo seco (TBS) externa e na saída do RED e de até 5,3°C entre a TBS externa e a TBS no interior da câmara.

Ambuko (2017), Islam (2012) e Albano (2011) desenvolveram estudos sobre a conservação de hortifruti pós-colheita em câmaras de resfriamento evaporativo, incluindo verduras, tomates e tubérculos. Também baseados nos estudos de Roy, alcançaram uma diferença de temperatura de 6 a 9°C nos modelos em alvenaria simples.

A temperatura encontrada por eles é a chamada temperatura absoluta, e não é considerada uma informação completa, pois falta a análise de eficiência para determinar a porcentagem da diminuição de temperatura em relação ao potencial. Esses dados, quando comparados com temperaturas externas muito altas, podem não representar grandes ganhos, por isso se faz necessária a análise de eficiência.

Outros autores modificaram o modelo-base de Roy, na tentativa de melhorar o desempenho térmico, como Chinenye (2011), que agregou ao projeto original de Roy conceitos simples de conforto térmico, posicionando o resfriador evaporativo a favor do vento predominante e em área sombreada. Nesse estudo, o plano de rega foi estipulado em 3 vezes por dia utilizando 6 litros de água em cada rega e suas medições de temperatura e umidade foram executadas a cada duas horas das 6h às 22h em horário local e comparadas com os dados meteorológicos nacionais.

A eficiência de resfriamento (ϵ), também chamada de desempenho térmico ou eficiência de saturação, calculada segundo Rianguilaikul (2010), é o principal método de análise utilizado pela literatura para determinar quanto foi diminuída a temperatura de bulbo seco em relação à temperatura de bulbo úmido.

Neste estudo foi atingido de 20 a 92% e a entalpia foi determinada a partir do uso da carta psicrométrica, determinada em 1207W (CHINENYE, 2011). Esse método de cálculo é o mais comum encontrado na literatura, pois proporciona um comparativo real quantitativo do resfriamento realizado. A escolha de métodos semelhantes permite o comparativo direto de resultados calculados, por isso muitos autores se baseiam nessa fórmula.

Equação 1 - Fórmula para calcular a eficiência do resfriamento.

$$\epsilon = \frac{TBS_e - TBS_s}{TBS_e - TBU_e} \times 100$$

Em que:

- TBS_e é a temperatura de bulbo seco do ar na entrada do resfriador (°C);
- TBS_s a temperatura de bulbo seco na saída do resfriador (°C);
- TBU_e a temperatura de bulbo úmido na entrada do resfriador (°C).

Fonte: Riangvilaikul (2010)

Outros autores também utilizam esse parâmetro numérico, como De Antonellis et al (2020), que calculam a diferença de eficiência de resfriadores com geometrias diferentes utilizando as medições de temperatura, umidade e chegando a uma eficiência de 40 a 60% (DE ANTONELLIS, CIGNATTA, *et al.*, 2020).

Yan et al (2021) experimentaram água salgada pela alta disponibilidade local. A eficiência foi calculada em 82 a 90% mas foi constatado uma diminuição da eficiência de resfriamento proporcional ao aumento de sal presente na água utilizada na rega (YAN, HE, *et al.*, 2021).

Assim, considerando a similaridade no método de comprovação da eficiência utilizados pelos autores, podemos comparar os resultados de todos os autores que utilizam Riangvilaikul (2010) para calcular a eficiência de saturação na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 - Resfriadores encontrados na literatura

autor	eficiência de saturação (ε)	diferença de temperatura (°C)	umidade relativa (%)
Seweh e Darko (2016)	87,17%	2,3°C	92%
Islam e Morimoto (2012)	*	20°C	50-70%
Ambuko (2017)	*	10°C	80-100%
Albano (2011)	*	9°C	82%
Kulkarni e Rajput (2013)	64 a 70%	13,02°C	91%
Chinenye (2011)	20 a 92%	11°C	95%
Soponpongpipat (2011)	55%	7°C	79%
Camargo (2003)	90 a 95%	13°C	75%
Yan et al (2021)	82 a 90%	5,5°C	+13,34%
De Antonellis et al (2020)	40 a 60%	15°C	+50%
Dirpan et al (2018)	73 a 94%	2,2°C	87,2%
Ntsoane et al (2019)	80%	9,8°C	96%
Birhanu e Belay (2023)	84,50%	6,08°C	52,16%
Davalo (2021)	73%	13,24°C	82,30%

Fonte: Autora.

Além do cálculo da eficiência de resfriamento, é necessário um bom planejamento experimental e a utilização de equipamentos de medição com boa precisão para obter resultados confiáveis. Assim, autores como Kulkarni e Rajput (2013) utilizaram dados meteorológicos da estação nacional da Índia para calcular as temperaturas externas médias para cada período, podendo assim calcular a eficiência diversos ensaios envolvendo formas de resfriadores diferentes. Para cada forma de resfriador estudado foi calculada a eficiência de saturação, obtendo resultados entre 64 e 70% em todas as formas estudadas (KULKARNI, RAJPUT, 2013).

A medição é feita em diferentes pontos do resfriador, como presente em Islam e Morimoto (2012, 2014), que aferiram as temperaturas simultaneamente em 3 pontos distintos de um modelo similar ao de Roy (capacidade para 100kg) usando um termômetro digital (Sato Shoji, 47SD) com quatro termopares (Cromel-Alumel, 0,3 mm ϕ) para confirmação dos dados. Três termopares foram colocados nas camadas superior, média e inferior do ZECC; outro foi colocado fora do ZECC para medir a temperatura externa. A umidade relativa do resfriador foi medida simultaneamente usando um termo-higrômetro (Sato Shoji, HT-SD), que possui funções de data logger e os dados foram coletados em intervalos de um minuto por 24 horas. A água utilizada foi distribuída a partir de um reservatório de água com vinte bicos de gotejamento de baixa pressão por meio de uma válvula de fluxo programável (Haikanbuhin VKK-15WAG) para umedecer o colchão de areia, em uma taxa de irrigação de 50 l / dia (ISLAM, MORIMOTO, 2012).

Com o intuito de aumentar a quantidade de dados em um planejamento experimental mais longo, Seweh e Darko (2016) utilizaram um período de três meses para avaliar o comportamento higrotérmico e a degradação das batatas doces dentro do ZECC, com medições simultâneas de temperatura e umidade internas e externas, enquanto a eficiência de resfriamento foi calculada utilizando a fórmula de Riangvilaikul (2010) (SEWEH, DARKO, et al., 2016).

Com o avanço nas tecnologias de simulação, outros métodos foram incorporados nas análises, como os experimentos conduzidos por Liu, Lyu, *et al.* (2017). Esses autores realizaram a análise do ambiente térmico usando simulação numérica da respiração biológica em tomates em um resfriador evaporativo de tijolos cerâmicos com colchão úmido de uma mistura de areia e zeólita, simulando a evaporação das moléculas de água no colchão entre paredes duplas. Em seus resultados, concluíram que a temperatura e umidade estão fortemente relacionadas com a espessura do colchão úmido - quanto mais espesso, maior a queda na temperatura interna. Também foi observado que a temperatura da água no colchão exerce pouca influência na temperatura média e na umidade relativa do resfriador evaporativo, comprovando que os resultados encontrados no experimento são compatíveis com os encontrados em suas simulações.

Outras análises foram desenvolvidas, focadas não somente no desempenho, mas também no desenvolvimento do hortifruti armazenado como o de Ambuko et al. (2017) que observaram as mudanças em tempo real na temperatura e umidade relativa, bem como mudanças nos atributos de qualidade (perda de peso fisiológico - PWL, índice de murchamento, ângulo de matiz e vitamina C), durante o período de armazenamento. A diferença de temperatura encontrada na câmara em relação ao ar ambiente externo variou entre 4 e 10°C e a UR foi significativamente mais alta (80-100%). No geral, a diferença de temperatura entre o ambiente e os resfriadores evaporativos variou entre 1 e 10°C dependendo da hora do dia. Neste estudo não foi calculada a eficiência de resfriamento (AMBUKO, WANJIRU, *et al.*, 2017).

Também na mesma linha de pesquisa, Dirpan et al (2018) compararam o comportamento de hortifruti em um resfriador evaporativo e um refrigerador elétrico, constatando que as perdas de nutrientes e de umidade das frutas é mais acentuada em temperatura ambiente, no refrigerador e no resfriador evaporativo, respectivamente, permitindo um armazenamento de até 12 dias adicionais sem prejuízos ao conteúdo. Assim, puderam constatar que o armazenamento de hortifruti sem a necessidade de energia elétrica pode ser comparado ao industrial, com eficiência de 73 a 94% (DIRPAN, SAPSAL, *et al.*, 2018).

A maioria dos estudos envolvendo resfriamento evaporativo tem como base o modelo básico de Roy. Mesmo quanto à metodologia para a medição do desempenho de resfriamento, observa-se que são similares, seguindo os mesmos princípios e possibilitando comparações diretas. E observa-se que poucos deles realizam uma análise do comportamento higrotérmico do resfriador e dos fenômenos físico-químicos que ocorrem durante os experimentos.

Todos os trabalhos estudados se baseiam no cálculo de eficiência de resfriamento (Equação 1) e tem como principais variáveis medidas a temperatura de bulbo seco externa e interna, a temperatura de bulbo úmido, a umidade relativa interna e externa, a entalpia e a pressão atmosférica (esse último quando em condições controladas em laboratório). Também não existem registros de estudos que observam a ação dos ventos no funcionamento e desempenho dos resfriadores, e todos possuem tempo de medição que pode ser considerado curto (de 1 dia a 1 semana).

Apesar de existirem vários estudos que podem ser diretamente comparados, nenhum dos resfriadores se assemelha ao de Davalo (em terra crua, a céu aberto e com capacidade para até 1 tonelada de hortifruti). Pode-se dizer que é o mais próximo de uma situação real de uso para estocagem de hortifruti em comunidades agrícolas, por considerar o uso de recursos locais para construção e manutenção.

E, por estar exposto ao tempo, o tempo de medição é um fator importante, pois possibilita a aferição da constância dos dados encontrados e a comparação de diferentes situações meteorológicas e climáticas.

3 MÉTODO

Este trabalho, de caráter experimental (GIL, 2017), envolve dados secundários (revisão de literatura) e primários (medição) com análise estatística de resultados.

Uma atualização da literatura foi realizada, buscando acrescentar mais dados sobre o comportamento higrotérmico do adobe sob as palavras-chave: resfriamento evaporativo, higroscopicidade, adobe, construção em terra, permeabilidade da água em solo, *evaporative cooling chamber*, *hygroscopicity*, *hygrothermal analysis adobe*, *hygrothermal behavior adobe*, *hygrothermal Properties raw Earth*, *water permeability*, *earthen construction*.

Na revisão de literatura, ficou constatado que a maioria dos autores utiliza métodos similares para a medição dos parâmetros estudados (utilização de *data logger* para medir temperatura de bulbo seco e umidade e cálculos dos outros parâmetros baseados na norma ASHRAE), além de calcular a eficiência de saturação atingida pelos resfriadores usando a fórmula de Riangvilaikul (2010). Com base nisso, foi definido o método deste estudo, de maneira a possibilitar uma comparação direta entre os resultados obtidos e seus precursores.

Com base em Montgomery (1991) para o planejamento e para a análise dos resultados experimentais, este estudo tem os seguintes passos:

3.1 Reconhecimento e definição do problema

Dados os resultados alcançados por Davalo, entendeu-se que a repetição dos ensaios e períodos mais longos poderiam elucidar algumas dúvidas que permaneceram. Além disso, constatou-se a necessidade de redundância de equipamentos para evitar as perdas de dados.

3.2 Escolha das variáveis

As variáveis **controláveis** do experimento a céu aberto são:

- Quantidade de água
- Tempo de rega

E as **não controláveis** são:

- Temperatura de bulbo seco externa
- Umidade relativa externa
- Radiação solar

- Velocidade e frequência de vento
- Precipitação
- Influência do microclima local
- Temperatura de bulbo úmido
- Entalpia

3.3 Delineamento dos experimentos

A técnica para a definição dos ensaios deste estudo é a réplica, que consiste na repetição de um ensaio sob algumas condições preestabelecidas (volume de água e tempo) (BUTTON, 2012).

Para o experimento, foram definidos períodos de 3 semanas com os seguintes volumes de água por período: zero litros, 100 litros, 200 litros e 400 litros. Um ciclo compreende os 4 períodos. O experimento teve 3 ciclos (Tabela 5), todos realizados durante os meses mais secos, ao longo de 2 anos (total de 252 dias de experimento), em Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

Tabela 5 - Planejamento temporal do experimento

ciclo	período	volume (litros)	duração	estação
1	21/06/21 a 12/07/21	0	21 dias	Inverno
	12/07/21 a 02/08/21	100	21 dias	Inverno
	02/08/21 a 23/08/21	200	21 dias	Inverno
	23/08/21 a 13/09/21	400	21 dias	Inverno
2	21/03/22 a 11/04/22	0	21 dias	Outono
	11/04/22 a 02/05/22	100	21 dias	Outono
	02/05/22 a 23/05/22	200	21 dias	Outono
	23/05/22 a 13/06/22	400	21 dias	Outono
3	08/08/22 a 29/08/22	0	21 dias	Inverno
	29/08/22 a 19/09/22	100	21 dias	Inverno
	19/09/22 a 10/10/22	200	21 dias	Primavera
	10/10/22 a 31/10/22	400	21 dias	Primavera

Fonte: Autora.

Os períodos de outono e inverno foram escolhidos por serem os mais secos do ano, e apesar da ocorrência de eventuais temperaturas baixas, com o aumento das temperaturas médias nos últimos anos, a temperatura de bulbo seco externa da cidade de Campo Grande permanece elevada, permitindo este estudo.

Os resultados foram comparados com a estação meteorológica de Campo Grande/MS do INMET, localizada na base aérea de Campo Grande, a 8,5km do resfriador. Dados de pressão atmosférica e entalpia foram calculados de acordo com as normas da ASHRAE (2017).

ASHRAE Standard 55 (2017) é um conjunto de normas técnicas americanas que propõem modelos gráficos e analíticos para a avaliação dos índices de conforto térmico presentes em edificações. O Modelo gráfico é baseado na carta psicrométrica, enquanto o modelo analítico é baseado em um algoritmo disponibilizado pela norma para cálculo de variáveis térmicas por meio de resolução com métodos numéricos. Ambos os modelos foram utilizados nesse estudo para a conferência de variáveis como entalpia e temperatura de bulbo úmido.

