



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

CÂMARA DE RESFRIAMENTO DE ENERGIA ZERO EM ADOBE COMO AUXILIAR AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE COMUNIDADES REMOTAS

Karine Machado Davalo

2022

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

**CÂMARA DE RESFRIAMENTO DE ENERGIA ZERO EM ADOBE COMO
AUXILIAR AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE COMUNIDADES
REMOTAS**

KARINE MACHADO DAVALO

Trabalho de Conclusão de Curso do 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^a. Dr^a. Andrea Naguissa Yuba

CAMPO GRANDE

FEVEREIRO / 2022



FOLHA DE APROVAÇÃO

KARINE MACHADO DAVALO

**Câmara de resfriamento evaporativo de energia zero em adobe
como auxiliar ao desenvolvimento sustentável de comunidades
remotas**

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovada pela Banca Examinadora em 24 de fevereiro de 2022, 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:

Profa. Dra. Andrea Naguissa Yuba - Orientadora

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia

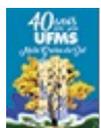
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Profa. Dra. Ana Paula da Silva Milani

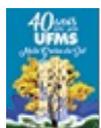
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

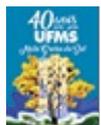
Profa. Dra. Liza Maria Souza de Andrade



Documento assinado eletronicamente por **Andrea Naguissa Yuba, Professora do Magistério Superior**, em 28/03/2022, às 16:26, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula da Silva Milani, Professora do Magistério Superior**, em 29/03/2022, às 10:20, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **LIZA MARIA SOUZA DE ANDRADE, Usuário Externo**, em 31/03/2022, às 12:52, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



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 **3176787** e o código CRC **CB068209**.

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 23104.033999/2020-62

SEI nº 3176787

Dedico esta pesquisa a Deus que me direcionou e sustentou. Que este trabalho sirva como mais um instrumento de sua paz e de promoção da equidade entre os homens.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul e à todos os professores e colegas do Programa de Pós Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade, em especial à minha orientadora, Prof.^a Dra. Andrea Naguissa Yuba por todo o conhecimento compartilhado e que com grande empenho me possibilitou evoluir e apresentar melhor desempenho em todas as fases desta pesquisa; que se mobilizou e mobilizou professores de diferentes laboratórios de pesquisas da UFMS - Canteiro Experimental, BATLAB - Laboratório de Inteligência Artificial, Eletrônica de Potência e Eletrônica Digital e do LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil - para que, de forma voluntária, contribuíssem para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço especialmente aos coordenadores dos laboratórios BATLAB e LMCC, Prof. Dr. João Onofre Pereira Pinto e à Prof.^a Dra. Ana Paula da Silva Milani, que, de forma voluntária, contribuíram com conhecimento, ferramentas, espaço e mobilizaram técnicos e alunos de graduação e pós-graduação no desenvolvimento desta pesquisa; agradeço, também, ao construtor, Sr. Antônio Sales, que empenhou sua mão de obra e ao técnico do Canteiro Experimental, Ronaldo Dias, que ofereceu auxílio em todas as fases da produção dos adobes e da construção do protótipo desta pesquisa.

Sou grata a todos os professores que, ao longo dos anos, compartilharam comigo dos seus conhecimentos e contribuíram com a construção do meu caminho acadêmico e profissional. Em especial, à minha orientadora de mestrado, já citada, e aos professores presentes em minha fase de graduação, Prof.^a Ma. Nathalya Luciano Buges e Prof. Me. Fernando Camilo de Carvalho Junior.

É indispensável agradecer, também, à todos aqueles que contribuíram com a construção do meu caráter, entenderam os meus limites e se alegraram com cada passo das minhas conquistas: minha família, meus amigos e os colegas de trabalho na AGEHAB/MS. Em especial à minha mãe Maria Machado, ao meu filho Miguel Machado Mantovani Silva, à minha irmã Carla Machado Albertini, aos meus tios Reginaldo de Oliveira Junior e Maria Manoela Olmedo Machado, à minha avó materna Candida Olmedo Machado (*in memoriam*) e aos avós paternos do meu filho Neusa Maria Josefa da Silva e José Antonio Silva. Entre os amigos, em especial, à Rebeca Dionizio Chimenes Kunz e à Brenda Araújo Travasso.

*“Se eu não puder fazer coisas grandiosas, posso fazer
pequenas coisas de forma grandiosa.”*

Martin Luther King Jr., 1929 - 1968

RESUMO

A construção de resfriadores evaporativos em comunidades remotas pode contribuir para a aumentar a longevidade de hortaliças, com melhoria da segurança alimentar e economia dos pequenos agricultores, em locais remotos, muito carentes ou sem acesso à energia elétrica. Este trabalho objetivou **projetar, construir e analisar o desempenho de um resfriador evaporativo em escala real para atendimento às condições restritivas de agricultores em locais remotos**. Foi conduzido pelos passos do *Design Science Research* (DSR), a solução consiste de câmara que usa paredes duplas de adobe, preenchidas de areia úmida, para induzir a ocorrência do resfriamento evaporativo. Um protótipo na escala 1:1 foi construído, no qual foram realizados testes iniciais de desempenho no estado seco e úmido, com diferentes volumes de água. Os resultados mostram dados promissores de desempenho. O adobe estabilizado demonstrou ser uma boa escolha para uso no resfriador, mesmo estando sujeita à umidade. A ampliação do volume do resfriador, assim como a forma adotada, demonstraram efetividade. Quanto à eficiência do resfriamento evaporativo, ainda que insipientes, os dados obtidos mostraram que o resfriador, como esperado, tem o seu melhor desempenho nos dias mais quentes e mais secos, reduzindo a temperatura (até 13,24°C de diferença, diante de uma temperatura externa de 40,5°C e interna de 27,26°C) e conseguiu manter a umidade interna entre 53,63% e 92,71%.

Palavras-chave: segurança alimentar, evaporação, tecnologia apropriada, geladeira, refrigerador, construção com terra.

ABSTRACT

The construction of evaporative coolers in remote communities can contribute to increase the longevity of vegetables, with improved food security and economy of small farmers in remote places, very poor or without access to electricity. This work aimed **to design, build and analyze the performance of a full-scale evaporative cooler to meet the restrictive conditions of farmers in remote locations**. It was conducted by the steps of Design Science Research (DSR), and the solution consists of a chamber that uses double adobe walls, filled with wet sand, to induce the occurrence of evaporative cooling. A 1:1 scale prototype was built, in which initial performance tests were carried out in the dry and wet state, with different volumes of water. The results show promising performance data. Stabilized adobe proved to be a good choice for use in the cooler, even though it is subject to moisture. The enlargement of the cooler internal volume, as well as the shape adopted for the cooler, demonstrated their effectiveness. As for the efficiency of evaporative cooling, although insipient, the data obtained show that the cooler, as expected, has its best performance on the hottest and driest days, reducing the temperature (up to 13.24°C difference, with an external temperature of 40.5°C and an internal temperature of 27.26°C) and manages to keep the internal humidity between 53.63% and 92.71%.

Keywords: food safety, evaporation, appropriate technology, refrigerator, cooler, earthen construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 . Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, da Agenda 2030.....	15
Figura 2 . Resfriador evaporativo de parede de tijolos cerâmicos, para aproximadamente 100 kg de frutas e hortaliças, em Bangladesh.....	22
Figura 3 . Comportamento de produtos agrícolas sensíveis e não sensíveis ao frio, em diferentes temperaturas.....	26
Figura 4 . Resfriamento evaporativo direto.....	29
Figura 5 . Resfriamento evaporativo indireto – (a) tipo placa e (b) tipo bulbo.....	29
Figura 6 . Resfriamento evaporativo - sistema de 2 estágios.....	30
Figura 7 . Resfriadores de pote cerâmico.....	31
Figura 8 . Variações do resfriador de pote cerâmico.....	31
Figura 9 . Resfriadores metálicos com porta.....	32
Figura 10 . Câmara de resfriamento evaporativo - ECC.....	33
Figura 11 . Câmara de resfriamento de energia zero de percurso – ZECC.....	34
Figura 12 . ZECC Ehine 1.....	36
Figura 13 . Desempenho de temperatura - ZECC - Ehine 1.....	37
Figura 14 . Rega alternada Ehine 1.....	37
Figura 15 . ZECC Ehine 2.....	38
Figura 16 . Desempenho de temperatura - ZECC - Ehine 2.....	38
Figura 17 . ZECC Ehine 3.....	39
Figura 18 . Desempenho de temperatura - ZECC - Ehine 3.....	40
Figura 19 . Rega contínua e rega otimizada - Ehine 3.....	40
Figura 20 . ZECC Ehine 4, com painel de adsorção solar.....	41
Figura 21 . (a) corte; (b) ar quente e ar úmido; (c) retirada de ar úmido da chaminé por empuxo.....	42

Figura 22 . Componentes do resfriador ZESS.....	43
Figura 24 . Celeiro com resfriamento evaporativo.....	45
Figura 25 . Desempenho de temperatura e umidade do resfriador de juta.....	45
Figura 23 . Resfriador evaporativo de Gana.....	46
Figura 26 . Projeto e construção finalizada do protótipo.....	47
Figura 27 . Componentes físicos do EVC e representação esquemática de funcionamento...	51
Figura 28 . Unidade com resfriamento indireto do ar e resfriamento evaporativo.....	52
Figura 29 . Formatos cilíndrico, retangular e hexagonal de colchões úmidos.....	53
Figura 30 . Processo DSR.....	56
Figura 31 . Características do entorno do resfriador do cerrado.....	60
Figura 32 . Zona Bioclimática 6.....	61
Figura 33 . Carta bioclimática de Campo Grande / MS.....	61
Figura 34 . Fonte da água, posicionamento do temporizador e fluxo da rega.....	66
Figura 35 . Posicionamento dos instrumentos de medição de temperatura e umidade.....	67
Figura 36 . Versão 1 - cilíndrica com cobertura em cúpula.....	71
Figura 37 . Versão 2 - retangular com cobertura abobadada.....	71
Figura 38 . Versão 3 - quadrada com cobertura piramidal.....	72
Figura 39 . Versão 4 – quadrada com cobertura metálica e coifa de lona plástica.....	73
Figura 40 . Aspecto geral do resfriador proposto.....	74
Figura 41 . Versão 4 - composição da 1ª, 4ª e 9ª fiada com contrafortes.....	75
Figura 42 . Instalação hidráulica do resfriador (fonte de água genérica).....	75
Figura 43 . Fabricação e cura dos adobes.....	76
Figura 44 . Escavação de vala para fundação.....	77
Figura 45 . Execução de fundação.....	78