3.4 Execução do experimento

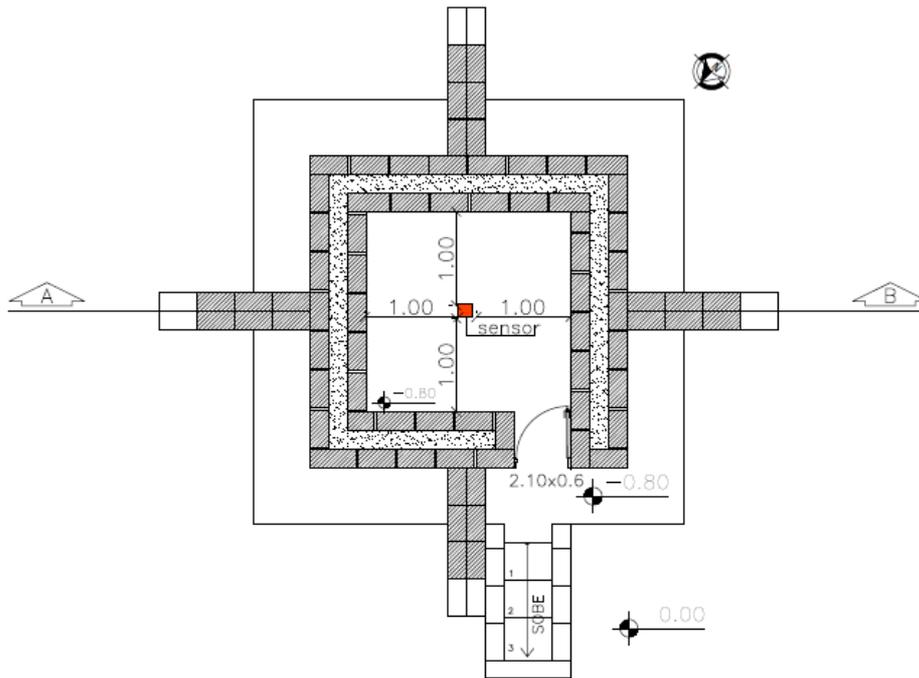
Depois dos últimos experimentos de Davalo, o resfriador permaneceu seis meses sem uso (de janeiro a junho de 2021), quando começou este estudo.

A água foi administrada por gotejamento sobre o colchão úmido através de uma válvula de fluxo programável (BWT20) com erro médio de 1s/24h, conectada à fonte de água. A taxa de irrigação foi de 2,5 litros/min distribuída igualmente pelas quatro paredes. As regas sempre começam às 14h, quando a temperatura externa está mais alta.

Todos os dados de temperatura e umidade foram medidos simultaneamente em três pontos diferentes dentro do resfriador. O primeiro sensor foi colocado ao nível do solo (0m de altura), o segundo a 1m de altura e o terceiro a 2,5m de altura, coincidindo com o topo das paredes duplas de adobe (Figura 23 e Figura 24).

Foram utilizados 5 termo-higrômetros digitais com funções de *data logger* (HOBO U12-001 e TESTO 176 T2), ambos com precisão de $\pm 0,2$ °C e faixa de medição de -100 a +400 °C. Os dados foram coletados em intervalos de uma hora durante os 21 dias de cada período.

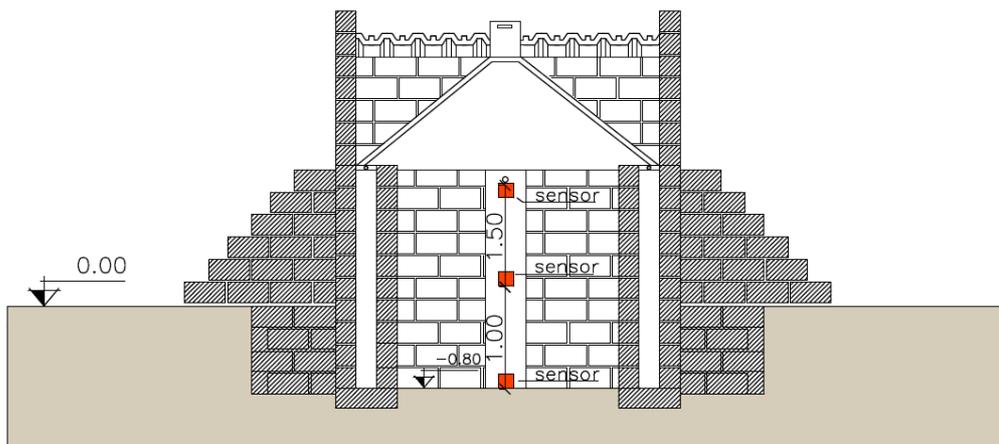
Figura 23 - Localização dos sensores de temperatura e umidade.



PLANTA

Fonte:Autora.

Figura 24 - Localização dos sensores de temperatura e umidade



CORTE AB

Fonte:Autora.

3.5 Análise dos resultados

Para determinar o melhor desempenho do resfriador, a condição ideal de funcionamento é a de regiões com o clima quente e seco (temperatura de bulbo seco alta - acima dos 25°C - e a umidade relativa baixa - abaixo dos 50%). Como o resfriador está construído a céu aberto em uma região de clima tropical, com a presença de um maciço vegetal e um corpo d'água nas proximidades, procedeu-se a um pré-tratamento dos dados coletados.

3.6 Pré tratamento dos dados

Para diminuir ruídos na análise, foram excluídos os dados anormais, do total de 252 dias medidos:

- condições meteorológicas não condizentes com o clima quente e seco;
- quatro dias referentes às interferências causadas pelo fenômeno La Niña;
- dez dias de frente fria inesperada causada por uma onda de ar polar na região;

Outras anormalidades foram excluídas também:

- Dias em que houve abertura da porta de acesso ao resfriador.
- Dias com chuva.
- Dias com umidade relativa muito alta (acima de 50%)
- Dias com a temperatura de bulbo seco baixa (abaixo de 20°C)

Para os dias em que houve a abertura de portas, os dados anormais foram substituídos por interpolação linear (média do dado anterior e posterior ao substituído). Os dados substituídos foram os dados de temperatura e umidade dos sensores internos do resfriador (1 dado por dia, das 14h) (Tabela 6).

Tabela 6 - Dias de medição dos dados, substituídos.

ciclo	volume (litros)	data
1	0 litros	28/06/21, 05/07/21 e 12/07/21
	100 litros	19/07/21, 26/07/21 e 02/08/21
	200 litros	09/08/21, 16/08/21 e 23/08/21
	400 litros	30/08/21, 06/09/21 e 13/09/21
2	0 litros	28/03/22, 04/04/22 e 11/04/22
	100 litros	18/04/22, 25/04/22 e 02/05/22
	200 litros	09/05/22, 16/05/22 e 23/05/22
	400 litros	30/05/22, 06/06/22 e 13/06/22
3	0 litros	15/08/22, 22/08/22, 29/08/22

	100 litros	05/09/22, 12/09/22 e 19/09/22
	200 litros	26/09/22, 03/10/22 e 10/10/22
	400 litros	17/10/22, 24/10/22 e 31/10/22

Fonte: Autora.

3.7 Análise estatística

Para obter um panorama geral do conjunto de dados que foram tratados foi feita uma análise estatística para determinar, dentro de cada período, um dia típico, que representa caracteristicamente o comportamento higrotérmico do resfriador para a análise do desempenho.

3.8 Seleção do dia típico

Para selecionar um dia típico em cada período, os dados de todos os dias (do período) foram analisados a fim de determinar as características principais mais recorrentes, tais como os dados gerais de temperatura e umidade e oscilação durante o dia.

Os padrões que se repetiram mais vezes durante o período foram considerados como “típicos”. Foram considerados típicos:

- Dias em que faz calor acima de 25 graus;
- Com umidade relativa abaixo de 50%;
- Que não houve precipitação;
- Que não houve abertura de porta;
- Onde a curva de temperatura externa sobe ao longo do dia e desce após o pôr do sol;

Após determinar quais conjuntos de dias tinham o mesmo comportamento e classificá-los como típicos, foram escolhidos os dias com a maior diferença de temperatura interna para externa, e maior diferença de umidade interna para externa para serem utilizados como exemplos do período.

3.9 Análise de desempenho

Como a comparação direta de temperaturas não é possível, dado que as variáveis não controláveis (do ambiente) tiveram comportamentos diferentes em cada ciclo, procedeu-se a uma análise do cenário, o que engloba as condições meteorológicas durante os dois anos de experimento. No final os resultados foram comparados com a literatura.

- Para determinar o desempenho higrotérmico do resfriador foi analisado o parâmetro eficiência de saturação, determinada pela Equação 1.

Para determinar as características térmicas imutáveis do resfriador foram calculados os parâmetros:

- Capacidade térmica determinada pela Equação 2.
- Transmitância térmica determinada pela Equação 3.
- Resistência térmica determinada pela Equação 4.

Equação 2 - Fórmula da Capacidade Térmica

$$CT = \rho \times c \times e = \frac{Kj}{m^2K}$$

Sendo:

ρ = Densidade de massa aparente (kg/m³)

c = Calor específico (kJ/kgK)

e = Espessura da parede (m)

Fonte: NBR 15220

Equação 3 - Fórmulas de Transmitância Térmica

$$U = \frac{1}{R_{Si} + R + R_{Se}} = \frac{W}{m^2K}$$

Sendo:

R_{Si} = Resistência da Superfície interna (m²K/W)

R = Resistência térmica da parede (m²K/W)

R_e = Resistência da Superfície externa (m²K/W)

Fonte: NBR 15220

Equação 4 - Fórmula de Resistência Térmica

$$R = \frac{e}{\lambda} = \frac{m^2K}{W}$$

Sendo:

e = Espessura da parede (m)

λ = Condutividade térmica (W/mK)

Fonte: NBR 15220

Estas 3 últimas características devem ser consideradas no futuro, para fins de comparação, se houver algum tipo de mudança no resfriador e foram calculadas para registrar as condições em que o resfriador se encontrava durante o experimento. O resultado desses cálculos são o mesmo para todos os ciclos, por isso não causam interferência no desempenho higrotérmico determinado por este estudo.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Os dados obtidos foram agrupados e organizados por volume de rega (0, 100, 200 e 400 litros) e analisados por ciclo (Figura 25).

Figura 25 - Linha do tempo do experimento.

2021 - Ciclo 1														
jan - jun	0 litros			100 litros			200 litros			400 litros			set-dez	
	jun		05	jul			ago			set				
	21	28		12	19	26	02	09	16	23	30	06		
Preparo do experimento	1	22	20	32	1	21	27	30	23	34	29	25	34	27
		42	37	29	2	48	31	21	19	30	16	23	25	35
		12	21	29		22	18	28	19	20	27	15	25	18
		1 23/06/21: La Niña			1 18/07/21: La Niña 2 12/06/21, 18h: Chuva acima do esperado (30mm)			3 09/08/21, 16h: Temperatura acima do esperado (36°C)			3 29/08/21, 15h: Temperatura acima do esperado (35,5°C)			
	Pausa e preparo do experimento													
2022 - Ciclo 2														
jan - mar	0 litros			100 litros			200 litros			400 litros			Jun-ago	
	mar			abr			mai			jun				
	21	28	04	11	18	25	02	09	16	23	30	06		
Pausa e preparo do experimento		26	25	29	24	25	32	4	19	15	23	23	25	21
		54	60	59	2	79	56	61	69	71	50	78	60	68
		23	21	20		37	22	18	08	10	12	48	22	23
		2 30/03/22, 14h: Chuva acima do esperado (60mm)			2 13/04/22, 09h: Chuva acima do esperado (123mm)			4 04/05/22 a 22/05/22: Frente fria			2 08/06/22, 12h: Chuva acima do esperado (148mm)			
	Pausa e preparo do experimento													
2022 - Ciclo 3														
Jun-ago	0 litros			100 litros			200 litros			400 litros			nov-dez	
	ago			set			out							
	08	15	22	29	05	12	19	26	03	10	17	24		
Pausa e preparo do experimento	5	29	39	32	3	33	26	27	25	31	32	34	31	
		22	26	21		42	46	49	47	50	42	51	49	54
		20	25	26		65	78	62	51	48	39	32	54	35
		5 08/08/22 a 12/08/22: Perda de dados do INMET			6 01/09/22, 18h: Ventos acima de 70km/h 3 08/09/21, 15h: Temperatura acima do esperado (34,3°C)						6 18/10/22, 16h: Ventos acima do esperado (62,8km/h)			
	Fim do experimento													
<p>— Temperatura média no período (°C) Inverno</p> <p>— Umidade relativa média no período (%) Outono</p> <p>— Velocidade dos ventos média no período (km/h) Primavera</p>														

Fonte:

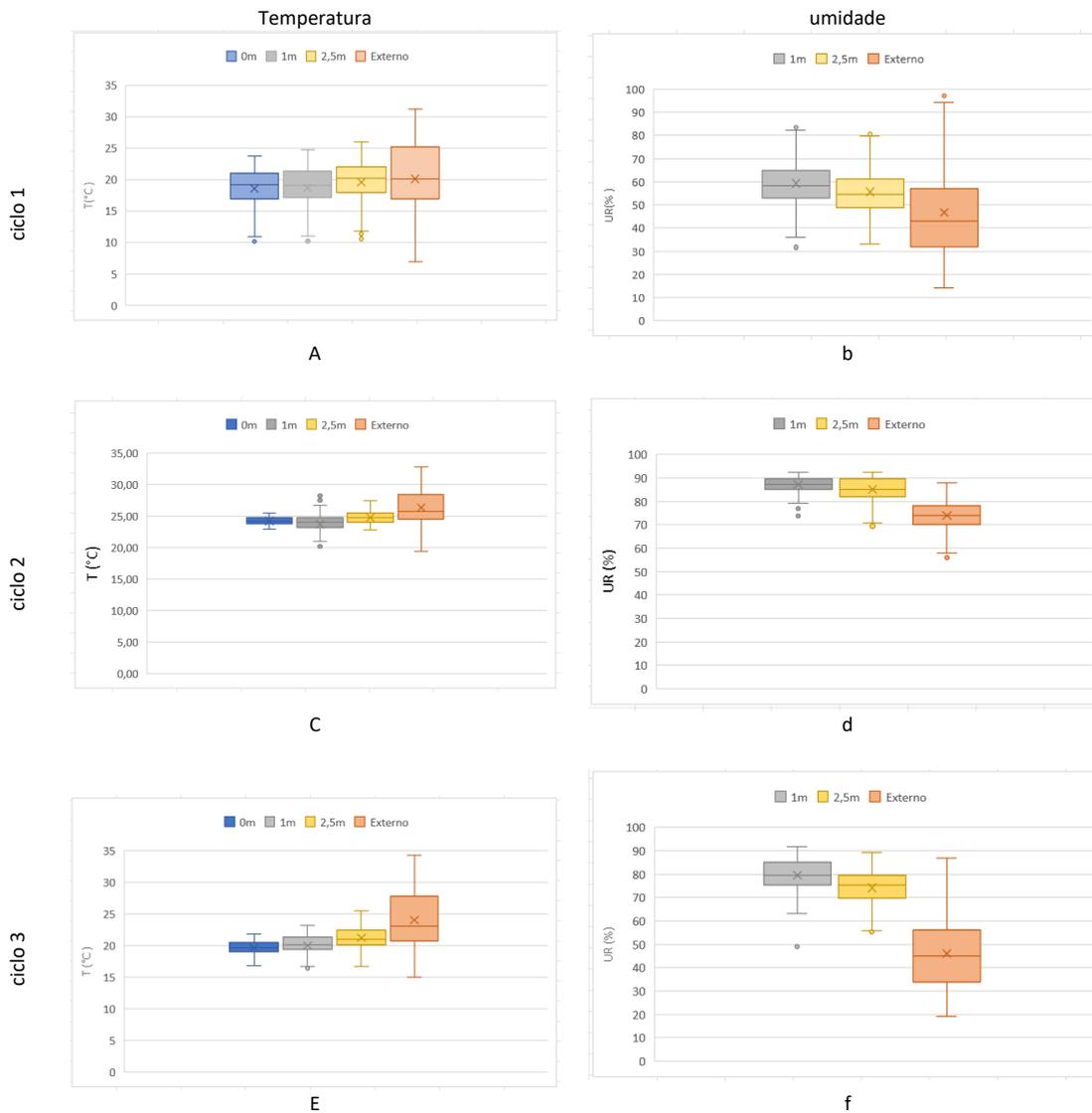
Autora.