Figura 46 . Execução das paredes duplas.....	78
Figura 47 . Verga e contenções internas.....	79
Figura 48 . Instalação de cobertura e chaminé metálicos.....	79
Figura 49 . Execução da coifa.....	80
Figura 50 . Porta, escada e tubulação em teste da instalação hidráulica.....	80
Figura 51 . Aspecto externo do protótipo do resfriador concluído.....	81
Figura 52 . Variação de temperatura em um dia típico quente (a) e frio (b).....	87
Figura 53 . Medições de temperatura - 90 dias.....	88
Figura 54 . Maiores Δt s por volume de rega.....	89
Figura 55 . Aspecto típico das curvas de umidade, em dia seco e chuvoso.....	91
Figura 56 . Variação de umidade.....	91
Figura 57 . As maiores diferenças de temperatura externa-interna, com umidade, por período de rega.....	92
Figura 58 . Identificação de TBUe do período sem rega e $\Delta t = 8,16^{\circ}\text{C}$	94
Figura 59 . Identificação de TBUe do período com rega de 40 L/dia e $\Delta t = 11,98^{\circ}\text{C}$	95
Figura 60 . Identificação de TBUe do período com rega de 100 L/dia e $\Delta t = 12,03^{\circ}\text{C}$	95
Figura 61 . Identificação de TBUe do período com rega de 200 L/dia e $\Delta t = 13,24^{\circ}\text{C}$	96
Figura 62 . Identificação de TBUe do período com rega de 400 L/dia e $\Delta t = 11,22^{\circ}\text{C}$	96
Figura 63 . Identificação de TBUe do período com rega de 800 L/dia e $\Delta t = 11,26^{\circ}\text{C}$	97
Figura 64 . Aspecto geral do resfriador do cerrado proposto.....	99
Figura 65 . Trincas maiores que 2,0 mm.....	99
Figura 66 . Trincas menores que 1,5 mm.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 . Custos de resfriadores evaporativos.....	85
Tabela 2 . Redução de temperatura por meio de sistema de resfriamento evaporativo tipo colmeia.....	93
Tabela 3 . Maiores Δt_s do resfriador do cerrado comparados com dados do resfriador comercial Basenge.....	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 . Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 6, que inclui Campo Grande/MS.....	61
Quadro 2 . Volume, frequência e duração das regas.....	64
Quadro 3 . Frequência, duração e variáveis medidas nos resfriadores de referência.....	64
Quadro 4 . Custo de materiais para construção do protótipo.....	82
Quadro 5 . Custo das formas para produção de adobe.....	83
Quadro 6 . Locação de equipamentos para construção do protótipo do resfriador.....	84
Quadro 7 . Serviços de terceiros para construção do protótipo do resfriador.....	84
Quadro 8 . Ferramentas para construção do protótipo do resfriador.....	84
Quadro 9 . Eficiência de resfriamento dos modelos da literatura.....	98

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	2
RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	5
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE QUADROS.....	10
1 Introdução.....	15
1.1 <i>Objetivos da pesquisa</i>	17
1.2 <i>Estrutura da dissertação</i>	19
2 Resfriamento evaporativo e modelos de resfriadores.....	21
2.1 <i>Resfriamento evaporativo para conservação de alimentos</i>	21
2.2 <i>Modelos de resfriadores evaporativos</i>	30
2.3 <i>Outros modelos de resfriadores evaporativos</i>	51
2.4 <i>Considerações sobre os modelos identificados na literatura</i>	54
3 Método.....	56
3.1 <i>Identificação do problema</i>	57
3.2 <i>Identificação das soluções</i>	57
3.3 <i>Concepção da solução</i>	57
3.4 <i>Construção do protótipo</i>	58
3.5 <i>Validação da solução</i>	58
4 Resultados obtidos.....	70
4.1 <i>A concepção da câmara de resfriamento evaporativo</i>	70
4.2 <i>A construção do protótipo</i>	76
4.3 <i>Desempenho resfriativo</i>	86
4.4 <i>Observação do desempenho da construção durante as regas</i>	98
4.5 <i>Discussão dos resultados obtidos</i>	101

5 Considerações finais.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
APÊNDICE A: CÁLCULO DA QUANTIDADE DE TERRA, CIMENTO E CAL PARA PRODUÇÃO DOS ADOBES E ARGAMASSA.....	109
APÊNDICE B: ACOMPANHAMENTO DIÁRIO DA PRODUÇÃO DE ADOBES.....	111
APÊNDICE C: ENSAIOS DOS ADOBES EM LABORATÓRIO.....	113

1 INTRODUÇÃO

A população atual do mundo é de 7,7 bilhões e a perspectiva é de que seremos 9,7 bilhões até 2050 (ONU, 2019). Esse aumento da população mundial tem várias consequências, sendo uma delas, a necessidade de produção de mais alimentos.

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura - FAO tem alertado sobre o impacto desse crescimento populacional na produção de alimentos desde 1983 (NDUKWU, MANUWA, 2014). Nesse assunto, os povos que vivem nos países com IDH baixo são os mais vulneráveis. Dada a severidade do problema, constitui o segundo dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 (ONU, 2018) (Figura 1).

Figura 1. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, da Agenda 2030.



Fonte: ONU (2019).

A necessidade do aumento da produção de alimentos resulta não só da falta, mas também do desperdício que ocorre entre as etapas de produção e distribuição, até chegar ao consumidor final (ISLAM; MORIMOTO, 2014). Alguns autores apresentam dados referentes a este *déficit*:

- Ndukwu e Manuwa (2014) afirmam que no sudoeste da Ásia, as perdas pós-colheita podem variar de 10% a 50%, dependendo do país, e que na África, as perdas pós-colheita foram estimadas em até 80% (sem registros oficiais destes dados), afetando diretamente a geração de renda do pequeno produtor do campo;
- Islam e Morimoto (2012) apresentam a taxa de perda no pós-colheita de tomate e berinjela em 26% em Bangladesh, desde a colheita no campo até a chegada para o

consumidor. E, em contrapartida, a taxa nacional de consumo de vegetais folhosos é de 23g, juntamente com 89g de vegetais não folhosos e 14g de frutas. Isso está abaixo das taxas nutricionais recomendadas, pois o consumo médio de frutas e vegetais totaliza apenas 126g/dia, sendo o ideal o consumo diário mínimo de 400g, recomendado pela FAO e pela Organização Mundial da Saúde;

- Lal Basediya, Samuel e Beera (2011) dizem que a Índia é o terceiro maior produtor de frutas e legumes no mundo, perdendo apenas para o Brasil e a China (ANON, 2010, apud LAL BASEDIYA; SAMUEL; BEERA, 2011). A produção corresponde à 209,72 MT, dos quais 73,53 MT e 136,19 MT são frutas e vegetais, respectivamente. Porém, o desperdício é de cerca de 30 a 35% de frutas e vegetais nas fases da colheita, armazenamento, classificação, transporte, embalagem e distribuição. Apenas 2% da produção permanece apta a comercialização, por ser um país tropical, com alta taxa de umidade. Somada à ausência de resfriamento da produção, são circunstâncias que freiam o crescimento econômico do país, que tem potencial para ser uma importante indústria alimentícia.

Quando se discute o aumento da escala da produção de alimentos, é necessário planejar o adequado armazenamento após a colheita de produtos agrícolas. Países desenvolvidos utilizam o resfriamento convencional na manipulação pós-colheita de hortifrúteis perecíveis. No entanto, a maioria dos pequenos agricultores de países mais pobres não têm acesso a resfriadores convencionais (AMBUKO et al., 2017) porque, em muitos casos, também não têm acesso à energia elétrica.

Para reverter as consequências ligadas diretamente a ausência de resfriamento da produção do campo desses países, a FAO defendeu em 1983, o princípio de resfriamento evaporativo, por ser um tipo de armazenamento de baixo custo e energeticamente econômico, para lugares com condições climáticas favoráveis ao seu funcionamento. Em 1999, o Banco Mundial também reconheceu os benefícios do resfriamento evaporativo, que apresenta ainda mais vantagens, tais como a possibilidade de utilização de materiais e mão de obra locais, apresentando custos acessíveis aos agricultores com baixa renda (NDUKWU; MANUWA, 2014; SOPONPONGPIPAT; KOSITCHAIMONGKOL, 2011).

Diante da possibilidade de uso do resfriamento evaporativo para o armazenamento da produção de frutas e vegetais, surgiram as perguntas formuladas para este estudo:

- a partir dos resultados já alcançados em experimentos sobre o resfriador evaporativo, quais adaptações podem ser feitas para gerar um modelo que seja mais adequado ao contexto de ambientes com condições adversas?
- considerando que construir um resfriador completo por habitação teria alto custo de implementação, qual o custo de aumentar o volume de armazenamento para atender uma comunidade? Haveria perda de eficiência?
- considerando a necessidade de buscar matéria-prima de fácil obtenção e de menor custo, poderiam ser utilizados terra ou areia como materiais de construção? Adobe e areia funcionariam como colchão úmido?

1.1 Objetivos da pesquisa

A concepção de um produto para aplicação num contexto adverso precisa ser munida de resiliência. O produto (resfriador) em situação que não seja a ideal, precisa se recobrar ou se adaptar de forma independente, assim como a tecnologia que a define (o resfriamento evaporativo) e não o contrário (mudar as condições do ambiente para se adaptar à tecnologia).

A adaptação para resiliência precisa considerar as condições inerentes aos locais em que será aplicada, para aumentar as chances de sucesso, e isso abrange várias facetas:

- Prever condições de construção e, principalmente, de realizar manutenções;
- Prever e lidar com os reveses ambientais;
- Ser imune aos reveses sócio-políticos no ambiente onde está implantado;
- O mais importante: perceber as características do contexto como elementos a combinar e não apenas como dificuldades a combater.

Nesse propósito, ainda que se quisesse trabalhar o conceito de tecnologia social (na interação com as comunidades), o termo mais apropriado identificado para o processo deste projeto foi a de “tecnologia apropriada”, trabalhado por variados autores, entre eles, Ernst

Schumacher, Cristovam Buarque (DA ROSA, 1989; GARCIA, 1987), mesmo com todas as críticas a que o termo (e o contexto no qual foi desenvolvido), está sujeito.

O termo “tecnologia apropriada” é uma maneira de pensar na escolha da tecnologia, ou seja, pensar nos tipos de recursos, na escala tecnológica e na complexidade da tecnologia, mais do que em uma “forma concreta da tecnologia”, de acordo com Hazeltine; Bull apud Yue e Ashraf (2018). Esse movimento, chamado também de tecnologia “intermediária” (SCHUMACHER, 1976, apud YUE, ASHRAF, 2018) critica a ênfase dada à produção em larga escala, que se caracteriza pela desconsideração dos recursos naturais e mão de obra disponíveis e que evidencia desigualdades sociais e econômicas.

O conceito de tecnologia apropriada começa a ser aplicado quando o aspecto social é analisado com maior relevância, em busca do desenvolvimento sustentável e do bem estar coletivo. Na busca por justiça e equidade social se convergem e se combinam diferentes aspectos (econômicos, sociais, ecológicos e culturais) para o desenvolvimento da tecnologia (GARCIA, 1987).

Suas principais características, presentes em Hazeltine; Bull apud Yue e Ashraf (2018) são:

- Solução de pequena escala, combinada com a cultura e os interesses da população local;
- dispõe de tecnologia disponível localmente, com foco em solução simples, robusta e adaptável e que possibilita uso sem conhecimento prévio específico;
- gera inovações para tornar a solução mais sustentável;
- tem baixo custo;
- é intensiva em mão de obra, envolve trabalho cooperativo, cria oportunidade de trabalho local, com contribuição para desenvolvimento econômico da comunidade local;
- é autônoma; propicia automanutenção e capacitação do usuário; não há incidência de direitos de propriedade intelectual, taxas de consultoria, direitos de importação etc.; é descentralizada; é *open source*;

Atribuir os princípios desejáveis para o desenvolvimento de uma tecnologia apropriada, configura-se uma oportunidade para uma futura evolução para “tecnologia

social” para “transcender fronteiras disciplinares” (Garcia, 2014, p. 257 apud Duque e Valadão, 2017) e promover “construção de soluções de modo coletivo pelos que irão se beneficiar dessas soluções e que atuam com autonomia” (Rodrigues e Barbieri, 2008, p. 1075 apud Duque e Valadão, 2017).

Ou ainda, evoluir para a conceituação mais recente, citada por Duque e Valadão (2017): tecnologia social com “adequação sociotécnica”, possibilitando a reaplicação de uma tecnologia em diferentes comunidades.

Tendo essas condições como pano de fundo, são lançados os seguintes objetivos para este trabalho:

1.1.1 Objetivo geral

Projetar, construir e analisar o desempenho de um resfriador evaporativo em escala real para atendimento às condições restritivas de agricultores em locais remotos e para lugares com condições climáticas favoráveis ao seu funcionamento.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar o máximo de descrições sobre a construtibilidade dos resfriadores evaporativos;
- ampliar o espaço refrigerado em relação aos similares da literatura;
- aplicar o máximo de adequação em um projeto de resfriador evaporativo para uso em ambientes adversos de locais remotos, priorizando técnicas construtivas vernaculares e todos os princípios de tecnologia apropriada.

1.2 Estrutura da dissertação

Este trabalho é composto dos seguintes itens:

- Introdução: apresenta a relevância do problema do desperdício de alimentos e o resfriamento evaporativo como uma das soluções para reduzi-lo de forma viável para aplicação em locais remotos. São apresentados a problemática e

os objetivos desta pesquisa, voltados para a promoção de maior grau de adequação, planejamento de maior espaço de armazenamento.

- A revisão de literatura apresenta modelos de resfriadores evaporativos, tendo como foco dimensões, materiais de construção e técnicas construtivas utilizados. São observados também os métodos de análise de desempenho e dados de custo; finaliza apresentando os níveis de contribuição da revisão para o alcance dos objetivos deste trabalho;
- O método é apresentado depois da revisão, pois há subsídios que demandam o entendimento da literatura. O estudo foi conduzido com base no *Design Science Research (DSR)*, descreve e esclarece os seus passos básicos;
- Os resultados, organizados de acordo com os passos desenvolvidos, apresentam o desenvolvimento do projeto do resfriador evaporativo, a construção do protótipo, plano de medição de desempenho, custo e dados medidos;
- As considerações finais mostram a capacidade de atendimento do resfriador às condições delineadas e as lacunas ainda não preenchidas.

2 RESFRIAMENTO EVAPORATIVO E MODELOS DE RESFRIADORES

2.1 Resfriamento evaporativo para conservação de alimentos

Com métodos antigos e ainda hoje utilizados para resfriamento de alimentos, é possível alcançar certo grau de conservação para frutas e legumes no período de armazenagem, até que sejam consumidos ou comercializados. Uma das formas mais simples de armazenamento de alimentos, citada por Lal Basediya, Samuel e Beera (2011), pode ocorrer utilizando inércia térmica, ao estocar a produção em cabanas de madeira ou bambu, e com a disposição dos produtos no chão ou em prateleiras, cobertos por palha ou folhas, evitando contato direto com o ar. Já, nas planícies secas da Índia, realiza-se o armazenamento em poços ou câmaras frias e secas por ventilação, utilizando o ar frio resultante do processo de evaporação da água, o resfriamento evaporativo.

Conforme Kulkarni e Rajput (2013) e Kim et al. (2018), a utilização do processo termodinâmico de resfriamento evaporativo, também conhecido como saturação adiabática de ar, consiste na evaporação da água, que retira calor do ambiente ou de determinado material sobre o qual a evaporação acontece. Rempel e Rempel (2016) e Ambuko et al. (2017) citam o volume de consumo de energia que a água necessita para sua transposição de seu estado de líquido para vapor: 2260 kJ / kg.

Esse processo, conhecido como resfriamento evaporativo, é antigo e pode ser utilizado para pequenos volumes ou para uma edificação. De acordo com Ambuko et al. (2017), as tecnologias de resfriamento evaporativo assumem muitas formas, mas são compostas basicamente por uma parede porosa feita com material que possa reter a água e através do qual o ar pode fluir facilmente.

Esse meio, traduzido neste trabalho como “colchão úmido”, do inglês “*pad*”, “*wetted pad*” ou “*cooler pad*”, pode ser carvão vegetal, areia, argila ou qualquer outro material que é poroso o suficiente para conter água. Este meio é mantido irrigado com água e com o ar seco quente fluindo sobre ele, a água evapora resultando no efeito de resfriamento evaporativo. Um exemplo é o modelo de paredes duplas com vão preenchido com areia, que é umedecida (Figura 2).

Com baixa utilização de energia, ambientalmente amigáveis, feitas de materiais locais, e que utilizam os princípios do resfriamento por evaporação, as câmaras resfriadoras são capazes de manter temperaturas de 10 a 15°C abaixo da temperatura ambiente e com umidade de 90%, dependendo da estação (LAL BASEDIYA; SAMUEL; BEERA, 2011).

A técnica de resfriamento evaporativo é conhecida em diferentes locais no mundo, e o resfriador é associado facilmente ao clima de cada um deles, ficando conhecido também como “resfriador do pântano”, “resfriador do deserto” ou “resfriador de ar úmido”. Adaptou-se bem no Irã, Kuwait e países do Golfo do Pérsico, todos com clima quente e seco; em países de climas temperados, como o do sul da Austrália. O nome “resfriador do pântano” foi devido ao fato das primeiras unidades possuírem odor de algas (NDUKWU; MANUWA, 2014).

Figura 2. Resfriador evaporativo de parede de tijolos cerâmicos, para aproximadamente 100 kg de frutas e hortaliças, em Bangladesh



Fonte: Islam e Morimoto (2015b).

O fato de não exigir energia elétrica para seu funcionamento torna a utilização do resfriamento evaporativo vantajosa ao agricultor em áreas não atendidas por eletricidade.

Ajuda a reduzir as cargas elétricas de pico durante o verão e é favorável ao meio ambiente, por fazer uso de água como refrigerante, em vez de produtos artificiais, como o clorofluorcarboneto - CFC (ISLAM; MORIMOTO, 2014; KIM, 2016; KIM et al., 2018; LAL BASEDIYA; SAMUEL; BEERA, 2011).

Por ser um meio eficiente e econômico para reduzir temperatura e aumentar a umidade relativa de um recinto, o resfriamento evaporativo tem sido amplamente estudado, a fim de aumentar a qualidade e tempo de estocagem de produtos hortícolas (JHA; CHOPRA, 2006; DADHICH, et al., 2008; ODESOLA; ONYEBUCHI, 2009, apud REMPEL; REMPEL, 2016).

Ndukwu e Manuwa (2014) apresentaram uma versão rudimentar do resfriador, com modelo similar ao da Figura 2 (tipo “caixa com tampa”). Nessa versão, cuja autoria é atribuída a S. K. Roy, os autores focalizaram na descrição do elemento e no “como fazer”, mais do que no seu desempenho, pensando no atendimento às necessidades de agricultores de locais remotos na Índia e sem acesso à energia elétrica.

A solução tem sido testada e estudada em campo não só na Índia, mas em outros países como Bangladesh, Nigéria, Gana e demais regiões da África Subsaariana e sul da Ásia. Há testes com diferentes capacidades de armazenamento (de 50, 100, 200kg até 1 tonelada), para preservar frutas, legumes e verduras, construídos em variados locais e com a utilização de uma gama de materiais e técnicas construtivas de baixo custo. Alguns estudos identificaram ainda, custos (SARAN; ROY; KITINOJA, 2012), aceitação e barreiras para disseminação do uso do resfriador evaporativo entre os agricultores de baixa renda em locais remotos (KITINOJA; ALHASSAN, 2012).

Entre 2012 e 2015, pesquisadores da Universidade de Ehine no Japão, contribuíram para o avanço científico do uso de resfriadores evaporativos de armazenagem de hortifrúteis. O modelo de resfriador de ROY; KHARDI (1985 apud ISLAM; MORIMOTO, 2015 b) foi estudado em laboratório e em algumas das pesquisas, com temperatura ambiente e velocidade de vento controladas. Além do desempenho de resfriamento, foram avaliados os resultados nos frutos, tais como durabilidade/percibilidade, perda de peso fisiológico e aparência.

Para o alcance de melhor desempenho de resfriamento, uma série de estudos foi desenvolvida por esses pesquisadores: combinação do modelo de resfriador de parede dupla de tijolos com métodos simples de preservação de frutos como tomate e beringela, realizando a imersão em água quente e armazenamento em diferentes recipientes (ISLAM; MORIMOTO, 2012); versão semienterrada para se beneficiar da inércia térmica da terra (ISLAM; MORIMOTO; HATOU, 2012); substituição dos tijolos da parede externa por placa de rocha porosa para facilitar a evaporação da água (ISLAM; MORIMOTO, 2014; ISLAM; MORIMOTO, 2015 a); utilização de gerador de energia solar, composto por placa de adsorção solar (ISLAM; MORIMOTO, 2014) e estruturas que complementaram e potencializaram o fenômeno do resfriamento evaporativo, como a chaminé e o pote cerâmico com água (ISLAM; MORIMOTO, 2015 a).

Para evitar que a falta ou excesso de tempo de rega interferissem de forma negativa no desempenho de resfriamento, foi estudada a otimização do tempo de rega com métodos matemáticos que combinaram algoritmos genéticos e redes neurais, que apontaram o número e o tempo ideais das regas e das pausas, ao longo do dia, para o alcance do melhor desempenho de resfriamento, com o uso de 45 l/dia de água (ISLAM; MORIMOTO; HATOU, 2013).

Com um volume de rega de 45 l/dia e o uso de diferentes recipientes para armazenar os frutos no interior do resfriador, combinado com o resfriamento evaporativo, foi possível aumentar o tempo de vida do tomate para mais de 7 dias. O desempenho foi ainda melhor com a imersão do fruto por três minutos em água com temperatura de 60°C, antes do armazenamento no resfriador. Com esta medida, o tempo de vida do tomate passou de 7 para 16 dias (ISLAM; MORIMOTO, 2012).

O maior tempo de vida para consumo, no caso do tomate, aumentou de 7 dias para 23 dias, em estudo que utilizou 45 l/dia de rega, placa solar e um condensador de metanol para manter uma caixa de gelo dentro do resfriador (ISLAM; MORIMOTO, 2014).

A inclusão de características construtivas capazes de melhorar a eficiência de resfriamento evaporativo ocorreu posteriormente. O uso de uma chaminé e aberturas no topo das paredes, auxiliou no escape do ar quente e promoveu a sua constante retirada de dentro do resfriador. A inserção de tubos de ar na parte inferior das paredes possibilitou

maior contato do ar externo com a superfície molhada da parede, facilitando o processo de evaporação da água. Foram utilizados 29 l/dia de volume de água para rega neste estudo, que elevou o tempo de vida do tomate de 7 para 19 dias (ISLAM; MORIMOTO, 2015 a).

Como complementação das pesquisas da Universidade de Ehine, a pesquisa chinesa de Yanhua et al., (2017), realizou simulações numéricas de temperatura e umidade do modelo de resfriador evaporativo de tijolos cerâmicos, semienterrado, contribuindo para a previsão de desempenho do resfriador, ainda em fase de projeto.

Estudos no Brasil versando sobre o tema e voltado para a conservação de alimentos não foram identificados. Foram identificados alguns estudos de contribuição pontual, aplicados na agroindústria. O estudo com tema mais próximo ao tema da presente pesquisa foi o de Tinôco et al., (2002), que comparou a eficiência de resfriamento da argila expandida, serragem, fibra de madeira e do carvão vegetal - todos materiais porosos encontrados no Brasil. Os materiais foram utilizados na confecção de placas porosas para sistemas de resfriamento evaporativo. Durante o verão, estufas situadas na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, tiveram o conforto térmico do ambiente analisado. Com a observação da variação de temperatura e umidade, a utilização de argila expandida e o carvão vegetal apresentaram mais vantagens em relação aos demais materiais.

Apesar dos avanços alcançados, a implementação dos resfriadores evaporativos ainda encontra desafios a serem superados. Mesmo que o resfriamento evaporativo permita uma desaceleração da deterioração de frutas e hortaliças e um aumento no prazo de perecibilidade e comercialização dos produtos, segundo o IIF-IIR (2015), diante de climas quentes, não se alcançam as temperaturas recomendadas para o estoque de produtos.

A Sociedade Nacional de Agricultura - SNA (2014) aponta 3 faixas de temperatura para a conservação de hortaliças, de 0-1°C, 3-8°C e 10-14°C e umidade entre 90-95%. O aumento da umidade relativa age de forma a minimizar o murchamento de frutas e vegetais devido à evapotranspiração, mas estimula a proliferação indesejável de fungos como *botrytis*, *Penicillium*, resultando na deterioração e produção de biotoxinas nos produtos.