4.1 Ciclos 1 a 3, com rega de 0 litros por dia

A primeira situação analisada foi o período de 0 litros, nas seguintes datas (Figura 25):

- ciclo 1: 21/06/21 a 11/07/21;
- ciclo 2: de 21/03/22 a 11/04/22;
- ciclo 3: 08/08/22 a 29/08/22.

Figura 26. Análise estatística dos dados do período com 0l de rega no ciclo 1 (a e b), ciclo 2 (c e d) e ciclo 3 (e e f).



Fonte: Autora.

O ciclo 1 apresenta poucos *outliers* abaixo da temperatura mínima e tem mediana em torno de 20°C para todas as situações (Figura 26a), já a umidade relativa apresenta no ambiente externo mediana de 40% e internamente, mediana em torno de 60%, indicando um ganho de umidade mesmo durante o período de 0 litros (Figura 26b).

O ciclo 2 apresenta poucos *outliers* abaixo e acima da temperatura mínima interna e tem mediana em torno de 25°C para todas as situações (Figura 26c), já a umidade relativa apresenta no ambiente externo mediana de 70% e internamente, mediana em torno de 90%, indicando o ciclo mais úmido entre todos os períodos de 0 litros (Figura 26d).

Durante o ciclo 3, devido à uma instabilidade na estação meteorológica do INMET nos dez primeiros dias medidos (Figura 25), houve perda de cerca de 12% dos dados de temperatura externa que não

foram considerados na análise estatística final. Apesar disso, o ciclo conta apenas um *outlier* nos dados de temperatura (Figura 26e), com a mediana em torno de 20°C para as temperaturas internas e 25°C para as temperaturas externas, com acréscimo de umidade de 35% das internas em relação à externa (Figura 26f), obtendo resultados melhores devido à baixa precipitação e baixa umidade externa.

Todos os ciclos apresentaram diferença significativa entre as umidades interna e externa, mesmo sem a rega do colchão úmido. Esse fenômeno pode ser atribuído ao comportamento higrotérmico do adobe, que consegue fazer a regulação da umidade naturalmente.

Entre todos os ciclos, o 2 (outono) foi o que apresentou menor variação entre as umidades internas e externa, com menores ganhos de umidade, possivelmente devido às chuvas (portanto, condição não ideal de funcionamento). Como esperado, o melhor resultado foi obtido durante ciclo 1, que apesar de ser inverno, em Campo Grande/MS é comum haver temperaturas altas, ausência de chuvas e baixa umidade relativa do ar (Figura 25).

Os gráficos a seguir (Figura 27) foram extraídos da amplitude interquartil principal dos gráficos da Figura 26, correspondendo aos dados mais recorrentes, ou seja:

- com temperatura externa acima de 25°C
- com umidade abaixo de 60%
- sem abertura de porta
- sem precipitação
- com temperatura e umidade próximos à média do período.

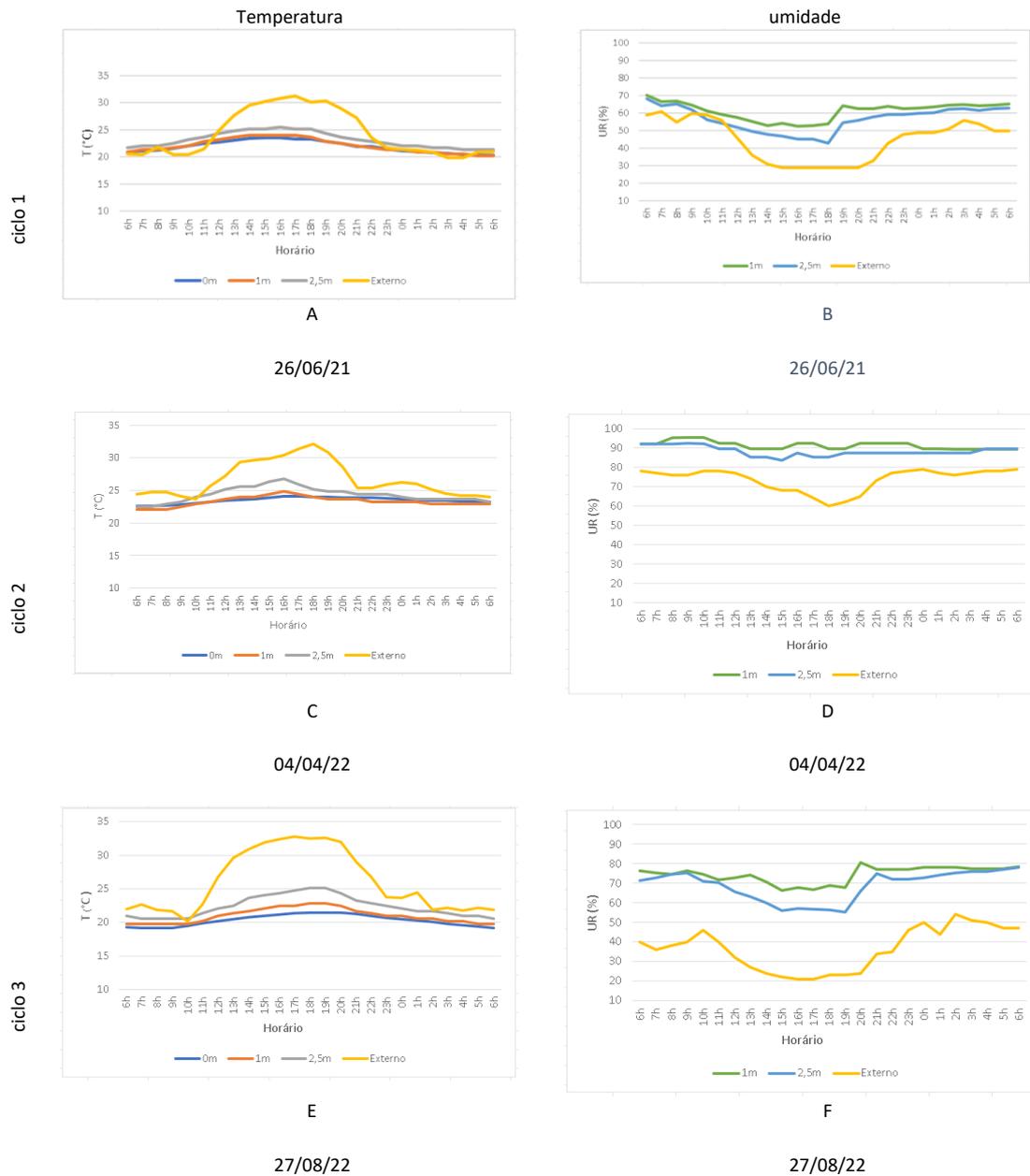
Com esses filtros, a quantidade de dias com dados recorrentes ficou entre 61,92 e 90,48%, nos 3 ciclos (Tabela 7).

Tabela 7 - Dados recorrentes nos períodos com 0l de rega

ciclo	dia típico	recorrência	obs
		qtde dias semelhantes/qtde dias do período (%)	
1	26/06/21	19/21 (90,48%)	<ul style="list-style-type: none"> • dispersão de 10°C. • 40% de umidade.
2	04/04/22	16/21 (76,16%)	<ul style="list-style-type: none"> • dispersão de 9°C. • 30% de umidade.
3	27/08/22	13/21 (61,92%)	<ul style="list-style-type: none"> • (perda de dados do INMET) • dispersão de 14°C. • 60% de umidade.

Fonte: Autora.

Figura 27 – Comportamento higrotérmico período com Ol de rega no ciclo 1 (a e b), ciclo 2 (c e d) e ciclo 3 (e e f).



Fonte: Autora.

Nos três ciclos há um aumento da temperatura exterior aproximadamente às 9h00, sendo o pico entre 15h00 e 18h00, mantendo-se elevada até próximo às 22h00, quando diminui. Esse aumento também eleva a temperatura dentro do resfriador, mas com uma curva mais achatada, o que ocorre ao longo do dia e em todos os ciclos.

Todos os valores para cada período foram calculados utilizando apenas os dias típicos, onde o comportamento foi semelhante e dentro de um padrão (alta temperatura externa, baixa umidade externa e sem chuva). Os dados de ventos foram obtidos no banco de dados do INMET.

Tabela 8 - Melhores desempenhos do período com OI de rega, nos 3 ciclos.

ciclo	potencial			real						
	Temperatura de bulbo úmida interna potencial (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Temperatura de bulbo seco externa (°C)	Temperatura de bulbo seco interna (°C)	Máximo Ganho de temperatura (°C)	Umidade externa (%)	Umidade interna (%)	Ganho de umidade (%)	Eficiência de resfriamento (%)	Ventos médios (km/h)
1	17,47	51,61	31,2	23,3	-7,9	30	65	35	57	25
2	20,6	81,42	32,8	24,79	-8,01	59	98	39	65,06	22
3	17,4	50,29	34,1	21,9	-11,5	20	68	48	74,84	26

Fonte: Autora.

No ciclo 1, nas horas mais quentes do dia, a umidade relativa externa apresenta valores baixos, cerca de 30%, fator que colabora para a evapotranspiração das paredes de adobe. No ciclo 2, apesar de apresentar a maior entalpia entre os três, a elevada umidade relativa do ar (cerca de 59%) e a maior temperatura de bulbo úmido externa em comparação aos outros ciclos não permitiu que houvesse uma maior diferença de temperatura ambiente. No ciclo 3 o conjunto de fatores composto pela baixa temperatura de bulbo úmido + alta entalpia + ventos foi determinante para o melhor desempenho entre os três ciclos. O ciclo 3 apresentou os resultados mais promissores, considerando a diferença de temperatura e o excedente de umidade (Figura 27f).

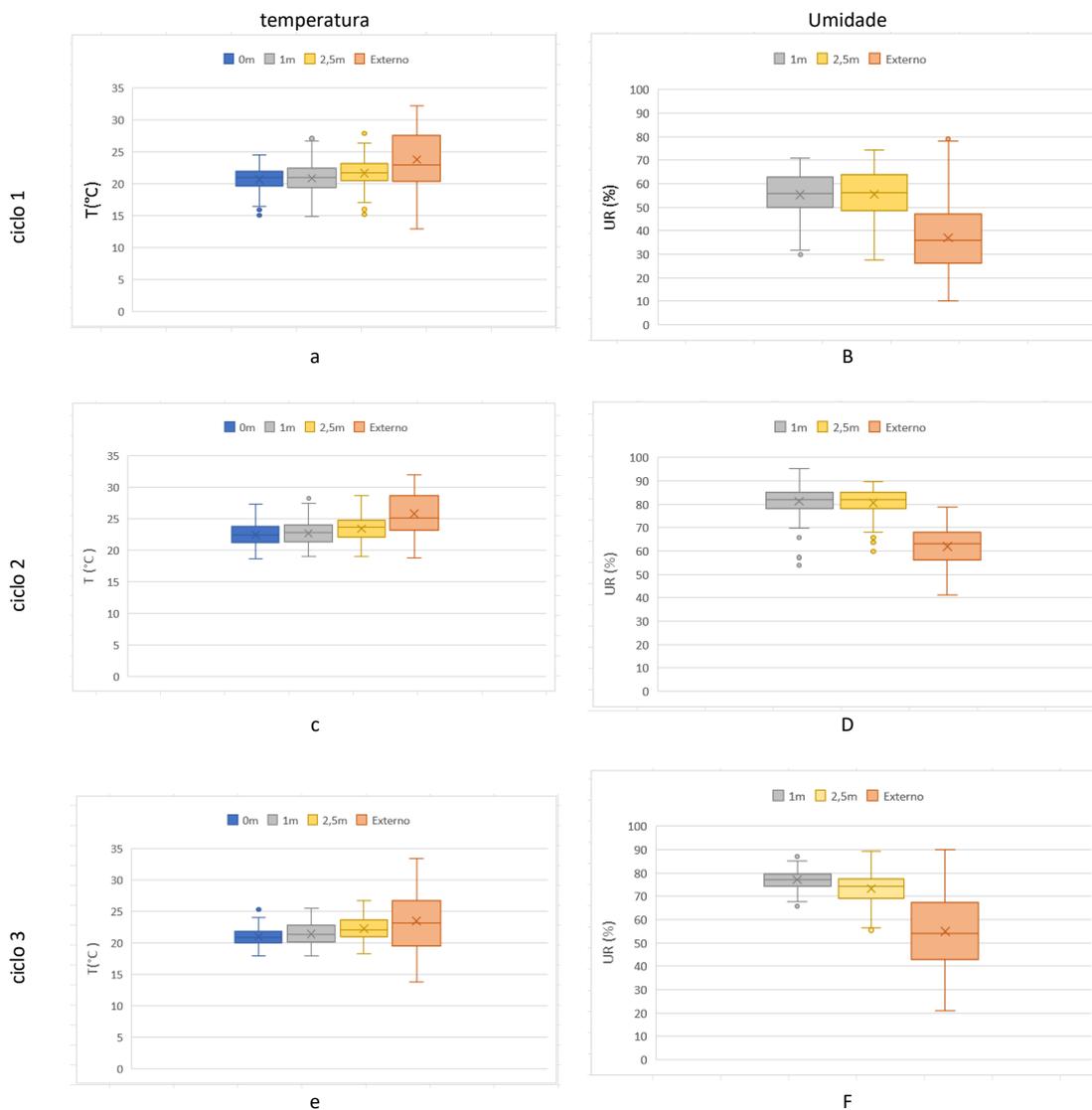
4.2 Ciclos 1 a 3, com rega de 100 litros por dia

A segunda situação analisada foi o período de 100 litros, nas seguintes datas (Figura 25):

- ciclo 1: 12/07/21 a 02/08/21;
- ciclo 2: de 11/04/22 a 02/05/22;
- ciclo 3: 29/08/22 a 19/09/22.

O colchão úmido foi regado todos os dias por 40min a partir das 14h, quando a temperatura externa estava mais alta.

Figura 28. Análise estatística dos dados do período com 100l de rega no ciclo 1 (a e b), ciclo 2 (c e d) e ciclo 3 (e e f).



Fonte: Autora.

A Figura 28 agrupa os dados de temperatura e umidade dos 3 ciclos. É possível verificar pela primeira vez uma diferença significativa entre as temperaturas internas da câmara e as temperaturas externas. Em todos os ciclos a diferença dos dados de umidade externa comparados com os do interior do resfriador são significativos (Figura 28b, d e f), onde grande parte das amostras internas tem seus valores mínimos maiores que os máximos externos, resultado atribuído ao resfriamento evaporativo indireto que começa a acontecer com a inclusão da água (Figura 28a).

O ciclo 1 apresenta poucos *outliers* abaixo da temperatura mínima e tem mediana em torno de 22°C para internas e 25°C para externa (Figura 28a), já a umidade relativa apresenta no ambiente externo mediana de 35% e internamente, mediana em torno de 55%, indicando um ganho de umidade médio de 20% (Figura 28b).

O ciclo 2 apresenta um *outlier* e acima da temperatura máxima interna e tem mediana em torno de 21°C para internas e 25°C para externas (Figura 28c), já a umidade relativa apresenta no ambiente externo mediana de 60% e internamente, mediana em torno de 82%, indicando o ciclo mais úmido entre todos os períodos 100 litros (Figura 28d).