A coleção SABER de Tecnologia e Produção de iniciativa da EMBRAPA (1996) aborda na conservação pós-colheita de frutas e hortaliças, uma série de produtos hortícolas não

sensíveis ao frio, tais como maçã, damasco, cereja, figo, uva, kiwi, nectarina, pêsego, caqui, ameixa, morango, aspargo, beterraba, brócolis, repolho, cenoura, couve-flor, aipo ou salsão, milho verde, alho, alface, cebola, ervilha, espinafre e nabo, que em uma faixa de temperatura entre 0 e 5°C encontram-se em condições de conservação e transporte. Na faixa de temperatura de 20°C à 30°C esses produtos passam a amadurecer. Quando expostos a temperaturas maiores que 30°C, os produtos passam a sofrer danos devido ao excesso de calor (GOMES, 1996).

Ainda de acordo com a mesma publicação, os produtos considerados sensíveis ao frio, tais como abacate, banana, citros, goiaba, manga, oliva, mamão, maracujá, abacaxi, romã, vagem, pepino, berinjela, quiabo, pimenta, batata, batata-doce, tomate e melancia se mantêm conservados com a faixa de temperatura entre 10°C e 15°C (Figura 3).

Quanto a percentagem de umidade ideal do ar, a publicação de Gomes (1996) expõe que a mesma também varia de acordo com o produto a ser armazenado. O murchamento e enrugamento do vegetal ocorre quando há uma taxa de umidade menor que a requerida. Uma umidade próxima à 100% garante aspecto firme aos vegetais, porém estimula o desenvolvimento de microorganismos e na cebola e alho, por exemplo, o aparecimento de raízes. Ambos necessitam de umidade entre 65 e 75%, enquanto demais hortaliças e frutas requerem umidade entre 85 e 95%.

Figura 3. Comportamento de produtos agrícolas sensíveis e não sensíveis ao frio, em diferentes temperaturas.



Fonte: Gomes (1996).

Assim como as altas taxas de umidade geradas, resfriadores evaporativos que utilizam recirculação de água, de maneira semelhante às torres de resfriamento e condensadores evaporativos, podem levar ao acúmulo de contaminação microbiana e causar doenças respiratórias, como a doença do legionário, que é fatal. A doença do legionário ocorre quando bactérias são transmitidas pela água, por aspersão, aderindo aos pulmões (KIM et al., 2018). Há métodos de armazenamento antibacterianos e antifúngicos para inibir a deterioração de frutas e vegetais (ISLAM; MORIMOTO, 2012), mas às custas do uso de tratamentos mais elaborados como reatores ultravioleta (UV).

Ndukwu e Manuwa (2015) afirmam que na Nigéria, a disseminação do uso do resfriamento evaporativo é prejudicada devido à condição imprevisível do clima, afetando o seu desempenho, já que cada dia há variações indesejáveis do clima que afetam negativamente o desempenho do resfriador evaporativo. Kulkarni e Rajput (2013), Lal Basediya, Samuel e Beera (2011) e Hu et al. (2013) debatem sobre o desempenho do resfriamento evaporativo em climas úmidos, chegando à conclusão de que o melhor desempenho é obtido em climas quentes e secos (HU et al., 2013).

Muitos dos trabalhos consultados são ainda experimentais, com pequeno volume de armazenamento e que utilizam materiais nem sempre de fácil aquisição. Para a aplicação em situações reais, há ainda muito a ser feito em relação ao detalhamento dos materiais de construção (dimensões e disponibilidade), instrumentos utilizados, facilidade de construção, facilidade de manutenção e custo, principalmente se considerado que o uso prioritário desse tipo de solução é em países com graves indicadores sociais. É desejável agregar robustez e, principalmente, resiliência a esse tipo de produto para torná-lo viável nessas condições.

Por isso, os trabalhos de Ndukwu e Manuwa (2015); Kulkarni e Rajput (2013); Abano et al. (2011); Islam e Morimoto (2014); Singh et al. (2010) a; Singh et al., (2010) b; Kim et al. (2018); Rempel e Rempel (2016); Yanhua et al. (2017), além de outros, oferecem, cada qual, informações para a concepção de novos modelos de resfriadores evaporativos.

O resfriamento evaporativo pode ocorrer em resfriadores com dimensões semelhantes à de um utensílio ou de um ambiente. Para que o processo se efetive é preciso garantir que os fenômenos físicos responsáveis pela evaporação da água ocorram, sendo necessária uma quantidade de energia proveniente do calor latente do ar quente ou de

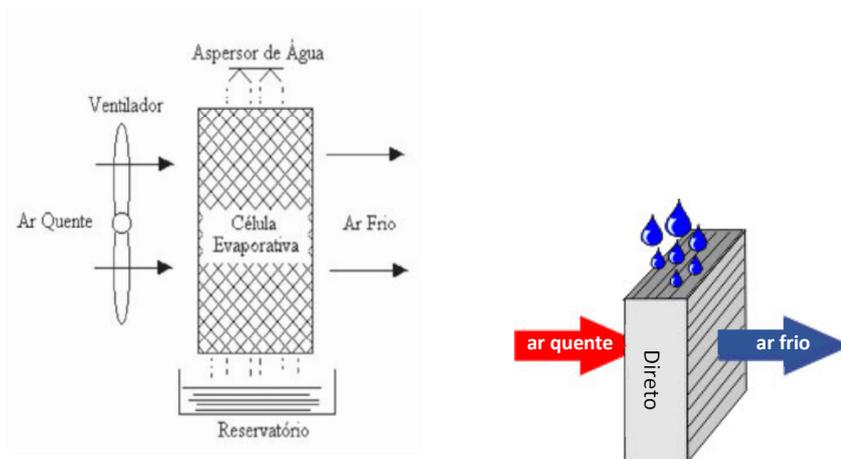
alguma superfície quente. A cada um grama de água evaporada, sem aporte de calor externo, ocorre a retirada de cerca de 2,5 kJ do ar ambiente de entorno ou da superfície de um material onde a evaporação ocorre. As oscilações de elementos climáticos, tais como temperatura, umidade e velocidade do ar, interferirão na quantidade de energia fornecida para o processo de evaporação (DA SILVA, 2004).

O resfriamento evaporativo pode ser classificado por três tipos de sistemas de acordo com Kulkarni e Rajput (2013); Kim (2016); Kim et al. (2018); Lal Basediya; Samuel; Beera (2011): direto, indireto, e de 2 estágios (indireto-direto).

No direto, mais comum, a água evapora e umidifica o ar. Utiliza um colchão úmido - um plano poroso pelo qual o ar passa e que deve ser molhado por gotejamento de água - geralmente por cima, com a ajuda de uma bomba de circulação ou outro artifício (Figura 4). Quanto maior a temperatura e menor a umidade do ar, mais eficiente é o sistema, sendo apropriado para climas quentes e secos. O sistema é limitado porque a queda de temperatura é apenas uma pequena fração de todo o potencial de redução por evaporação, pois há muita água que precisa ser evaporada em pouca superfície, resultando em uma efetividade de 55 a 70% (LAL BASEDIYA; SAMUEL; BEERA, 2013). Por isso, Soponpongpiat e Kositchaimongkol (2011) dizem que o colchão úmido é a parte mais importante do sistema de resfriamento evaporativo.

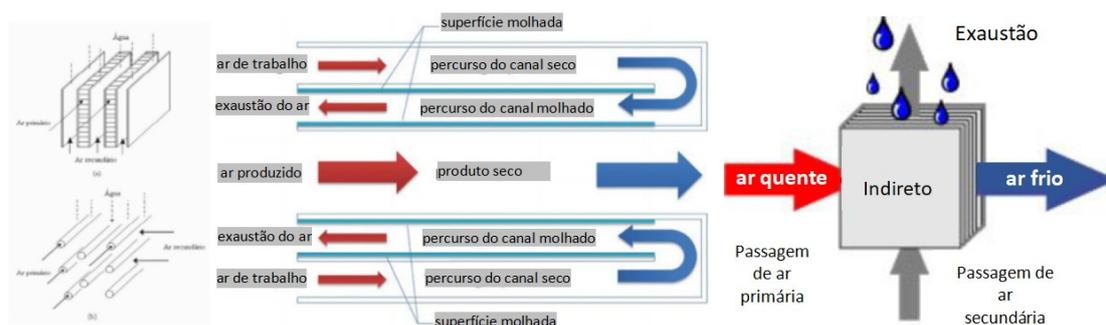
No resfriamento evaporativo indireto, o ar do processo (canal seco) é separado do ar de trabalho (canal molhado) por uma parede sólida e não há mudança de teor de umidade no ar do processo. É usado um trocador de calor, no qual o ar de trabalho é arrefecido por evaporação da água, que então esfria o ar do processo (Figura 5). O ar de trabalho, úmido, é descartado e o ar do processo é o ar insuflado no ambiente. Esse sistema é adaptável para clima quente e úmido. A efetividade de um sistema indireto é maior do que o direto, cerca de 75% (LAL BASEDIYA; SAMUEL; BEERA, 2011), mas é um sistema que requer energia elétrica para promover a circulação de água com bombas e ventiladores para insuflar o ar.

Figura 4. Resfriamento evaporativo direto.



Fonte: Camargo, 2004, p. 70; Sullivan (2018)

Figura 5. Resfriamento evaporativo indireto – (a) tipo placa e (b) tipo bulbo.



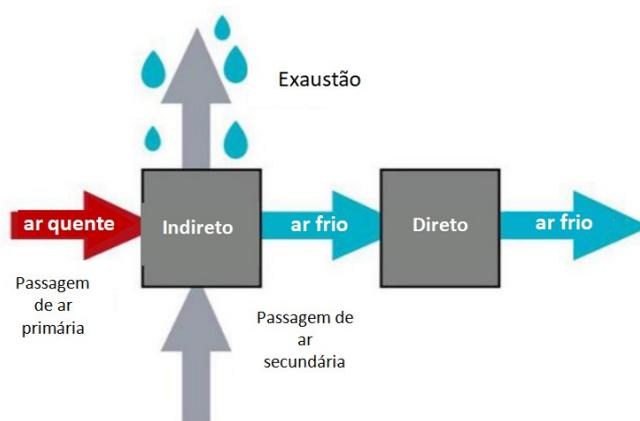
Fonte: Traduzido de Camargo, 2004, p. 70; Cui et al. (2018); Sullivan (2018)

O sistema de 2 estágios é um sistema indireto seguido de um direto (Figura 6), onde o ar que já foi resfriado pelo primeiro, passa pelo segundo, para que, com o acréscimo de umidade, reduza ainda mais sua temperatura. Um sistema desses tem efetividade de 100 a 115%, baixando a temperatura ligeiramente abaixo da temperatura externa de bulbo úmido. O desempenho é melhor em climas áridos do que em lugares com umidade mais alta (LAL BASEDIYA; SAMUEL; BEERA, 2011).

Lal Basediya, Samuel e Beera (2011) relatam economia de 40% e 50% de energia elétrica em áreas moderadamente úmidas, dado que o sistema de resfriamento evaporativo pode absorver calor e reduzir a necessidade do consumo de energia elétrica com ventiladores.

Um sistema desses viabiliza a redução das perdas em 50% sobre a produção agrícola de batatas (FUGLIE et al., 1997, apud LAL BASEDIYA; SAMUEL; BEERA, 2011 a).

Figura 6. Resfriamento evaporativo - sistema de 2 estágios.



Fonte: Traduzido de Orr; Klesner (2016)

2.2 Modelos de resfriadores evaporativos

Num breve panorama da produção científica sobre o resfriador evaporativo, foram identificados quatro principais temas: desempenho de materiais e características construtivas empregadas no resfriamento evaporativo; simulação de desempenho termodinâmico do resfriador evaporativo; comportamento biológico dos vegetais armazenados nos resfriadores evaporativos e; contenção de fenômenos microbiológicos em resfriadores evaporativos. Esta revisão de literatura tem foco no primeiro assunto.

2.2.1 Resfriador de pote cerâmico /pote em pote / pote frio (*clay pot cooler/ pot in pot/ zeer pot*)

Para o uso doméstico, há tempos têm se utilizado materiais porosos e técnicas construtivas simples com potes de barro com areia ou sacos de juta como colchões úmidos com rega manual.

Esse modelo, de sistema direto, usa 2 potes cerâmicos, de tamanhos diferentes, e areia para preenchimento (Figura 7 e 8). A rega é manual, com pequeno volume de água necessário. Por ser pequeno e portátil, constitui um utensílio doméstico. Necessita estar em ambiente sombreado e ventilado e é adequado para locais com baixa umidade (menos de

40%) e alta temperatura (máxima diária de 25°C). O modelo é adequado para volumes de hortaliças até 150 litros (VERPLOEGEN; RINKER; OGNAKOSSAN, 2018).

Figura 7. Resfriadores de pote cerâmico.



Fonte: SCI (2018); Instructables Outside e Berkana (2014).

Figura 8. Variações do resfriador de pote cerâmico.



Fonte: Pinterest (2021)¹

2.2.2 Resfriadores tipo caixa com porta

Esse modelo, de sistema direto, baseia-se numa caixa metálica de paredes simples ou duplas, com portas, do tamanho de um pequeno armário. O modelo de parede simples é uma gaiola metálica, dentro de uma bandeja receptora de água e outra bandeja doadora de

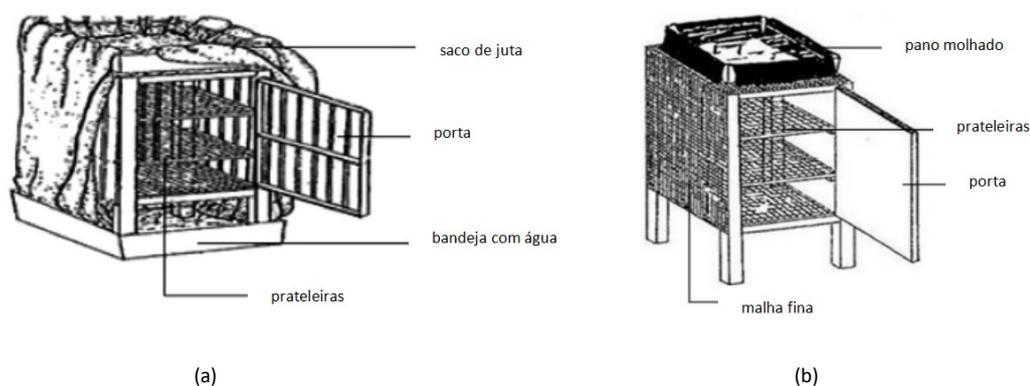
¹ <https://br.pinterest.com/pin/436708495091421791/>

água sobre o resfriador (Figura 9a). O papel de colchão úmido é feito por um saco de juta que está parcialmente mergulhado na bandeja superior, que absorve água e, por gravidade, goteja na inferior.

O modelo b (Figura 9b) tem as paredes internas de chapa galvanizada furada (5x5cm), enquanto as paredes externas são feitas de malha metálica fina (32mm). O espaço entre a parede interna e externa (1.5cm) é preenchido com casca de arroz, umedecido por um pano mergulhado em uma bandeja com água sobre o resfriador.

Os 2 modelos, desenvolvidos nas Filipinas e descritos por Acedo (1997) apud Ndukwu e Manuwa (2014), ainda podem ser considerados portáteis, pois são leves e não conectados a uma fonte de água.

Figura 9. Resfriadores metálicos com porta.



Fonte: Traduzido de Ndukwu e Manuwa (2014)

2.2.3 Câmara de resfriamento evaporativo (*evaporative cooling chamber - ECC*)

O ECC (Figura 10), diferente dos anteriores, é um modelo fixo, com volume ampliado (entre 500 e 5000 litros) de câmara. Tem paredes duplas feitas de tijolos cerâmicos (67.5cm de altura) empilhados, sobre fundação também de tijolos cerâmicos (1.15x1.65m). A cavidade entre paredes (7.5cm) é preenchida com areia (colchão úmido). Uma tampa, de mesmas dimensões da fundação é construída sobre a câmara, usando madeira e palha, para manter o ar interno à baixa temperatura e úmido. A construção requer sombra ou um

telhado. É indicado o uso de cestas ou engradados plásticos para o arranjo interno dos hortifrúteis (VERPLOEGEN; RINKER; OGNAKOSSAN, 2018).

A rega depende das condições climáticas, mas variam entre 1 e 3 vezes por dia (NDUKWU; MANUWA, 2014). A concepção desse modelo é atribuída a Susanta K. Roy e D. S. Khuridiya, no início dos anos 80 (VERPLOEGEN; RINKER; OGNAKOSSAN, 2018).

Figura 10. Câmara de resfriamento evaporativo - ECC.



Fonte: Roy (1989) apud Kitinoja; Thompson (2010); Ndukwu e Manuwa (2014); Verploegen; Rinker; Ognakossan (2018)

Kitinoja, Saran, Roy (2012) relatam o desempenho desse tipo de resfriador em um teste de campo. Com base em 2 modelos, um de 100kg e outro de 200kg, os resultados obtidos foram:

- perdas por deterioração: os resultados são expressos de maneiras diferentes (perda de produto, perda de peso), mas, de modo geral, reduziu para aproximadamente a metade;
- acréscimo do valor de mercado, variando de acordo com o produto;
- armazenamento por 5 a 6 dias sem aparente deterioração (para abóbora há perdas nesse período, mas 40 a 62% continuam aptos);
- custo: \$100/100kg (para 5 engradados plásticos) e \$813/200kg (para 10 engradados plásticos), sendo incluídos no custo do segundo telhado e piso;
- tempo de retorno do investimento: 3 usos/100kg e 8 usos/200kg;
- desempenho: variação média ao longo de um dia, de 26-33°C e 29-28% de umidade (antes) para 22-27°C e 62-56% de umidade (depois).

Os valores apresentados não consideram o custo de engradados plásticos e mão de obra para construção (quando discriminados nas fontes consultadas).

2.2.4 Câmara de resfriamento de energia zero de percurso (*zero energy cool chamber walk-along – ZECC walk-along*)

Também desenvolvido por Roy, em 2009, na Índia, o princípio de construção desse modelo é o mesmo do ECC anterior (item 2.1.3), porém maior (capacidade para 50 engradados, 1000kg). Toda a extensão do resfriador possui tampas, que também são mantidas úmidas. Kitinoja e Thompson (2010) reportam temperaturas internas nesse tipo de modelo entre 15 a 18°C e umidade relativa de cerca de 95%, mas não mencionam a temperatura ambiente. A alteração de nome de ECC (*evaporative cooling chamber*) para ZECC (*zero energy cool chamber*) também foi apresentada por esses autores, mas sem aparente mudança de produto (Figura 11).

Figura 11. Câmara de resfriamento de energia zero de percurso – ZECC.



Fonte: Kitinoja; Thompson (2010); Kitinoja; Saran; Roy (2012).

Assim como nos modelos menores, as perdas caíram pela metade, pelo menos (KITINOJA; SARAN; ROY, 2012). Os autores comentam que o custo desse sistema é alto (\$1000), mas, gera um lucro de US\$140 em relação a colheita armazenada em temperatura no período noturno. Seu custo é proporcional ao custo do ECC de 100kg, ou seja, \$1/kg, que com cada 100 kg gera lucro de US\$ 40,50 em relação a prática tradicional de colheita e venda no mesmo dia. O tempo de retorno do investimento é de 8 usos, semelhante ao modelo de 200kg, 5 vezes menor. Entretanto, dado que o telhado tem o mesmo papel da

sombra de uma árvore, buscar alternativas para redução do seu custo ou até mesmo eliminá-lo é uma ideia a desenvolver.

Assim como no item anterior, os valores apresentados não consideram o custo de engradados plásticos e mão de obra para construção (quando discriminados nas fontes consultadas).

2.2.5 Câmara de resfriamento de energia zero (*zero energy cool chamber – ZECC Ehine*), Universidade de Ehine

O modelo ECC (ou ZECC) teve alguns exemplares montados na Faculdade de Agricultura da Universidade de Ehine, Matsuyama, Japão, testados até 2013. Os iniciais são similares aos modelos desenvolvidos por Roy em materiais e dimensões, e os finais sofreram acréscimos de equipamentos, mudança de materiais e de dimensões.

- **ZECC Ehine 1:**

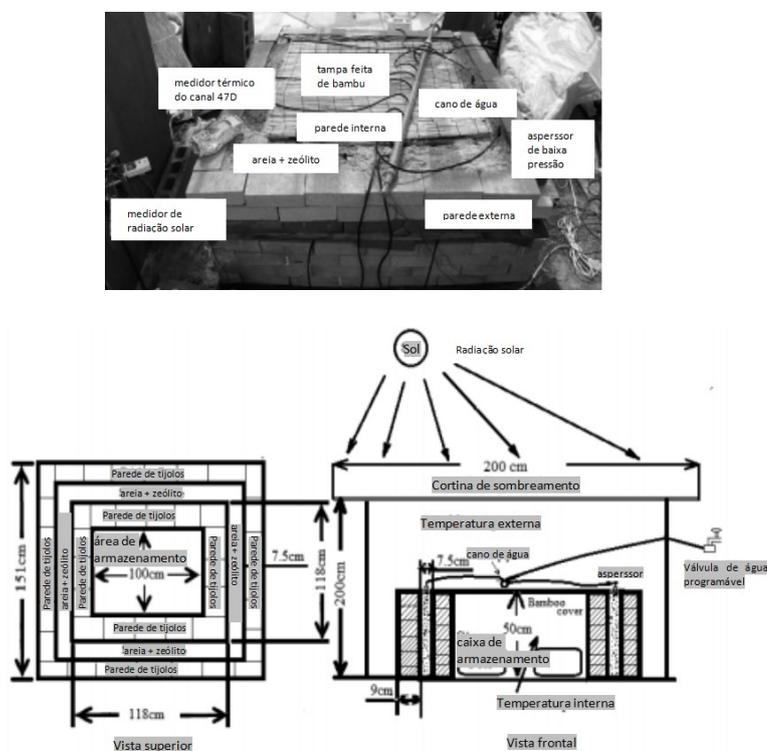
O primeiro modelo (Figura 12) tem parede dupla de tijolos cerâmicos empilhados (1.51x1.51m externamente e 1.18x1.18m internamente, e 0.5m de altura), assim como os modelos citados anteriormente, e colchão úmido constituído de mistura de areia (60%) e zeólito (rocha porosa) (40%) no vão de 7.5cm. A tampa é de trama de bambu e uma membrana de sombreamento (sombrite) foi colocada como bloqueio de 60% da radiação solar. A área livre para armazenamento do resfriador tem 1x1m e 0.5m de altura, ou 500 litros. A rega foi operacionalizada com vinte cânulas e microaspersores de baixa pressão, utilizando válvula de fluxo programável (Haikanbuhin VKK-15WAG), que totalizou uma taxa de rega de 50 litros/dia.

Entre alguns métodos de tratamento e armazenamento dos produtos, a combinação mais adequada foi a de temperatura mais baixa com taxa de umidade, junto ao tratamento de tomates e berinjelas com água quente, antes do armazenamento, e o uso de um recipiente de armazenamento revestido com íons de prata. Estas medidas evitaram a decomposição e aumentaram o tempo de vida útil do tomate e da berinjela em até 28 e 15 dias, respectivamente.

As médias internas de temperatura variaram de acordo com a condição de rega e sombreamento em que o resfriador foi submetido: 12,7°C (com rega e com sombreamento), 21,4°C (com rega e sem sombreamento), 23,8°C (sem rega e com sombreamento) e 26,8°C (sem rega e sem sombreamento). A temperatura externa alcançou até 35,4°C e a diferença média de temperaturas interna e externa foi de 18°C (Figura 13).