O ciclo 3 conta apenas um *outlier* nos dados de temperatura (Figura 28e), com a mediana em torno de 20°C para as temperaturas internas e 24°C para as temperaturas externas, com acréscimo de umidade de 31% das internas em relação à externa (Figura 28f). também foi o ciclo onde houve maior dispersão dos dados de umidade, indicando uma forte variação da umidade relativa externa, possivelmente causada pela alta incidência de ventos do período (Figura 25).

Entre todos os ciclos, o ciclo 2 (outono) foi o que apresentou menor variação entre as umidades internas e externa, com menores ganhos de umidade, possivelmente devido à umidade relativa ser maior neste período em comparação com os outros. Como esperado, o melhor resultado foi obtido durante no ciclo 1 (inverno), quando é comum a ausência de chuvas e baixa umidade relativa do ar.

Os gráficos a seguir (Figura 29) foram analisados a partir do quartil principal da Figura 28, correspondendo aos dados mais recorrentes.

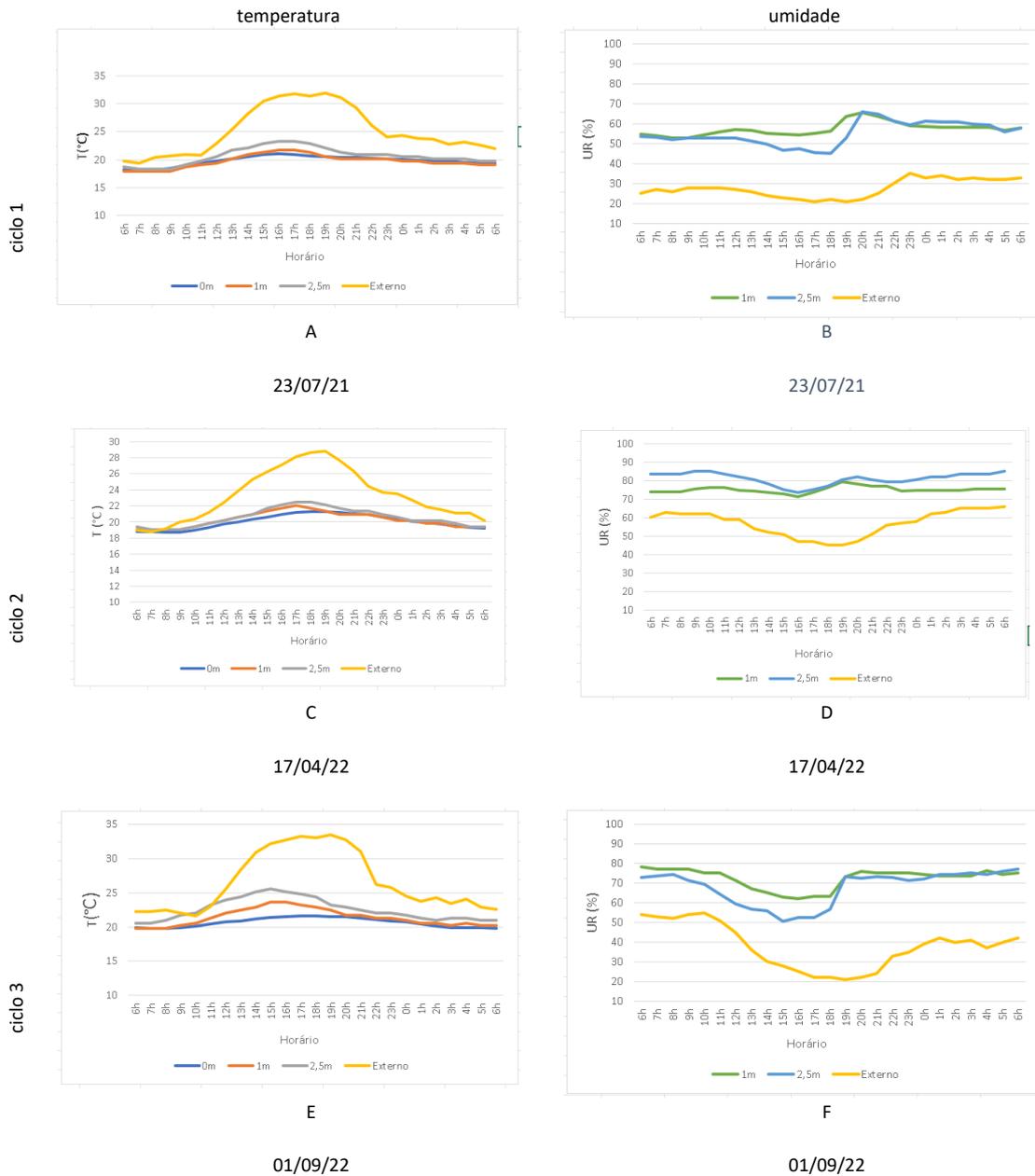
Com esses filtros, a quantidade de dias com dados recorrentes ficou entre 80,96 e 95,24%, nos 3 ciclos (Tabela 9):

Tabela 9 - Dados recorrentes nos períodos com 100l de rega

ciclo	dia típico	recorrência	obs
		qtde dias semelhantes/qtde dias do período (%)	
1	23/07/21	20/21 (95,24%)	<ul style="list-style-type: none"> • dispersão de 13°C. • 45% de umidade.
2	17/04/22	17/21 (80,96%)	<ul style="list-style-type: none"> • (chuvas anormais 13/04/22). • dispersão de 11°C. • 32% de umidade.
3	01/09/22	20/21 (95,24%)	<ul style="list-style-type: none"> • (ventos anormais 01/09/22). • dispersão de 14°C. • 64% de umidade.

Fonte: Autora.

Figura 29 – Comportamento higrotérmico período com 100l de rega no primeiro ciclo (a e b), segundo ciclo (c e d) e terceiro ciclo (e e f).



Fonte: Autora.

Nos 3 ciclos há um aumento da temperatura externa por volta das 11h e permanece alta até as 21h quando começa a diminuir (Figura 29 a, c e e).

Tabela 10 - Melhores desempenhos do período com 100l de rega, nos 3 ciclos.

ciclo	Potencial		Real							
	Temperatura de bulbo úmida interna potencial (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Temperatura de bulbo seco externa (°C)	Temperatura de bulbo seco interna (°C)	Máximo Ganho de temperatura (°C)	Umidade externa (%)	Umidade interna (%)	Ganho de umidade (%)	Eficiência de resfriamento (%)	Ventos médios (km/h)
1	16,18	47,57	31,8	20,9	-9,16	20	60	40	69,78	26
2	21,4	79,24	32	24,5	-7,5	45	68,5	23,5	70,75	31
3	18,1	51,25	33,5	21,5	-12,1	20	73,5	53,5	77,92	65

Fonte: Autora.

Por outro lado, dentro do resfriador durante os três ciclos a temperatura interna permanece estável ao longo do dia, apresentando uma variação suave. Com a introdução das regas é possível ver uma diferença de umidade interna x externa maior nos três ciclos, além de atingir eficiência de resfriamento maior em relação ao período 0 litros.

O ciclo 3 apresentou os melhores resultados em relação ao volume de 100l/dia na rega, com condições meteorológicas favoráveis semelhantes ao primeiro ciclo (quente e seco). Houve um diferencial característico da primavera que é a alta incidência de ventos (Figura 25), o que pode ter contribuído para o aumento da eficiência do resfriador em comparação com o primeiro ciclo.

4.3 Ciclos 1 a 3, com rega de 200L por dia

A terceira situação analisada foi o período de 200 litros, nas seguintes datas (Figura 25):

- ciclo 1: 02/08/21 a 23/08/21;
- ciclo 2: de 02/05/22 a 23/05/22;
- ciclo 3: 19/09/22 a 10/10/22.

O colchão úmido foi regado todos os dias por 1h20min a partir das 14h, quando a temperatura externa estava mais alta.

A Figura 30 agrupa os dados de temperatura e umidade encontrados nesse período. Diferente dos dados encontrados durante os períodos sem rega e 100l/dia, estes não tiveram a interferência de nenhuma situação climática anormal, constituindo conjuntos de dados consistentes e praticamente sem *outliers*.

O ciclo 1 não apresenta *outliers* e tem mediana em torno de 19°C para internas e 25°C para externa (Figura 30a), já a umidade relativa apresenta no ambiente externo mediana de 32% com alguns *outliers* acima da máxima e internamente, mediana em torno de 70%, indicando um ganho de umidade médio de 38% (Figura 30Figura 28b). O ciclo teve maior dispersão dos dados de umidade, indicando uma forte variação da umidade relativa externa.

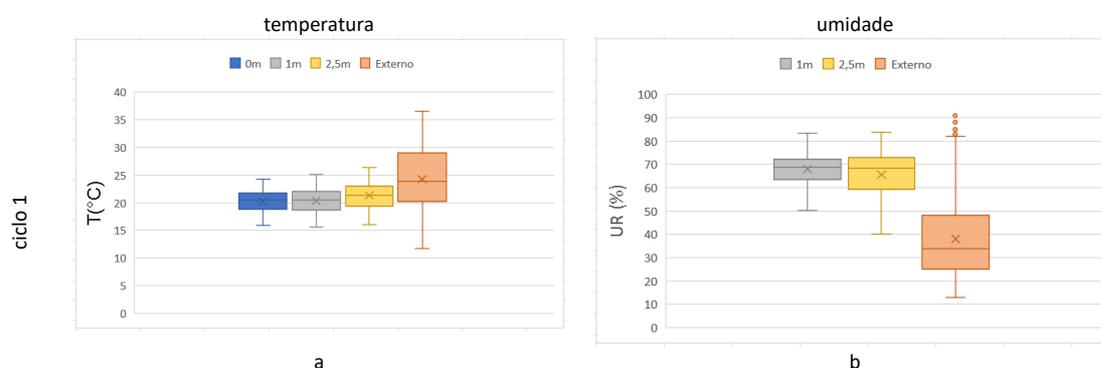
O ciclo 2 não apresenta *outliers* e tem mediana em torno de 21°C para internas e 23°C para externas (Figura 30c), apresentando o conjunto de dados com menor dispersão no período. Já a umidade relativa apresenta no ambiente externo mediana de 60% e poucos *outliers* abaixo da mínima e, internamente, mediana em torno de 80%, indicando o ciclo mais úmido entre todos os períodos 200 litros (Figura 30d).

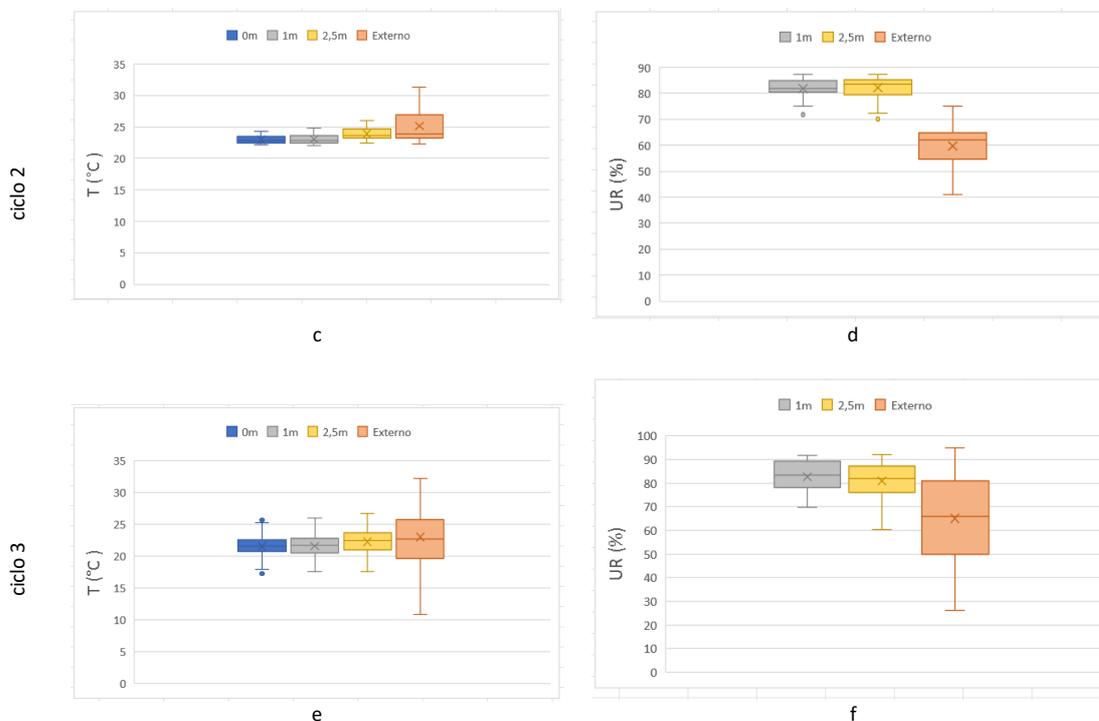
O ciclo 3 possui poucos *outliers* nos dados de temperatura (Figura 30e), com a mediana em torno de 20°C para as temperaturas internas e 24°C para as temperaturas externas, com acréscimo de umidade de 26% das internas em relação à externa (Figura 30f).

Assim, apesar da diferença das temperaturas internas em relação às externas (Figura 30 a, c e e), é possível verificar uma proporcionalidade dos dados e das medianas, que é o comportamento esperado do resfriador, uma vez que as variações de temperatura tendem a ser proporcionais. Embora o ganho de temperatura tenha sido muito semelhante ao do período de 100 litros, a duplicação da quantidade de água afetou significativamente a umidade relativa do ar, apresentando um aumento médio de 29,87% (Figura 30 b, d e f) se comparado ao período anterior.

Novamente o período do outono se mostrou menos eficiente em relação ao inverno e a primavera (Figura 25), possivelmente pelas condições climáticas mais úmidas e com maior precipitação.

Figura 30. Análise estatística dos dados do período com 200l de rega no ciclo 1 (a e b), ciclo 2 (c e d) e ciclo 3 (e e f).





Fonte: Autora.

A

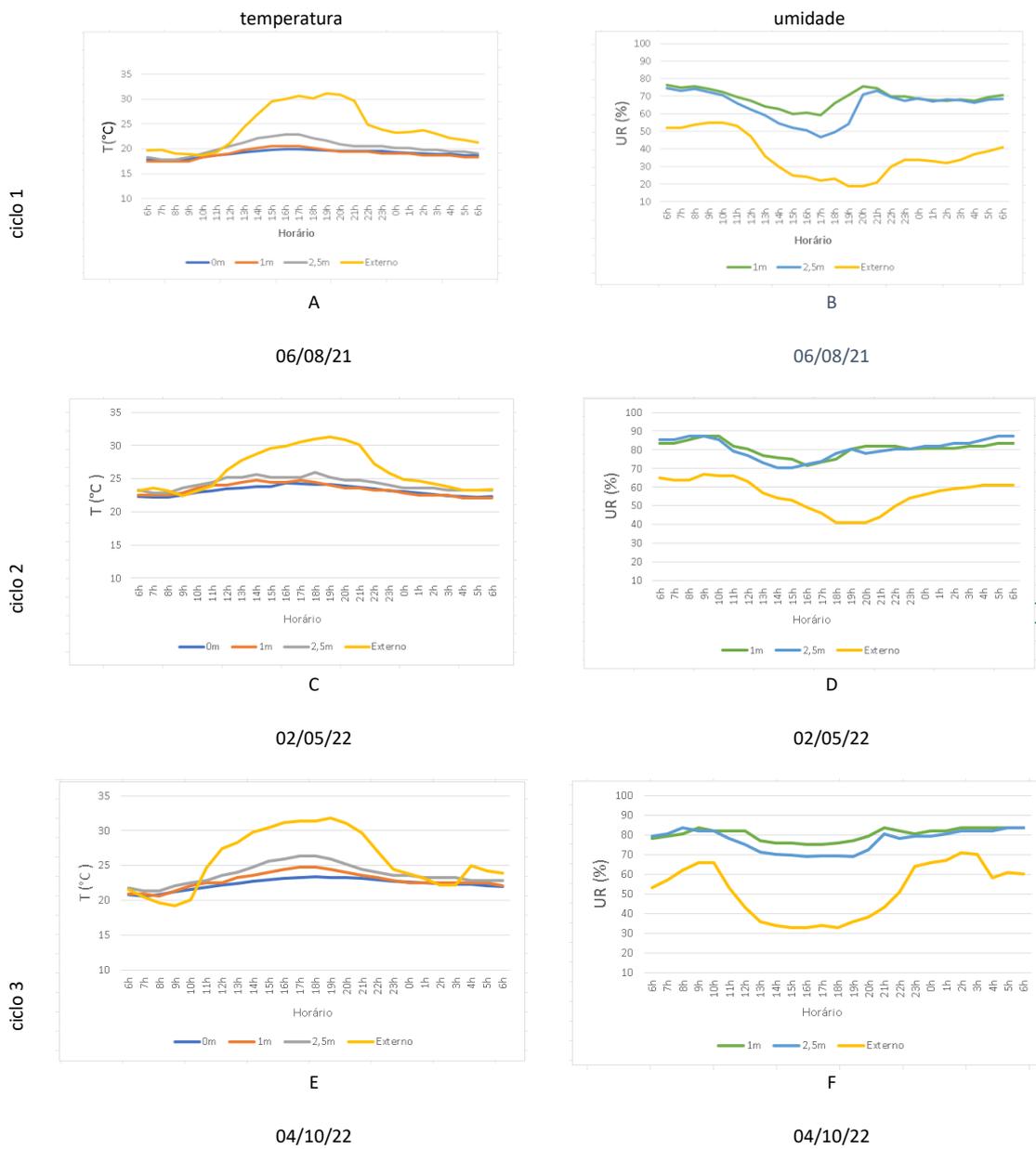
Figura 31 mostra os gráficos do dia típico extraído do quartil principal da Figura 30, correspondendo aos dados mais recorrentes. Com esses filtros, a quantidade de dias com dados recorrentes ficou entre 33,32e 90,48%, nos 3 ciclos (Tabela 11):

Tabela 11 - Dados recorrentes nos períodos com 200l de rega

ciclo	dia típico	recorrência	obs
		qtde dias semelhantes/qtde dias do período (%)	
1	06/08/21	19/21 (90,48%)	<ul style="list-style-type: none"> • dispersão de 12°C. • 55% de umidade.
2	02/05/22	7/21 (33,32%)	<ul style="list-style-type: none"> • (frente fria 04/05/22 a 22/05/22). • dispersão de 6°C. • 39% de umidade.
3	04/10/22	18/21 (85,72 %)	<ul style="list-style-type: none"> • dispersão de 9°C. • 52% de umidade.

Fonte: Autora.

Figura 31 – Comportamento higrotérmico período com 200l de rega no primeiro ciclo (a e b), segundo ciclo (c e d) e terceiro ciclo (e e f).



Fonte: Autora.

Tabela 12 - Melhores desempenhos do período com 200l de rega, nos 3 ciclos.

ciclo	potencial		real							
	Temperatura de bulbo úmida interna potencial (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Temperatura de bulbo seco externa (°C)	Temperatura de bulbo seco interna (°C)	Máximo Ganho de temperatura (°C)	Umidade externa (%)	Umidade interna (%)	Ganho de umidade (%)	Eficiência de resfriamento (%)	Ventos médios (km/h)
1	16,06	47,2	31,2	19,7	-8,19	20	80	60	79,41	28
2	21,1	64,28	31,5	24,1	-7,4	40	79,5	39,5	71,15	10
3	20,59	61,95	32,1	23,7	-10,7	30	86,4	56,4	96,55	50

Fonte: Autora.

O ciclo 1 apresentou o mesmo padrão de oscilação quando comparada ao de 100l/diário, uma vez que as condições climáticas de agosto permaneceram muito próximas às de julho. A

Figura 31b demonstra um dia com baixa umidade relativa do ar externa quando o aumento da umidade interna foi de quase 60% em seu pico, atestando que os efeitos da evaporação são amplificados em climas mais secos.

O ciclo 2 apresentou resultado inferior ao primeiro ciclo, onde a diminuição da eficiência do resfriador está ligada às condições climáticas em maio, cuja média precipitação e baixa incidência de ventos são esperadas.

Durante o ciclo 3 foram encontrados os melhores resultados de todo o experimento, atingindo a eficiência de 96,55%. As condições meteorológicas estavam dentro do esperado pela literatura (clima quente e seco), porém houve uma alta incidência de ventos (Figura 25), o que pode ter sido um fator que contribuiu para o aumento da eficiência.

4.4 Ciclos 1 a 3, com rega de 400L por dia

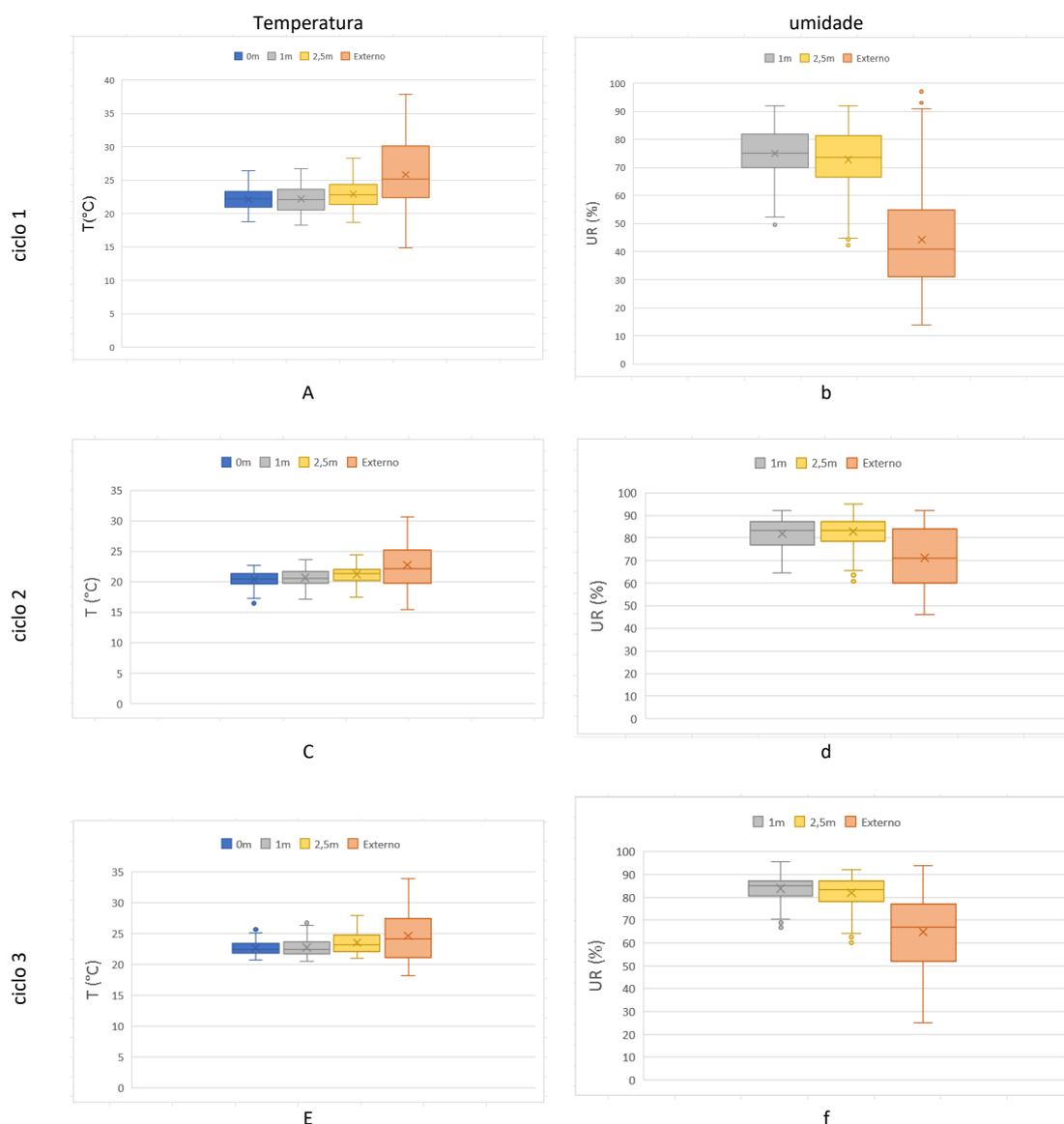
A quarta e última situação analisada foi o período de 400 litros, nas seguintes datas (Figura 25):

- ciclo 1: 23/08/21 a 13/09/21;
- ciclo 2: de 23/05/22 a 13/06/22;

- ciclo 3: 10/10/22 a 31/10/22.

O colchão úmido foi regado todos os dias por 2h40min a partir das 14h, quando a temperatura externa estava mais alta.

Figura 32. Análise estatística dos dados do período com 400l de rega no ciclo 1 (a e b), ciclo 2 (c e d) e ciclo 3 (e e f).



Fonte: Autora.

A Figura 32 agrupa os dados de temperatura e umidade dos 3 ciclos. O ciclo 1 não apresenta *outliers* e tem mediana em torno de 21°C para internas e 25°C para externa (Figura 32a), já a umidade relativa apresenta no ambiente externo mediana de 40% com alguns *outliers* acima da máxima e internamente, mediana em torno de 75%, indicando um ganho de umidade médio de 35% (Figura

32Figura 28b). Este ciclo teve maior dispersão dos dados de umidade, indicando uma forte variação da umidade relativa externa, também teve o maior ganho de umidade médio em todo o experimento, proveniente das condições climáticas do mês de agosto. Como sistema de resfriamento evaporativo indireto, as condições encontradas em agosto são extremamente favoráveis, pois apresentam os maiores períodos de incidência solar, com pouca precipitação e altas temperaturas externas (Figura 25).

O ciclo 2 apresenta um *outlier* abaixo da temperatura mínima e tem mediana em torno de 20°C para internas e 23°C para externas (Figura 32c). A umidade relativa apresentou no ambiente externo mediana de 68% e, internamente, mediana em torno de 85%, indicando o ciclo mais úmido entre todos os períodos 400 litros (Figura 32d) e seguindo o padrão onde o outono apresenta as características climáticas menos favoráveis entre as três situações.

O ciclo 3 possui poucos *outliers* nos dados de temperatura (Figura 32e), com a mediana em torno de 23°C para as temperaturas internas e 25°C para as temperaturas externas. A UR apresenta mediana externa em 68% e internas com 88%, representando um acréscimo de umidade de 20% (Figura 32f) e sendo o conjunto de dados com menor dispersão no período.

A Figura 33 mostra os gráficos do dia típico extraído do quartil principal da Figura 32, correspondendo aos dados mais recorrentes.

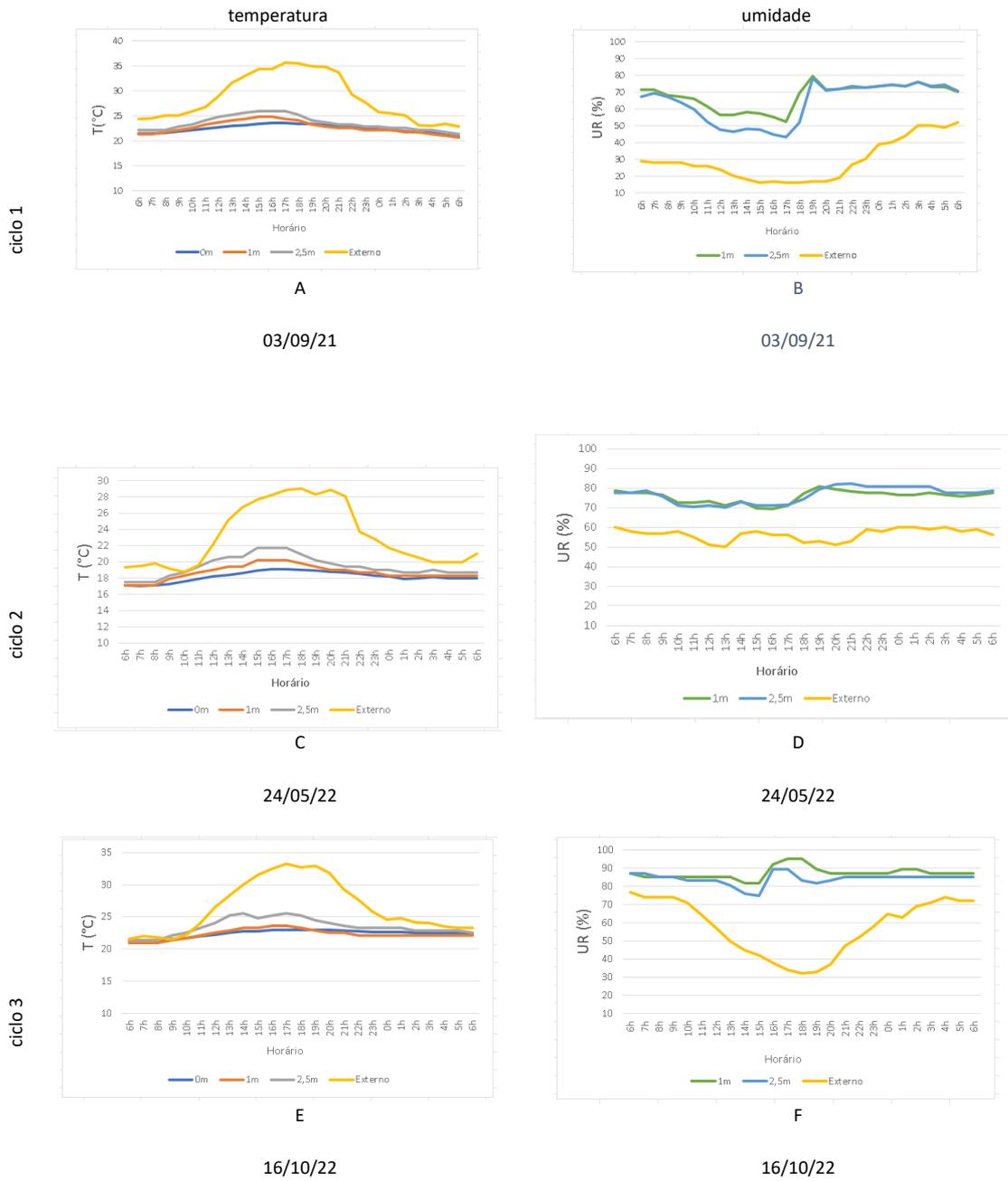
Com esses filtros, a quantidade de dias com dados recorrentes ficou entre 90,48 e 100%, nos 3 ciclos (Tabela 13):

Tabela 13 - Dados recorrentes nos períodos com 400l de rega

ciclo	dia típico	recorrência	obs
		qtde dias semelhantes/qtde dias do período (%)	
1	03/09/21	21/21 (100%)	<ul style="list-style-type: none"> • dispersão de 16°C. • 65% de umidade.
2	24/05/22	19/21 (90,48%)	<ul style="list-style-type: none"> • (chuva anormal 08/06/22). • dispersão de 11°C. • 64% de umidade.
3	16/10/22	19/21 (90,48%)	<ul style="list-style-type: none"> • dispersão de 12°C. • 59% de umidade.