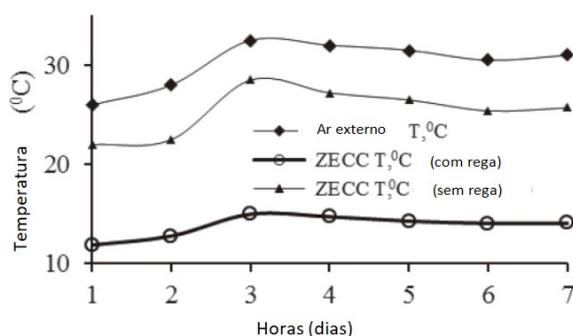
A pesquisa de Islam e Morimoto (2012) observou os impactos do tratamento dos tomates e beringelas antes e durante o armazenamento no interior do resfriador sem rega e com rega alternada (Figura 14).

Figura 12. ZECC Ehine 1.



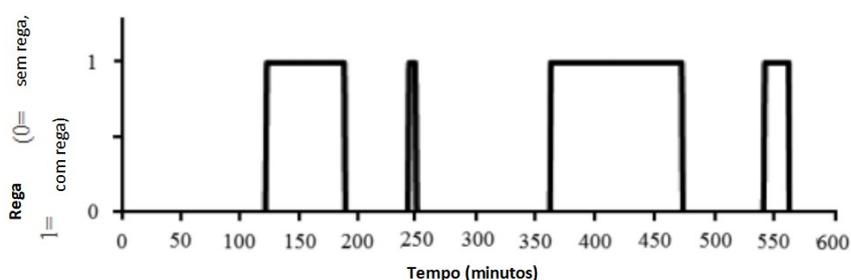
Fonte: Traduzido de Islam e Morimoto (2012)

Figura 13. Desempenho de temperatura - ZECC - Ehine 1.



Fonte: Traduzido de Islam e Morimoto (2012)

Figura 14. Rega alternada Ehine 1



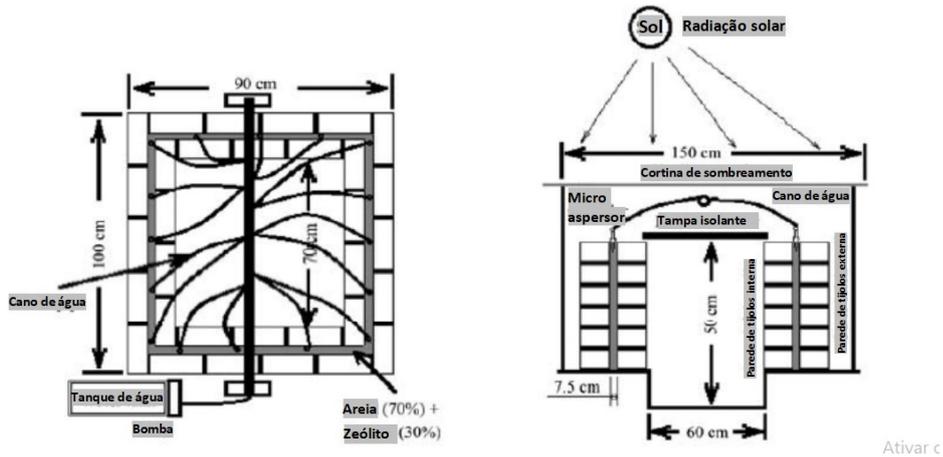
Fonte: Traduzido de Islam e Morimoto (2012)

- **ZECC Ehine 2:**

No segundo modelo testado (Figura 15), algumas mudanças foram introduzidas. Além da parede dupla de 0.9x1.0m externamente e 0.6x0.7m internamente, e 0.5m de altura, e colchão úmido constituído de nova mistura de areia (70%) e zeólito (30%), houve a inserção de uma tampa mais isolante (0.65x0.75m); espaço de armazenamento com dimensões de 0.5x0.6x0.7m / 210 litros foi semienterrado (0.2m); uma bomba de água e microaspersores de baixa pressão, volume de 45 litros/dia com temporizador eletrônico programável. Assim como na pesquisa de Islam e Morimoto (2012), foram observados os impactos do tratamento dos tomates antes - com o uso de água à 60°C - e durante o armazenamento, sem rega e com rega alternada.

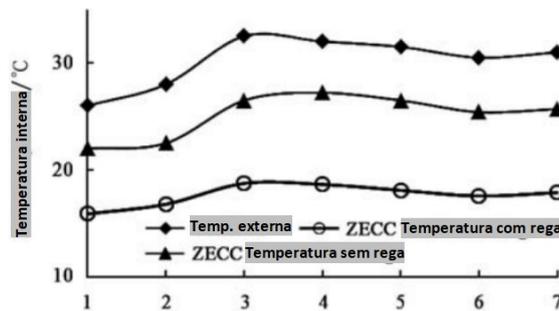
A média interna de temperatura foi de 13,8°C submetido a condição com rega e com sombreamento. A temperatura externa oscilou entre 26°C e 33°C e a diferença média entre as temperaturas interna e externa foi de 12°C (Figura 16).

Figura 15. ZECC Ehine 2.



Fonte: Traduzido de Islam, Morimoto e Hatou (2012)

Figura 16. Desempenho de temperatura - ZECC - Ehine 2.

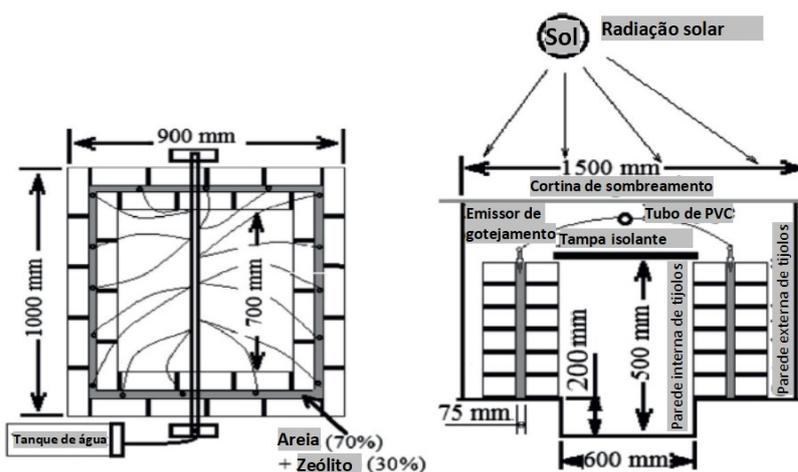
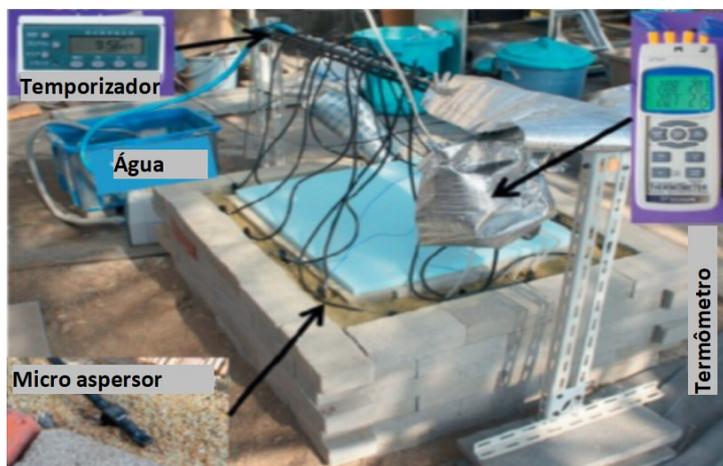


Fonte: Traduzido de Islam, Morimoto e Hatou (2012)

- **ZECC Ehine 3:**

Sobre o modelo de resfriador ZECC estudado por Islam, Morimoto e Hatou (2012), com os mesmos materiais construtivos e as mesmas dimensões (Figura 17), Islam, Morimoto e Hatou (2013) submetem o resfriador a uma rega otimizada, planejada com o auxílio de métodos matemáticos: redes neurais e algoritmos genéticos (Figura 19).

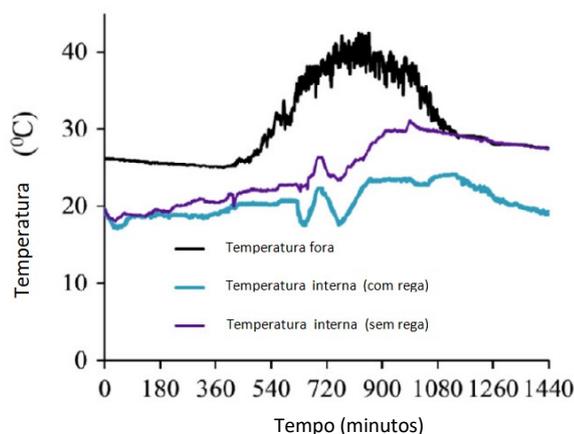
Figura 17. ZECC Ehine 3.



Fonte: Traduzido de Islam, Morimoto e Hatou (2013)

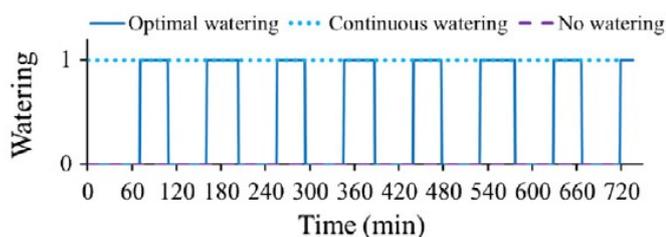
As médias da temperatura interna foram 18,7, 22,6 e 26,2°C para os casos de rega ótima, rega contínua e sem rega, respectivamente. A temperatura interna com a rega ideal foi 4°C menor do que para a rega contínua, e 7,5°C menor do que sem rega. Em dia ensolarado, alcançou diferenças de temperatura que oscilaram entre 5 e 22°C (Figura 18).

Figura 18. Desempenho de temperatura - ZECC - Ehine 3.



Fonte: Traduzido de Islam, Morimoto e Hatou (2013)

Figura 19. Rega contínua e rega otimizada - Ehine 3.



Fonte: Traduzido de Islam, Morimoto e Hatou (2013)

- **ZECC Ehine 4:**

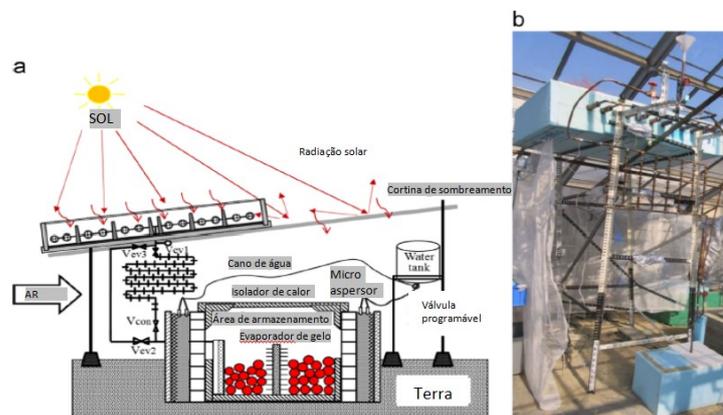
Um outro modelo, tecnologicamente mais elaborado, foi desenvolvido por Islam e Morimoto (2014) (Figura 20). As paredes duplas usam materiais diferentes: as externas (0.9x1.1m) são de pedra porosa e as internas são de tijolos cerâmicos maciços. O colchão úmido tem duas camadas: mistura de areia (80%) com zeólito (20%) e areia grossa (2mm), com 55mm e 10mm de espessura, respectivamente. O espaço de armazenamento, também semienterrado (altura total de 0.6m) tem tampa de poliestireno expandido (EPS) de 5mm de espessura e forrado com o mesmo material no fundo e nas paredes (dada a fragilidade do EPS, questiona-se se são partes da proposta ou se são apenas aparato de medição de desempenho).

O conjunto foi coberto com membrana de sombreamento (tipo Sombrite) com bloqueio de 60% da radiação solar.

A rega é feita com reservatório de água de baixa pressão (0.5 litro); microaspersores de duas saídas, controladas por temporizador, 45 litros/dia e vazão de 0,40 ml/segundo. O início da rega é às 5:00 com ciclo de 24 horas, a rega é ligada por 35 minutos e desligada por 55 minutos. Para ajudar no resfriamento, uma caixa gelada de alumínio com aletas (radiador) (10x40cm, 30cm de altura) conectada a um painel de adsorção.