Fonte: Autora.

Figura 33 – Comportamento higrotérmico do período com 400l de rega no primeiro ciclo (a e b), segundo ciclo (c e d) e terceiro ciclo (e e f).



Fonte: Autora.

Tabela 14 - Melhores desempenhos do período de 400l de rega, nos 3 ciclos.

	potencial	real
--	-----------	------

ciclo	Temperatura de bulbo úmida interna potencial (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Temperatura de bulbo seco externa (°C)	Temperatura de bulbo seco interna (°C)	Máximo Ganho de temperatura (°C)	Umidade externa (%)	Umidade interna (%)	Ganho de umidade (%)	Eficiência de resfriamento (%)	Ventos médios (km/h)
1	17,43	51,48	35,5	23,4	-13,2	15	78,6	63,6	66,96	21
2	20,5	69,42	30,6	22,1	-8,5	50	82,5	32,5	84,15	32
3	21,72	66,18	33,9	22,7	-10,2	30	92,8	62,8	73,28	35

Fonte: Autora.

No ciclo 1 o ganho de temperatura médio foi o maior encontrado para o período, com uma diferença de $-13,2^{\circ}\text{C}$ entre a temperatura interna e externa (Figura 33a). A UR interna também atingiu o melhor resultado encontrado no experimento, com um ganho de 63,3% em algumas noites por volta das 20h, conforme observado na Figura 33b. É possível observar um aumento de umidade interna sempre quando a rega termina (Figuras b, d e f em todos os ciclos), sendo mais acentuado quando a umidade externa está abaixo de 50%. Devido à proximidade do resfriador com a mata e o lago, há também um aumento na UR externa no período noturno que não é proveniente de atividade pluviométrica.

O ciclo 2 apresentou condições externas menos favoráveis que no primeiro ciclo, e embora o ganho de temperatura tenha sido muito semelhante, houve uma diminuição entre a diferença de UR interna e externa, resultado menor que o período de 200L/dia, possivelmente devido à UR do ar externo ter sido maior. Apesar do pouco ganho de umidade, observa-se o melhor desempenho de resfriamento do período, possivelmente devido à maior entalpia.

No ciclo 3, com diferença média de $-10,2^{\circ}\text{C}$, apresentando resultados eficientes apesar da alta precipitação que ocorreu no mês de outubro. Isso se deve possivelmente aos outros fatores que se mostraram favoráveis, como as altas temperaturas e baixa UR, alta entalpia, além da maior incidência de ventos registrada em todos os ciclos.

É possível também observar a relação das variantes externas nos resultados, uma vez que na primavera (ciclo 3) há a maior incidência de ventos anual em Campo Grande/MS, chegando a 62,8km/h, com precipitação média de 94mm segundo o INMET, fato este que pode ter influenciado positivamente no processo de resfriamento evaporativo (Figura 25). Durante o inverno (ciclo 1), quando ocorre o menor índice de precipitação média (32mm) é quando obtivemos resultados satisfatórios e esperados, devido ao tempo quente e seco, porém houve pouca influência de ventos devido a menor incidência no período (12km/h). No outono (ciclo 2) ocorreram os piores resultados devido ao alto índice médio de

precipitação (160mm) e baixa incidência de ventos (8km/h), o que aumentou a umidade relativa do ar na maioria dos dias.

4.5 Análise do comportamento higrotérmico

Os dados de eficiência de resfriamento, as variáveis numéricas envolvidas nos três ciclos, os valores encontrados por meio de medição e cálculo (ver método) foram compilados na Tabela 15:

Tabela 15 - Resultados obtidos nos ciclos 1, 2 e 3.

Ciclo 1 (0 litros)	Ciclo 1 (100 litros)	Ciclo 1 (200 litros)	Ciclo 1 (400 litros)
Tbse = 31,2°C	Tbse = 31,8°C	Tbse = 31,2°C	Tbse = 35,5°C
Tbsi = 23,3°C	Tbsi = 20,9°C	Tbsi = 19,7°C	Tbsi = 23,4°C
Tbu = 17,47°C	Tbu = 16,18°C	Tbu = 16,06°C	Tbu = 17,43°C
UR = 60%	UR = 62%	UR = 79%	UR = 81%
H = 51,61kJ/kg	H = 47,57kJ/kg	H = 47,20kJ/kg	H = 51,48kJ/kg
ε = 57%	ε = 69,78%	ε = 79,41%	ε = 66,96%
ΔT = -7,9°C	ΔT = -9,16°C	ΔT = -8,19°C	ΔT = -9,12°C
ΔUR = +15%	ΔUR = +16,69%	ΔUR = +29,87%	ΔUR = +30,21%
Ciclo 2 (0 litros)	Ciclo 2 (100 litros)	Ciclo 2 (200 litros)	Ciclo 2 (400 litros)
Tbse = 32,8°C	Tbse = 32°C	Tbse = 31,5°C	Tbse = 30,6°C
Tbsi = 24,79°C	Tbsi = 24,5°C	Tbsi = 24,1°C	Tbsi = 22,1°C
Tbu = 20,6°C	Tbu = 21,4°C	Tbu = 21,1°C	Tbu = 20,5°C
UR = 56%	UR = 57%	UR = 41%	UR = 51%
H = 81,42kJ/kg	H = 79,24kJ/kg	H = 64,28kJ/kg	H = 69,42kJ/kg
ε = 65,06%	ε = 70,75%	ε = 71,15%	ε = 84,15%
ΔT = -8,01°C	ΔT = -7,5°C	ΔT = -7,4°C	ΔT = -8,5°C
ΔUR = +39%	ΔUR = +23,5%	ΔUR = +39,5%	ΔUR = +32,5%
Ciclo 3 (0 litros)	Ciclo 3 (100 litros)	Ciclo 3 (200 litros)	Ciclo 3 (400 litros)
Tbse = 34,1°C	Tbse = 33,5°C	Tbse = 32,1°C	Tbse = 33,9°C
Tbsi = 21,9°C	Tbsi = 21,5°C	Tbsi = 23,7°C	Tbsi = 24,3°C
Tbu = 17,8°C	Tbu = 18,1°C	Tbu = 23,4°C	Tbu = 20,8°C
UR = 19%	UR = 21%	UR = 27%	UR = 31%
H = 50,29kJ/kg	H = 51,25kJ/kg	H = 61,95J/kg	H = 66,18kJ/kg
ε = 74,84%	ε = 77,92%	ε = 96,55%	ε = 73,28%
ΔT = -11,5°C	ΔT = -12,1°C	ΔT = -10,7°C	ΔT = -10,2°C

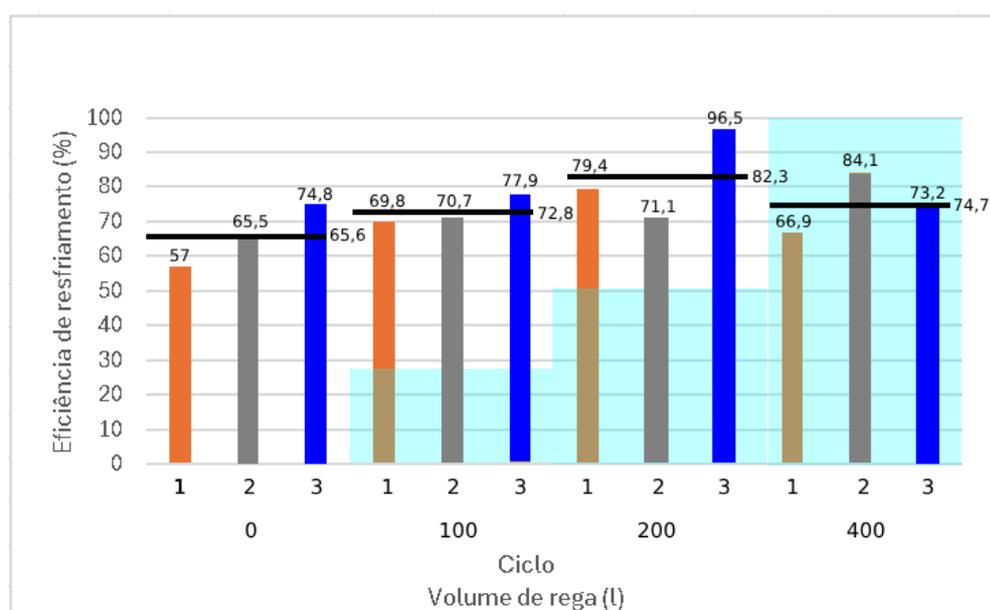
$\Delta UR = +48\%$	$\Delta UR = +53,5\%$	$\Delta UR = +66,4\%$	$\Delta UR = +62,8\%$
---------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Fonte: Autora.

Verificando os resultados obtidos (Tabela 15), é possível ver a relação direta entre o aumento da temperatura de bulbo seco externa e a baixa umidade externa com a eficiência de resfriamento. Também é possível ver a relação entre a quantidade de rega e o aumento da umidade interna, dependendo da entalpia calculada.

Comparando as eficiências de resfriamento médias para todo o experimento, o volume de rega de 200l obteve os melhores resultados entre os quatro, considerando a maior eficiência de resfriamento usando a menor quantidade de água (Figura 34).

Figura 34 - Eficiência de resfriamento nos ciclos 1, 2 e 3 dos volumes de rega 0l, 100l, 200l e 400l.



Fonte: Autora.

Entre os três ciclos (Tabela 15), o ciclo 3 apresentou os melhores resultados nos volumes 0l, 100l e 200l. Esperava-se um aumento da eficiência de resfriamento compatível com o aumento da entrada de água, mas no ciclo 3 com 400L, a eficiência não foi a esperada. Considerando as condições externas favoráveis (alta temperatura de bulbo seco e baixa umidade) juntamente com a baixa entalpia, é possível que o ambiente tenha tido déficit de água para atingir seu melhor comportamento em calor extremo (33,9°C).

Analisando os valores comparados na Figura 34 percebe-se comportamento semelhante do resfriador nos ciclos 1 e 2 e melhora em seu comportamento no ciclo 3. Podemos deduzir pela diferença de entalpia dos experimentos que durante o ciclo 1 havia mais água em sua forma gasosa, principalmente

devido à condicionantes externas que influenciaram no desempenho evaporativo. É possível que no ciclo 1, a maior parte das moléculas de água permaneceram em seu estado líquido, pois os valores de entalpia eram maiores (entendendo-se que se entalpia apresenta baixa variação = a maioria das moléculas do sistema estão em estado gasoso).

Também analisando os valores de entalpia alinhados às condições favoráveis de temperatura alta e baixa umidade relativa do ar externo do ciclo 3, é possível deduzir que houve a maior porcentagem de água evaporada no sistema, resultando nos melhores resultados de diferença de temperatura interna e eficiência de resfriamento.

Comparando a eficiência de resfriamento com outros similares encontrados na literatura (Tabela 16) pode-se chegar a resultados semelhantes, mesmo que estejam expostos a condições diferentes (referências em laboratório e Resfriador do Cerrado a céu aberto).

Tabela 16 – Comparação entre resfriadores evaporativos

autor	eficiência de saturação (ϵ) (%)	diferença de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	umidade relativa (%)
Seweh e Darko (2016)	87,17	2,3	92
Islam e Morimoto (2012)	*	20	50-70
Ambuko (2017)	*	10	80-100
Albano (2011)	*	9	82
Kulkarni e Rajput (2013)	64 a 70	13,02	91
Chinenye (2011)	20 a 92	11	95
Soponpongpipat (2011)	55	7	79
Camargo (2003)	90 a 95	13	75
Yan et al (2021)	82 a 90	5,5	+13,34
De Antonellis et al (2020)	40 a 60	15	+50
Dirpan et al (2018)	73 a 94	2,2	87,2
Ntsoane et al (2019)	80	9,8	96
Birhanu e Belay (2023)	84,50	6,08	52,16
Resfriador do Cerrado (0L)	57 / 65,06 / 74,84	7,9 / 8,0 / 11,5	+15 / +39/ +48
Resfriador do Cerrado (100L)	69,78 / 70,75 / 77,92	9,16 / 7,5 / 12,1	+16,69 / +23,5/ +53,5
Resfriador do Cerrado (200L)	79,41 / 71,15 / 96,55	8,19 / 7,4/ 10,7	+29,87 / +39,5/ +66,4
Resfriador do Cerrado (400L)	66,96 / 84,15 / 73,28	9,12 / 8,5/ 10,2	+30,31 / +32,5/ +62,8

Fonte: Autora.

Esses resultados estão dentro do esperado para o resfriador, que é construído ao ar livre e sujeito à condicionantes externas incontrolláveis e oscilantes. O equipamento aumenta sua eficiência conforme há condições externas mais favoráveis.

4.6 Características térmicas imutáveis

Em relação à pressão atmosférica, todos os ciclos apresentaram pressão atmosférica calculada de 0,94bar, fator este que não se mostrou influenciar nos resultados, uma vez que o resfriador está instalado ao ar livre e não sob condições controladas de laboratório onde seria possível a alteração da pressão para avaliar sua interferência no funcionamento.

Para os cálculos a seguir foram utilizados valores de referência retirados de Clarke (2001). As características térmicas a seguir não são alteradas durante o experimento, uma vez que dependem da composição do resfriador. Os cálculos servem de referência para trabalhos futuros, que podem estudar mudanças na estrutura do resfriador e comparar as características térmicas com o projeto original.

4.7 Capacidade térmica do resfriador

Capacidade térmica ou capacidade calorífica é a grandeza física que determina a relação entre a quantidade de calor fornecida a um corpo e a variação de temperatura observada neste (ABNT NBR 15220, 2005).

$$CT = \rho \times c \times e = \frac{Kj}{m^2K}$$

Sendo:

ρ = Densidade de massa aparente (kg/m³)

c = Calor específico (kJ/kgK)

e = Espessura da parede (m)

$$CT = 1200 * 0,58 * 2 * 0,41$$

$$CT = 556,8 \text{ KJ/m}^2\text{K}$$

4.8 Resistência térmica do resfriador

Resistência térmica define-se como a razão entre o comprimento da seção e a condutividade térmica do material do qual é feita (ABNT NBR 15220, 2005).

$$R = \frac{e}{\lambda} = \frac{m^2K}{W}$$

Sendo:

e = Espessura da parede (m)

λ = Condutividade térmica (W/mK)

$$R = 0,41 / 1,1$$

$$R = 0,37 m^2K/W$$

4.9 Transmitância térmica do resfriador

Transmitância térmica incorpora a condutividade térmica de uma estrutura com a transferência de calor devido à convecção e a radiação (ABNT NBR 15220, 2005).

$$U = \frac{1}{R_{Si} + R + R_{Se}} = \frac{W}{m^2K}$$

Sendo:

R_{Si} = Resistência da Superfície interna (m^2K/W)

R = Resistência térmica da parede (m^2K/W)

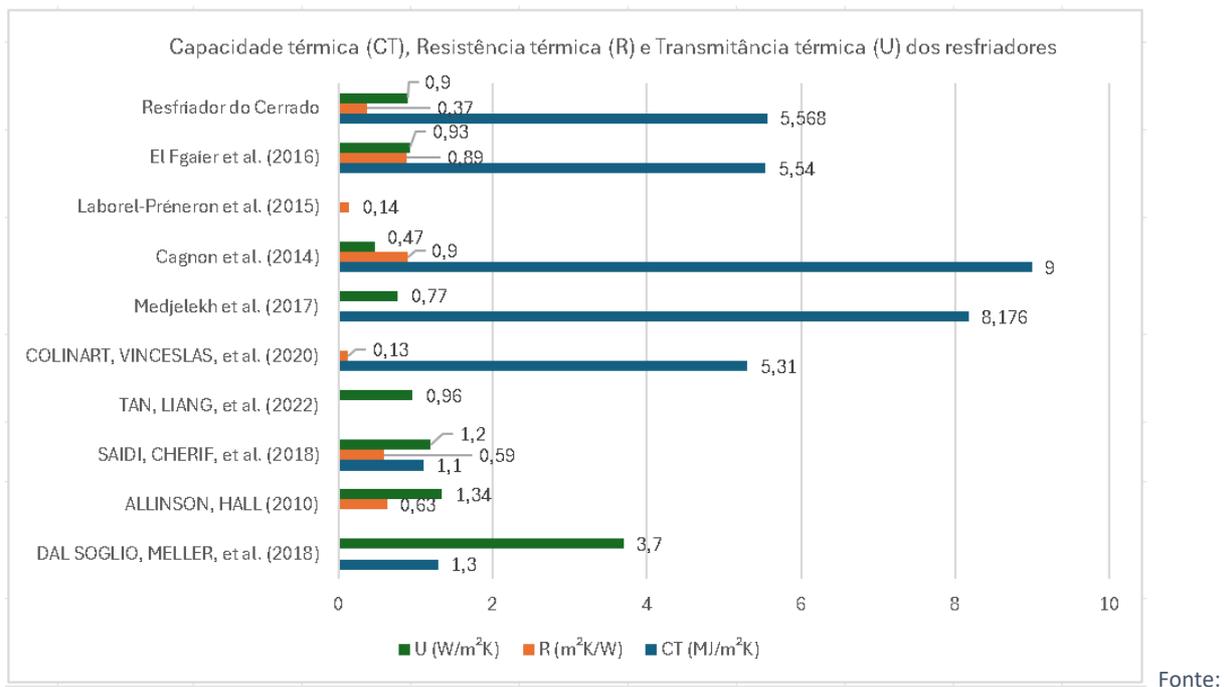
R_{Se} = Resistência da Superfície externa (m^2K/W)

$$U = 1 / 0,37 + 0,37 + 0,37$$

$$U = 0,90 W/m^2K$$

A Figura 35 apresenta os valores encontrados pelos autores da literatura que exploram as três características imutáveis calculadas para o Resfriador do Cerrado:

Figura 35 - Características imutáveis dos resfriadores da literatura comparadas com o Resfriador do Cerrado.



Autora.

A capacidade térmica (CT) é uma característica que depende da espessura da parede do resfriador, por isso há uma grande diferença entre autores na literatura. Por este motivo, o trabalho que mais se assemelha ao resultado obtido com o resfriador do Cerrado é o de El Fgaier et al (2016), que trabalhou com paredes de adobe de várias espessuras.

A resistência térmica (R) encontrou resultados parecidos com a literatura, pois apesar de também depender da espessura da parede utilizada, pressupõe a condutividade térmica do adobe que pode sofrer pequenas variações a depender do tipo de solo, porém ainda se encontram resultados parecidos.

A transmitância térmica (U) apresentou resultados parecidos com a maioria da literatura, havendo variações devido às resistências das superfícies internas e externas à parede de adobe.

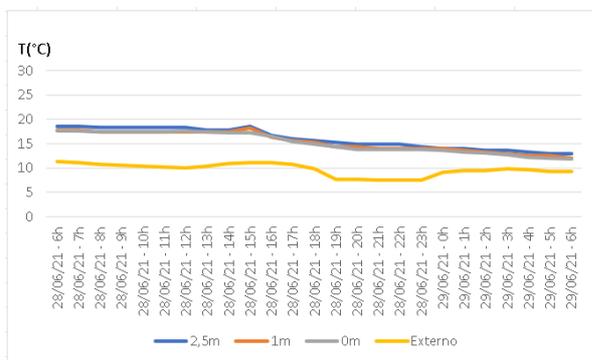
Apesar de haver variação na literatura devido às características físicas locais de cada solo e experimento, os resultados obtidos pelo Resfriador do Cerrado estão dentro dos encontrados na literatura.

4.10 Eventos anormais

Durante os períodos sem água e 100l do primeiro ciclo houve quatro dias (18/06/21, 19/06/21, 28/06/21 e 29/06/21) que apresentaram condições climáticas anormais devido ao fenômeno La Niña¹ (INMET, 2021), dados estes que foram desconsiderados nos cálculos de desempenho pois foram caracterizados como fora da normalidade dos dados.

Durante o fenômeno, ocorreu um resfriamento anômalo das águas do oceano pacífico, sendo responsável por chuvas fortes seguidas de uma frente fria vinda do sul do Brasil. Observou-se no dia 28/06/21 especificamente uma queda vertiginosa da temperatura externa, passando de 30°C para 10°C em 24 horas (Figura 36). As temperaturas internas do resfriador também diminuíram, mas com menor velocidade, resultados da inércia térmica inerente às construções de adobe. Esses resultados podem estabelecer a resposta transitória do resfriador às variações nas condições climáticas predominantes, que é como o resfriador se comporta às mudanças temporárias do ambiente externo.

Figura 36 - Evento anormal de queda de temperatura.

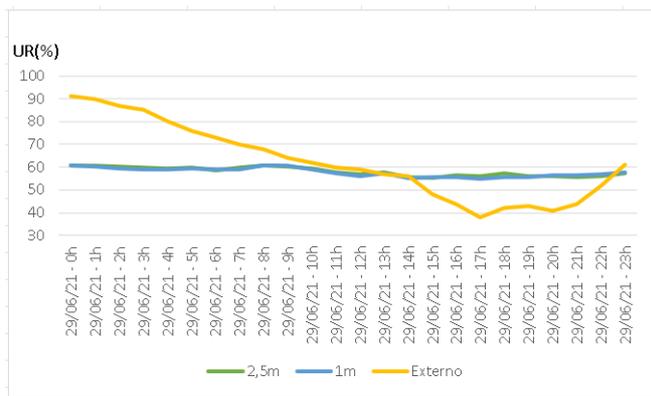


Fonte: Autora.

No dia seguinte ao fenômeno, observou-se também uma variação significativa da umidade relativa externa ao longo do dia, de 90% a 40%, quando comparada à umidade interna do resfriador que foi preservada em 60% ao longo do dia (Figura 37). Durante este período a temperatura de bulbo úmido foi de 3,58°C e entalpia de 16,80kJ/kg, podendo configurar uma maior porcentagem de água no estado líquido que não conseguiu evaporar devido a esses dois fatores.

¹ consiste em uma diminuição da temperatura superficial das águas do Oceano Pacífico Tropical Central e Oriental e sua ocorrência gera uma série de mudanças significativas nos padrões de precipitação e temperatura ao redor da Terra.

Figura 37 - Evento anormal de umidade



Fonte: Autora.

Essas condições climáticas extremas não representam o clima normal esperado para o período no local, e por esse motivo esses dados foram excluídos da análise de desempenho geral por serem considerados *outliers* estatísticos. No entanto, eles foram importantes para simular o comportamento do resfriador do cerrado frente a mudanças extremas de temperatura, mostrando um grande potencial de inércia térmica capaz de proteger seu interior de condições climáticas anormais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi realizado para avaliar o desempenho térmico do Resfriador do Cerrado, observando a influência das condições climáticas e o papel do adobe no desempenho. Dando continuidade ao estudo de Davalo, este trabalho foi necessário para a construção de um banco de dados mais preciso sobre o comportamento do Resfriador do Cerrado

Metodologicamente, neste trabalho foi incluído o tratamento dos dados para diminuir os ruídos no processo de análise dos resultados. Isso foi um diferencial em relação ao trabalho realizado por Davalo, e que permitiu a escolha do dia típico com mais precisão. É relevante, dada a quantidade de variáveis envolvidas no desempenho do resfriador, que é exposto ao clima natural.

Quanto ao desempenho, observou-se que o resfriador evaporativo pode manter a temperatura interna mais baixa e a umidade relativa interna mais alta em comparação com a temperatura externa em todas as circunstâncias, mesmo funcionando sem rega.

Os três ciclos revelaram que o ganho de temperatura (temperatura interna - temperatura externa) foi maior, à medida que a temperatura externa aumentou, mostrando uma temperatura interna quase estável apesar da variação da temperatura externa, mas com maior eficiência de resfriamento quando a temperatura é alta e a umidade relativa é baixa.

A entalpia apresentou variação na comparação dos quatro períodos do ciclo 1 com o 2, evidenciando que houve mais água evaporada do que absorvida no colchão úmido no ciclo 1 Já no ciclo 3, os cálculos mostraram mais água evaporada do que os outros 2 ciclos.

O melhor desempenho foi constatado no ciclo 3, quando se alcançou a maior diferença de temperatura (12,1°C) com 100l de rega, maior ganho de umidade (66,4%) e maior eficiência de resfriamento (96,5%) com 200l de rega.

O volume de rega mais promissor foi o de 200l, que proporcionou a maior eficiência de resfriamento com o menor uso de água em todos os ciclos. Os resultados com 400l de rega, diferentemente do esperado não superaram os de 200l, além de constituir o dobro de recursos hídricos.

Como esperado, os resultados mais promissores foram observados quando há baixa umidade do ar externo e alta temperatura de bulbo seco externo, porém conjectura-se que a alta incidência de ventos pode ter influenciado na potencialização do resfriamento evaporativo, necessitando de estudos futuros que explorem essa possibilidade.

Foi possível observar um aumento de umidade interna sempre quando a rega termina, sendo mais acentuado quando a umidade externa está abaixo de 50%, esse fenômeno pode indicar um incremento no desempenho do resfriador pelo uso de adobes, uma vez que os materiais terrosos são conhecidos pela sua capacidade higroscópica.

As trocas de calor e massa são tão significativas para o comportamento higrotérmico que mesmo uma pequena mudança na composição do material pode afetar seu desempenho e conforto térmico. Por isso são encontradas tantas lacunas em estudos envolvendo o comportamento higrotérmico de materiais terrosos. Durante este estudo não foi possível coletar evidências do quanto o comportamento higroscópico do adobe influenciou o desempenho do resfriador, mas deduz-se que o bom desempenho nos períodos que o resfriador funcionou sem rega foi devido a esse comportamento. Assim, este seria outro estudo futuro, incluindo equipamentos específicos.

A descrição mais detalhada do fenômeno possibilita estudos futuros utilizando simulação computacional que emulem o funcionamento do resfriador do Cerrado digitalmente por meio de modelos com controle das variáveis naturais. Assim, as simulações possibilitarão uma investigação mais precisa do comportamento higrotérmico em variadas situações climáticas, permitindo delinear com mais precisão as condicionantes necessárias para o melhor desempenho do resfriador.

Assim, foi possível com a realização deste trabalho conjecturar sobre a utilização de equipamentos de resfriamento evaporativo feitos em adobe com o intuito de melhorar as condições de armazenamento pós-colheita de comunidades em situação de vulnerabilidade, diminuindo assim sua condição de insegurança alimentar.

REFERÊNCIAS

ABARANJI, S., PANCHABIKESAN, K., RAMALINGAM, V. "Experimental investigation of a direct evaporative cooling system for year-round thermal management with solar-assisted dryer", *International Journal of Photoenergy*, v. 2020, 2020. DOI: 10.1155/2020/6698904. .

ALBANO, E. E. Design, construction and testing of an evaporative cooling barn for storing sweet potatoes in the tropics. *Asian Journal of agricultural research*, 115-126, 2011.

ALKAN, S. N., YAZICIOGLU, F. "Hygrothermal performance assessments of traditional timber-framed houses in Turkey by numerical analysis", *International Journal of Energy Production and Management*, v. 6, n. 2, p. 143–156, 2021. DOI: 10.2495/EQ-V6-N2-143-156.

Allinson, D. & Hall, M., 2010. Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK. *Energy and Buildings*, 42(6), pp.845–852.

AMBUKO, J.; WANJIRU, F.; CHEMINING'WA, G.N.; OWINO, W. O.; MWACHONI, E. Preservation of Postharvest Quality of Leafy Amaranth (*Amaranthus* spp.) Vegetables Using Evaporative Cooling. *Journal of Food Quality*, 2017.

ANAMI, J. M. Impacto do retardo do resfriamento e da atmosfera modificada ativa sobre a manutenção da qualidade de morangos 'San Andreas'. Dissertação de mestrado UFSC. 104p, 2019

Arrigoni et al., "Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilisation: an experimental investigation," *Build. Environ.*, vol. 115, pp. 358–367, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.01.034.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575 - Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

BACA, M. I., TUR, M. S., GONZALEZ, N. J., *et al.* "Evaporative Cooling efficiency according to climate conditions", *Procedia Engineering*, v. 21, p. 283–290, 2011. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2016>.

BARBIERI et al. Inovação e Sustentabilidade: novos modelos e proposições. *RAE - Revista de Administração de Empresas*, 2010. Vol.50, nr.2, pp.146-154.

BESTRATEN, Sandra; HORMIAS, Emilio; ALTEMIR, Anna. Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la Construcción*, v. 63, n. 523, p. 5-20, 2011.

BIRHANU, G. A., BELAY, A. N. "Enhancing the shelf life of injera: Design of an evaporative cooler clay chamber derived from local clay in Bahir Dar, Ethiopia", *Design Science*, v. 9, p. 1–23, 2023. DOI: 10.1017/dsj.2023.6.

BOUKHELF, F., TRABELSI, A., BELARBI, R., *et al.* "Experimental and numerical modelling of hygrothermal transfer: Application on building energy performance", *Energy and Buildings*, v. 254, p. 111633, 2022. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111633. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111633>.

BUARQUE, Cristovam. Tecnologia apropriada: uma politica para la banca de desarrollo de America Latina. Lima, Asociación Latinoamericana de Instituciones Financieras de Desarrollo, 1983.

BUENO, B.S. Mecânica dos solos. São Carlos: Departamento de Geotecnia, EESC/USP, v. 1, 132 p., 1979.

BUTTON, S. T. "Universidade Estadual De Campinas Faculdade De Engenharia Mecânica Engenharia Mecânica Metodologia Para Planejamento Experimental Prof . Dr . Sérgio Tonini Button Campinas - Agosto / 2005", 2012. .

COSTANTINI ROMERO, A. B., FRANCISCA, F. M., GIOMI, I. "Hygrothermal properties of soil–cement construction materials", *Construction and Building Materials*, v. 313, n. October, p. 1–9, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125518. .

DAL SOGLIO, C. R., MELLER, B. J., OLINGER, M. S., *et al.* "Avaliação das propriedades térmicas de tijolos de terra crua (adobes)", *ENTAC 2018 XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, v. 15575, p. 1124, 2018. .