O ZECC alcançou temperatura interna média de 12,07°C, com condição de temperatura externa média de 31,5°C.

Figura 20. ZECC Ehine 4, com painel de adsorção solar.

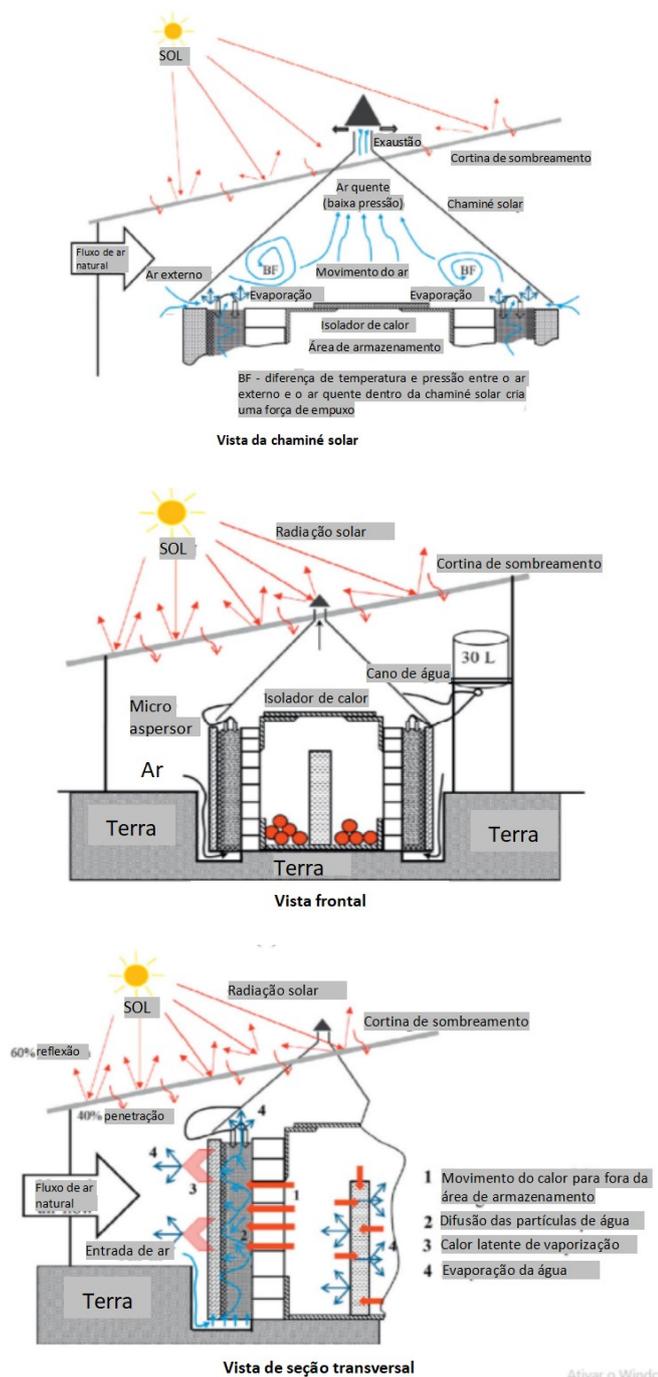


Fonte: Traduzido de Islam e Morimoto (2014)

2.2.6 Estrutura de armazenamento de energia zero (*zero energy storage structure - ZESS*), Universidade de Ehine

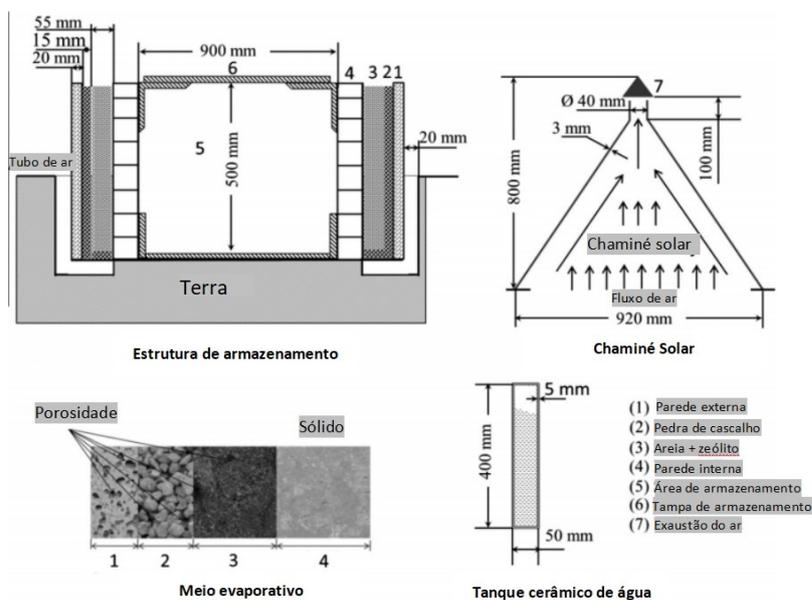
De acordo com os acréscimos de tecnologia nos resfriadores ZECC, ao longo do tempo de estudos na Universidade de Ehine, o último exemplar executado pelos pesquisadores da Universidade de Ehine, o ZESS representa uma “regressão” do ponto de vista tecnológico, se comparado com o ZECC Ehine 4, mas também uma “evolução” do ponto de vista da aplicabilidade (Figura 21).

Figura 21. (a) corte; (b) ar quente e ar úmido; (c) retirada de ar úmido da chaminé por empuxo.



Fonte: Traduzido de Islam e Morimoto (2015a)

Figura 22. Componentes do resfriador ZESS.



(a) dimensões do resfriador e tubos de ar; (b) composição do colchão de umedecimento; (c) dimensões da chaminé e sentido de circulação do ar; (d) dimensões do pote de barro com água.

Fonte: Traduzido de Islam e Morimoto (2015a)

Os materiais e dimensões básicas da caixa são os mesmos do modelo anterior (Figura 22). Os acréscimos e modificações foram:

- duto (\varnothing 20mm) por baixo da parede externa, para promover a circulação de ar desde a base do colchão úmido;
- o painel de adsorção foi substituído por uma coifa metálica (0.92x0.92m e 0.8m de altura, chapa de alumínio de 3mm de espessura);
- o radiador metálico foi substituído por um reservatório de barro, removível (5cm x20cmx 40cm de altura = $4000 \text{ cm}^3 = 4000 \text{ ml} = 4 \text{ L}$ e 5mm de espessura, 4 litros);
- colchão úmido teve redução, passando a ter 55mm (40mm de areia + zeólito e 15mm de areia grossa);
- rega: microaspersores de baixa pressão de $0 - 3.8 \text{ L h}^{-1}$, padrão de fluxo suave de 360° , tendo sido ajustada para 1.2 L h^{-1} ;

O espaço de armazenamento tem $0.7 \times 0.9 \text{ m}$ e 0.5 m de altura, 310 litros.

A temperatura do ZESS chegou a 15°C abaixo da temperatura do ar externo, enquanto a umidade relativa interna chegou a 20% acima da umidade relativa externa.

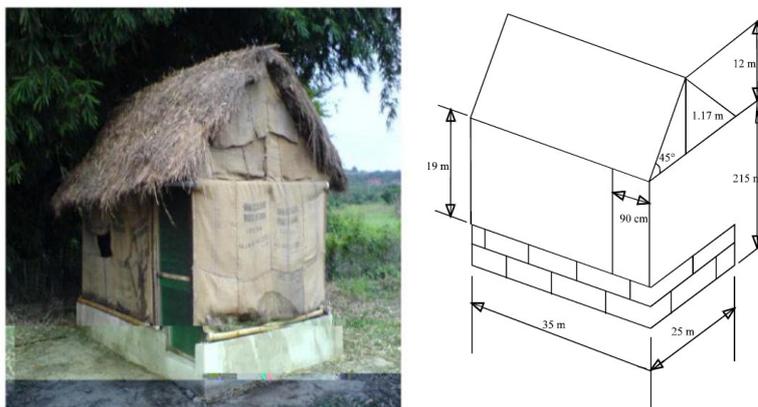
2.2.7 Celeiro com resfriamento evaporativo (*evaporative cooling barn*), Universidade de Cape Coast - Gana

Este modelo se diferencia dos anteriores, em forma e materiais (Figura 24). É do tipo “câmara com porta”, testado em Gana, entre 2008 e 2010, utilizando:

- pilares de madeira nativa de avodire (*Turraeanthus africanus*);
- piso cimentício (traço 1: 3: 3, 40mm);
- base das paredes de alvenaria de blocos de concreto rebocado (para durabilidade e resistência a insetos);
- colchão úmido de sacos de juta (46 unidades);
- porta de tela;
- vigas e calhas de bambu;
- cobertura de palha;
- rega com tubo de PVC (3”) no topo das paredes para umedecer os sacos de juta.

O local é uma savana costeira, com precipitação anual de 750 a 1200 mm (BOAMAH apud ABANO et al., 2011) e tem duas estações principais: chuvosa e seca, com temperaturas altas (máxima geralmente entre 30-36°C, mínima entre 22-26°C (AYITTAH apud ABANO et al., 2011) e umidade relativa: 65 a 70% (Estação Meteorológica, 2002). A eficiência de resfriamento do sistema foi determinada em 127% pelo autor, mas é bom frisar que este dado é passível de dúvida.

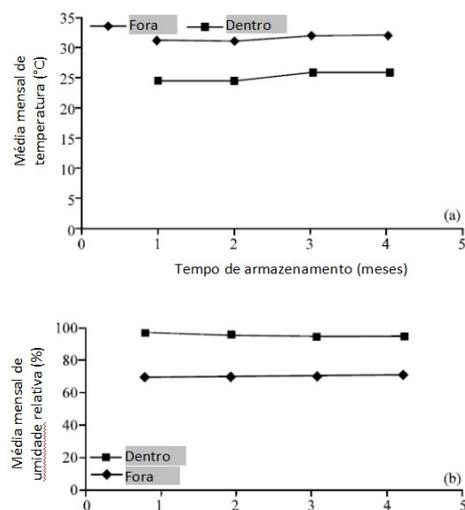
Figura 24. Celeiro com resfriamento evaporativo.



Fonte: Abano et al. (2011)

A rega desse sistema é manual. O desempenho do resfriador pode ser observado na Figura 25. Questiona-se se a durabilidade dos sacos de juta expostos às intempéries é compatível com os demais materiais utilizados.

Figura 25. Desempenho de temperatura e umidade do resfriador de juta.



Fonte: Traduzido de Abano et al. (2011)

2.2.8 Resfriador evaporativo (*evaporative cooler*), Politécnica de Bolgatanga e Universidade da Ciência e Tecnologia, Kumasi – Gana

Foi realizado em Navrongo, Gana e conduzido entre 2014-2015. As paredes duplas são de argila moldada, com 14,4cm de espessura (dimensões internas de 50x70cm e externas de 70x86cm) (Figura 23). Seweh et al. (2016) explicam que a escolha da argila se deve à sua baixa condutividade de calor e baixo custo. A tampa é de estrutura de madeira e filme de polietileno, com abertura para saída de ar.

Figura 23. Resfriador evaporativo de Gana.