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução*. LTC, v. 8º Edição, 2012.

CAMARGO, J. R. "Sistemas De Resfriamento Evaporativo E Evaporativo-Adsorativo Aplicados Ao Dados Curriculares", *Universidade Estadual Paulista*, p. 140, 2003.

CANCELA, Diana Carina Pereira. Comportamento higrotérmico e monitorização de construções em adobe. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.

Cagnon, H.; Aubert, J.E.; Coutand, M.; Magniont, C. Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy Build.* 2014, 80, 208–217.

CATTANEO, A., SÁNCHEZ, M. V., TORERO, M., VOS, R. Reducing food loss and waste: Five challenges for policy and research. *Food Policy*, v. 98, 101974, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101974>.

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.

CHERONO, K., SIBOMANA, M., WORKNEH, T. S. "Effect of infield handling conditions and time to pre-cooling on the shelf-life and quality of tomatoes", *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 21, 2018. DOI: 10.1590/1981-6723.01617. .

CHINENYE, N. M. "Development of clay evaporative cooler for fruits and vegetables preservation", *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, v. 13, n. 1, 2011.

Clarke, J.A., 2001. *Energy Simulation in Building Design*. 2nd edition. Oxford, England: Butterworth-Heinemann.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMMAD). *Nosso futuro comum*. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991.

Corrêa, Andréa et al. *AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO ADOBE (TIJOLO DE TERRA CRUA)*, 2005

Corrêa, Andréa. *AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO ADOBE (TIJOLO DE TERRA CRUA)*, 2003.

COSTA, Heloína Nogueira. *AVALIAÇÃO DE TIJOLOS DE ADOBE COM ADIÇÃO DE CINZAS E FIBRAS DO COCO*. ENTAC, 2014.

COSTANTINI ROMERO, A. B., FRANCISCA, F. M., GIOMI, I. "Hygrothermal properties of soil–cement construction materials", *Construction and Building Materials*, v. 313, n. October, p. 1–9, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125518. . (COSTANTINI ROMERO, FRANCISCA, *et al.*, 2021)

Croucher, M. (2011). Potential problems and limitations of energy conservation and energy efficiency. *Energy Policy*, 39, 5795-5799. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.011>

DAGNINO, R. "“Ciência e tecnologia para a cidadania” ou Adequação Sociotécnica com o Povo?", *Tecnologia Social: contribuições conceituais e metodológicas*, p. 89–112, 2014. DOI: 10.7476/9788578793272.0006.

DAVALO, K. M. Câmara de refrigeração evaporativa como estratégia auxiliar ao desenvolvimento sustentável de comunidades remotas; Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2021.

DA PONTE, Maria Manuel Correia Costa. Arquitetura de terra: o desenho para a durabilidade das construções. Dissertação - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. 2012.

DAL SOGLIO, C. R., MELLER, B. J., OLINGER, M. S., *et al.* "Avaliação das propriedades térmicas de tijolos de terra crua (adobes)", ENTAC 2018 XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 15575, p. 1124, 2018. .

DE ANTONELLIS, S., CIGNATTA, L., FACCHINI, C., *et al.* "Effect of heat exchanger plates geometry on performance of an indirect evaporative cooling system", Applied Thermal Engineering, v. 173, n. March, p. 115200, 2020. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115200. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115200>.

DIRPAN, A., SAPSAL, M. T., SYARIFUDDIN, A., *et al.* "Quality and Storability of Mango During Zero Energy Cool Chamber (ZECC)", International Journal of Agriculture System, v. 6, n. 2, p. 119, 2018. DOI: 10.20956/ijas.v6i2.1504. .

El Fgaier, F.; Lafhaj, Z.; Antczak, E.; Chapiseau, C. Dynamic thermal performance of three types of unfired earth bricks. Appl. Therm. Eng. 2016, 93, 377–383.

ENTEICH, G.; AUGUSTO, A. Suelo-cimento su application en la edificacion. Bogotá, Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento, 1963. 99 p.

FABBRI, A., SOUDANI, L., MCGREGOR, F., *et al.* "Analysis of the water absorption test to assess the intrinsic permeability of earthen materials", Construction and Building Materials, v. 199, p. 154–162, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.014.

FAO, IFAD, UNICEF, *et al.* The State of Food Security and Nutrition in the World 2020. Transforming food systems for affordable healthy diets. [S.l: s.n.], 2020.

FEENBERG, Andrew. Teoria Crítica da Tecnologia: um panorama. Tailor-Made BioTechnologies, vol.1, no.1, Abril-Maio, 2005. Disponível em: http://www.rohan.sdsu.edu/faculty/feenberg/feenberg_luci.htm. Acesso em: 01/09/2009.

FROTA, Anésia B.; SCHIFFER, Sueli R. Manual de conforto térmico 5. ed. — São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GIUFFRIDA, G., CAPONETTO, R., NOCERA, F. "Hygrothermal properties of raw earth materials: A literature review", Sustainability (Switzerland), v. 11, n. 19, 2019. DOI: 10.3390/su11195342.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GRAEML, Alexandre R. "Tecnologia Adequada" - Anais do XVI ENEGEP (Encontro Nacional de Engenharia de Produção) – Piracicaba, outubro de 1996.

HAZELTINE, B. Field Guide to Appropriate Technology. Brown University, 2003.

Heathcote, K. The thermal performance of earth buildings. In Informes de la Construcción Vol.63, 523, 117-126. Ist. Eduardo Torroja. Espanha, 2010

HE, Y., HUANG, H., LI, D., SHI, C., WU, S.J. Quality and operations management in food supply chains: a literature review, Journal of Food Quality, pp. 1-14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/7279491>.

IBGE. In: Instituto brasileiro de geografia e estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>> Acesso em 08 de junho de 2021.

ISLAM, M. P. Storage behavior of tomato inside a zero-energy cool chamber. Agric Eng Int: CIGR Journal, Vol. 14, No.4, p.209, 2012.

ISLAM, M. P., MORIMOTO, T. "Zero energy cool chamber for extending the shelf-life of tomato and eggplant", Japan Agricultural Research Quarterly, v. 46, n. 3, p. 257–267, 2012. DOI: 10.6090/jarq.46.257. .

JEDERMANN, R., NICOMETO, M., UYSAL, I., LANG, W. Reducing food losses by intelligent food logistics. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, 78 Physical and Engineering Sciences, v. 372, 20130302, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0302>

JEDYN, Felipe. Revisão de Estrutura Atômica e Ligação Interatômica e Introdução aos Materiais Cerâmicos. DEMEC, UFPR., S.D.

JOHN V. M. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. G Isaia, editor. IBRACON, 2017.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo: University of São Paulo, 2000.

KARICKHOFF, Samuel. OPTICAL ABSORPTION SPECTRA OF CLAY MINERALS. Pergamon Press, 1973.

KULKARNI, R. K., RAJPUT, S. P. S. "Comparative Performance Analysis of Evaporative Cooling Pads of Alternative Configurations and Materials", International Journal of Advances in Engineering & Technology, v. 6, n. 4, p. 1524–1534, 2013.

KUNZELI, H.M.; KIESSL, K. Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. Int. J. Heat Mass Transf. 1996, 40, 159–167.

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.

Laborel-Préneron, A.; Aubert, J.E.; Magniont, C.; Bertron, A. Influence of Straw Content on the Mechanical and Thermal Properties of Bio Based Earth Composites. In Proceedings of the First International Conference on Bio-based Building Materials, Clermont-Ferrand, France, 22–24 June 2015.

LABOREL-PRÉNERON, A., MAGNIONT, C., AUBERT, J. E. "Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition", *Energy and Buildings*, v. 178, p. 265–278, 2018. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.08.021.

LAL BASEDIYA, A.; SAMUEL, D. V. K.; BEERA, V. Evaporative cooling system for storage of fruits and vegetables - a review. Association of Food Scientists & Technologists. India, 2011.

LIU, Y. H., LYU, E. L., RAHMAN, M. M., *et al.* "Numerical simulation on temperature and relative humidity in zero energy cool chamber", *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 10, n. 3, p. 185–193, 2017. DOI: 10.3965/j.ijabe.20171003.3050. .

Liuzzi, S., Hall, M. R., Stefanizzi, P., & Casey, S. P. (2013). Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. *Building and Environment*, 61,82–92.

LV, J., XU, H., ZHU, M., *et al.* "The performance and model of porous materials in the indirect evaporative cooling system: A review", *Journal of Building Engineering*, v. 41, n. January, p. 102741, 2021. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102741. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102741>.

MAIA, Leonardo. O Conforto da habitação de terra. In: V Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, Viçosa – MG, 2014.

MARQUES, Luisa. Investigação sobre o comportamento térmico do adobe para as necessidades climáticas e normativas brasileiras. UFMG, 2018.

MÁXIMO, L. M. A Agenda 2030 de desenvolvimento da ONU: os desafios e potencialidades dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável para o continente africano. *Revista Perspectiva*. Paraíba, 2015.

MCGREGOR, F., MAUFFRÉ, T., FORCE, M. S., *et al.* "Measurement of the water vapour permeability of earth plasters using small-scale wind tunnels under variable air flow regimes", *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 55, n. 4, 2022. DOI: 10.1617/s11527-022-01950-8.

MERCIER, S., VILLENEUVE, S., MONDOR, M., UYSAL, I. Time–Temperature Management along the food cold chain: a review of recent developments. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 16, n. 4, 647–667, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12269>.

MOH, T. S. Y., JIN, J. J. Y., WONG, L. A., *et al.* "Wind-induced evaporative cooling passive system for tropical hot and humid climate", n. April, p. 1–10, 2023. DOI: 10.3389/fmech.2023.1069806.

Montgomery, D.C. (1991) *Design and Analysis of Experiments*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.

MOSSIN, N., STILLING, S., BØJSTRUP, T. C., *et al.* "An Architectural Guide to the UN 17 Sustainable Development Goals", p. 158, 2018. Disponível em: <https://adk.elsevierpure.com/en/publications/an-architecture-guide-to-the-un-17-sustainable-development-goals>.

MUHEISE-ARAALIA, D., PAVIA, S. "Properties of unfired, illitic-clay bricks for sustainable construction", *Construction and Building Materials*, v. 268, p. 121118, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121118. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121118>.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. "Glossário de termos do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12: Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis", Nações Unidas Brasil, p. 36, 2021.

NARLOCH, P., PIĄTKIEWICZ, W., PIETRUSZKA, B. "The effect of cement addition on water vapour resistance factor of rammed earth", *Materials*, v. 14, n. 9, 2021. DOI: 10.3390/ma14092249.

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.

NOVAES, Henrique Tahan. *O fetiche da tecnologia: a experiência das fábricas recuperadas*. 1 ed. – São Paulo: Expressão Popular, 2007.

NTSOANE, M. L., JALALI, A., RÖMER, J., *et al.* "Performance evaluation of silica gel-water adsorption based cooling system for mango fruit storage in Sub-Saharan Africa", *Postharvest Biology and Technology*, v. 149, n. October 2018, p. 195–199, 2019. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2018.12.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.12.004>.

Odesola, I. F., & Onyebuchi, O. (2009). A review of porous evaporative cooling for the preservation of fruits and vegetables. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 10, 935–941.

Oikonomou, V., Becchis, F., Steg, L., & Russolillo, D. (2009). Energy saving and energy efficiency concepts for policy making. *Energy Policy*, 37, 4787-4796. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.035>

OLIVEIRA, O.M. CARACTERIZAÇÃO DE UMA ARGILA DE VITÓRIA DA CONQUISTA – BAHIA, POR ANÁLISE TÉRMICA. CBEC/Mat, 2010.

ORUI, Samantha. Desempenho térmico de habitações construídas com terra. Dissertação. (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, 2015.

PATEL, D. P., JAIN, S. K., LAKHAWAT, S. S., *et al.* "A low-cost storage for horticulture commodities for enhancing farmer's income: An overview on evaporative cooling", *Journal of Food Process Engineering*, v. 45, n. 10, 2022. DOI: 10.1111/jfpe.14134.

Rahul, N., Khilari, K., & Sushma, S. (2015). Challenges in postharvest management of fungal diseases in fruits and vegetables—A review. *South Asian Journal Food Technology and Environment*, 1, 126–130.

RAMANATHAN, K. An integrated approach for the choice of appropriate technology. *Science and public policy*, vol. 21 nº 4, Agosto/1994. págs. 221-232. Beech Tree Publishing.

REMPEL, A. R., REMPEL, A. W. Intrinsic evaporative cooling by hygroscopic earth materials. [S.l: s.n.], 2016. v. 6.

RIANGVILAIKUL, B.; KUMAR, S. "An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system". *Energy and Buildings*, v.42, n.5, p.637-644, 2010.

RODRIGUES, I.; BARBIERI, J. C. A emergência da tecnologia social: revisitando o movimento da tecnologia apropriada como estratégia de desenvolvimento sustentável. *Revista de Administração Pública*, Rio de Janeiro, v. 42, n. 6, p. 1069-1094, 2008.

RORIZ, Victor; RORIZ, Maurício. Resfriamento evaporativo por aspersão de água sobre telhas de fibrocimento em clima semi-úmido. 2008, Fortaleza: ANTAC, 2008.

SAIDI, M., CHERIF, A. S., ZEGHMATI, B., *et al.* "Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks", *Construction and Building Materials*, v. 167, p. 566–577, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063>.

SEWEH, E. A., DARKO, J. O., ADDO, A., *et al.* "Design, construction and evaluation of an evaporative cooler for sweet potatoes storage", *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, v. 18, n. 2, p. 435–448, 2016. .

SCHRODER, Lisa; OGLETREE, Vince. Adobe homes for all climates: simple, affordable, and earthquake-resistant natural building techniques. Chelsea Green Publishing, 2010.

SHAFIEE-JOOD, M., CAI, X. Reducing Food Loss and Waste to Enhance Food Security and Environmental Sustainability. *Environmental Science and Technology*, v. 50, n. 16, 8432–8443, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01993>.

SILVA, A.C.S.B.D. Simulação de resfriamento evaporativo por microaspersão d'água. Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

SILVA, M. L., PINHEIRO, L. T. "- 2018 - RIO DE JANEIRO ANÁLISE DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE UMA", p. 1–10, 2018. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/134053/2/306743.pdf>.

SOPONPONGPIPAT, N., KOSITCHAIMONGKOL, S. "Recycled High-Density polyethylene and rice husk as a wetted pad in evaporative cooling system", *American Journal of Applied Sciences*, v. 8, n. 2, p. 186–191, 2011. DOI: 10.3844/ajassp.2011.186.191.

Statista. In: Statista Magazine. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/266414/unemployed-persons-worldwide/> > Acesso em 08 de junho de 2021.

Taguchi, Genichi, *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*, Tokyo, Asian Productivity Organization, 1986, Tombo 620.0045 T129i – IMECC e BAE.

The James Hutton Institute. Disponível em: <https://www.claysandminerals.com/methods/infraredspectroscopy> >. Acesso em 15/05/21.

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

VOGEL, A. I. *Química Orgânica: Análise Orgânica Qualitativa*; 1ª ed.; Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A, vol. 1, 1977.

WATT, J.R. *Evaporative air conditioning*. The Industrial Press, New York, 1963.

YAN, M., HE, S., GAO, M., *et al.* "Comparative study on the cooling performance of evaporative cooling systems using seawater and freshwater", *International Journal of Refrigeration*, v. 121, p. 23–32, 2021. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2020.10.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.10.003>.