Figura 1 Esboço no AutoCAD do resfriador evaporativo

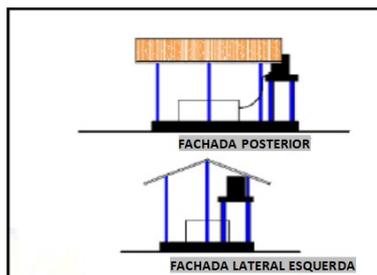


Figura 2 Fachadas posterior e lateral esquerda do resfriador evaporativo

Fonte: Traduzido de Seweh et al. (2016)

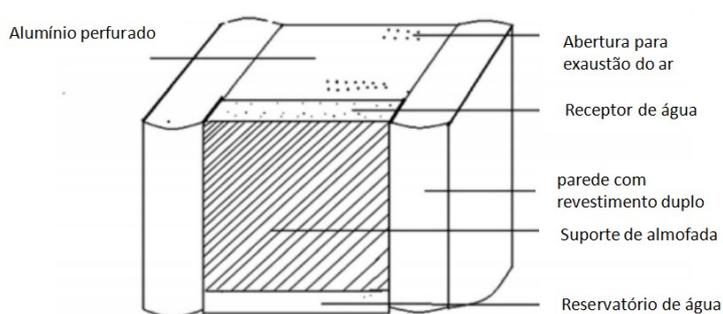
O vão do colchão úmido é um vazio de 8cm. A rega, por gotejamento, foi feita com mangueira perfurada (furos de 3mm a cada 10cm), conectada a um reservatório suspenso (50 litros).

A temperatura média mensal de bulbo seco (Tdb), umidade relativa, (RH), foram 27,25°C, 70,50% - para o armazenamento ambiente - e 24.1°C, 89.50% - para o armazenamento no resfriador evaporativo e a eficiência de resfriamento do resfriador evaporativo foi de 87,17%.

2.2.9 Resfriamento evaporativo com argila (*clay evaporative cooling*), Fazenda Experimental Michael Okpara, Universidade de Agricultura, em Umudike, Estado de Abia - Nigéria

Esse modelo, apesar de muito mal documentado, representa preocupação dos autores em valorizar os materiais locais para sua construção e foi monitorado em 2009. Apesar da falta de dados detalhados, este modelo foi mantido na revisão de literatura por não haver publicação de outros exemplares similares.

Figura 26. Projeto e construção finalizada do protótipo.



Fonte: Traduzido de Ndukwu (2011)

É uma caixa de paredes duplas (interna com 52x60cm e externa com 67x75cm) e 85cm de altura (Figura 26). As paredes são de argila, estruturadas com bambu e moldadas sobre uma base de terra argilosa de 30cm de espessura. Não é mencionado o material utilizado no vão de 15cm entre as paredes. São descritas divisórias internas para o armazenamento de hortifrúti. A tampa é uma lâmina de alumínio com orifícios (2.5mm) para exaustão do ar quente.

Uma das paredes da caixa é o colchão úmido (42x85cm e 8cm de espessura), de serragem de madeira, estruturado por bambu e com dreno para o excedente de água. A rega foi manual, 3 vezes ao dia, às 7h, 12h e 16h, com balde (6 litros). A eficiência de resfriamento deste resfriador variou de 20% a 92%.

• **Comportamento higrotérmico de materiais terrosos:**

As propriedades dos materiais terrosos, tais como: textura, porosidade, área de superfície específica, higroscopicidade, molhabilidade, capilaridade, condutividade hidráulica e resistência à difusão de vapor, são propícias para a dinâmica de evaporação e da saturação de umidade, frente a temperatura e a umidade relativa em que estes materiais estarão expostos (REMPEL; REMPEL, 2016).

De acordo com Rempel e Rempel (2016), a areia é um material terroso que cria poros e canais grandes o suficiente para facilitar a difusão de vapor, mesmo com alta umidade; reduz o conteúdo de água ambiente em comparação com texturas mais ricas em argila; e diminui o coeficiente de transporte de água líquida.

A areia é passiva de inchamento que, de acordo a NBR 6467 (2006) é o “fenômeno de variação de volume aparente, provocado pela absorção de água livre pelos grãos do agregado, que altera sua massa unitária.” A película de água ao redor dos grãos de areia os separam uns dos outros. Com mais umidade a água toma os esforços e os grãos de areia sofrem adensamento, retomando o mesmo volume que obtém em seu estado completamente seco.

De acordo com Rempel e Rempel (2016), essas influências dos materiais terrosos juntas aumentam o fluxo de calor latente, permitindo que a maior parte do transporte de umidade ocorra na fase de vapor (ou seja, a razão de transporte líquido-vapor).

Ainda de acordo com os estudos dos referidos autores, a espessura de um elemento de terra afeta sua capacidade de resfriamento evaporativo: uma parede mais espessa pode absorver uma determinada quantidade de energia enquanto mantém uma temperatura interna mais fria, retardando a condução de calor para as superfícies internas; uma parede mais fina promove maior resfriamento evaporativo (REMPEL; REMPEL, 2016).

A elevada exposição à radiação solar pode transformá-las em acumuladoras de calor e provocar elevação da temperatura interna. É preciso minimizar os ganhos solares através de isolamento térmico externo ou com sombreamento, principalmente da face mais exposta à Oeste, durante o dia (PROJETEE, 2022).

- **Inércia térmica e resfriamento evaporativo inerentes a materiais terrosos:**

De acordo com a Projetee (2022), a inércia térmica é um atraso térmico no fluxo de calor devido a uma alta capacidade de um material em armazenar calor, fazendo com que o pico de temperatura interna de uma edificação apresente uma defasagem e um amortecimento em relação ao externo.

Devido a inércia térmica, durante o verão o calor é absorvido por elementos de adobe, assim como no inverno, o calor é armazenado durante no período diurno e liberado internamente durante o período frio (PROJETEE, 2022). A inércia térmica ocorre também devido ao armazenamento do “frio” noturno (REMPEL; REMPEL, 2016), mesmo as do período de verão.

O uso da estratégia de inércia no envelope só tem efeito se não ocorrer ventilação natural no ambiente interno, porque com a ventilação a temperatura interna aumenta de acordo com a temperatura externa, impossibilitando a ocorrência do atraso térmico obtido apenas com o fluxo de calor que ocorre através das paredes (PROJETEE, 2022).

Ainda de acordo com a Projetee (2022) a inércia térmica é particularmente benéfica em regiões de clima mais seco onde há uma grande diferença entre as temperaturas diurnas e noturnas externas. Já em climas quentes e úmidos o resfriamento passivo é geralmente mais eficaz em edifícios com pequena inércia térmica (PROJETEE, 2022).

De acordo com os estudos citados por Rempel e Rempel (2016) há uma sugestão de que a terra possui um resfriamento evaporativo próprio e natural, que contribui significativamente para manter uma temperatura interna mais amena, em relação a temperatura externa. Assim como, estabiliza a umidade relativa interna em um percentual abaixo dos níveis médios externos. Esse resfriamento evaporativo próprio da terra se deve ao seu conjunto de características higrotérmicas - citadas no item **Comportamento**

higrotérmico de materiais terrosos - que são favoráveis para a ocorrência do fenômeno em questão.

A umidade noturna elevada em climas semiáridos, por exemplo, é um fator importante para a ocorrência de resfriamento evaporativo natural do adobe, por exemplo, já que o mesmo precisa ser feito de terra composta por um percentual de 15% a 20% de argila e o restante de areia. Devido a presença de argila, é possível hospedar camadas de água líquida adsorvida, pois a curva de retenção de umidade tende a ser maior para solos mais argilosos (REMPEL; REMPEL, 2016).

Rempel e Rempel (2016), afirmam que o resfriamento evaporativo natural aos materiais terrosos permite que os mesmos troquem umidade com o ar interno, ajudando a manter a umidade relativa dentro de faixas insuficientes para promover o desenvolvimento microbiano, mas suficientemente altas para promover redução de temperatura interna, em relação à externa.

2.3 Outros modelos de resfriadores evaporativos

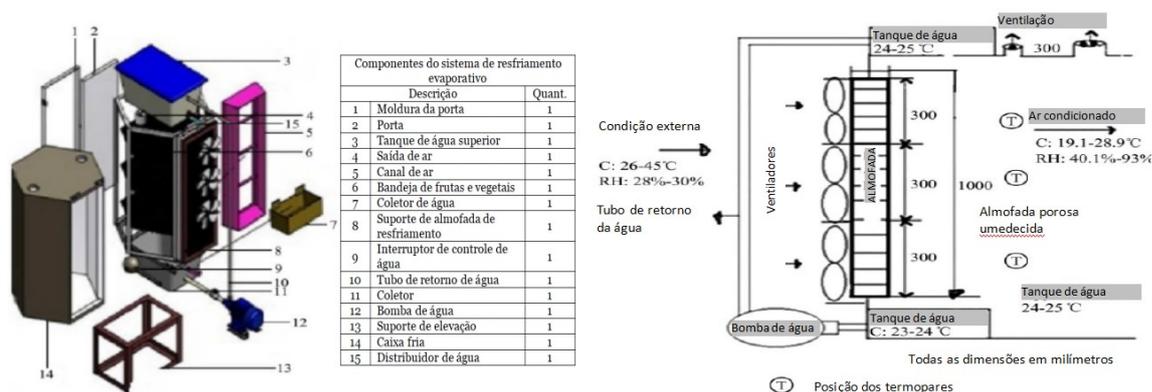
Na literatura são mencionados outros modelos, mas que, dado o seu grau de industrialização, não foram considerados aplicáveis para o contexto delimitado (locais remotos e de baixo IDH). Entretanto, dão boas indicações de materiais, que podem ser utilizadas para a concepção do resfriador em estudo.

2.3.1 Resfriador evaporativo com ventilador e bomba de água (*Evaporative Cooling System – EVC*) - Universidade de Agricultura, em Umudike, Estado de Abia - Nigéria e Universidade Federal de Tecnologia, em Akure, Estado de Ondo – Nigéria

O EVC, elaborado em Akure, Ondo, Nigéria, é composto por ventilador, bomba de água, reservatório de água e colchão úmido (Figura 27). O ar externo (quente) é captado por três ventiladores, que o insuflam no colchão úmido. Foram utilizados como materiais:

- fibras de palma (resíduos do processamento de óleo de palma);
- carvão vegetal (da queima de lenha);
- fibra de juta (tecido);
- espuma de látex triturada (estofamento em fábricas de móveis).

Figura 27. Componentes físicos do EVC e representação esquemática de funcionamento.



Fonte: Traduzido de Ndukwu e Manuwa (2015)

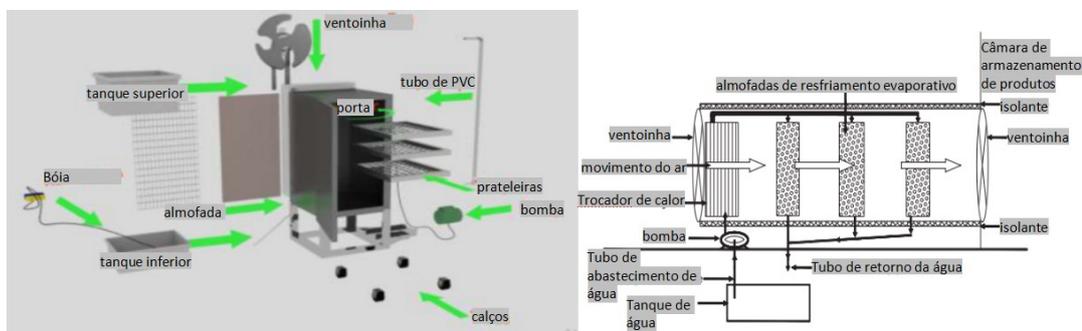
Cada colchão úmido, de cada material citado foi moldado em blocos de 30×40cm e 60mm de espessura, com densidade em torno de 20-22kg/m³, para ser umedecido pelo topo, por gravidade. Os autores observaram a necessidade de substituição mensal dos materiais utilizados.

A eficiência de resfriamento ocorreu na faixa de 17,3% a 98,8%.

2.3.2 Sistema de resfriamento evaporativo (*Active Evaporative Cooling System*) Universidade de Canaan Land - Nigéria e Universidade do Kentucky - Estados Unidos

Com o mesmo princípio de funcionamento do modelo anterior, este exemplar (Figura 28) utiliza um colchão úmido de juta (2cm de espessura), estruturada por malha e moldura metálicas. Sua eficiência de resfriamento foi avaliada com média de 86,01%.

Figura 28. Unidade com resfriamento indireto do ar e resfriamento evaporativo.



Fonte: Traduzido de Babameru et al. (2018)

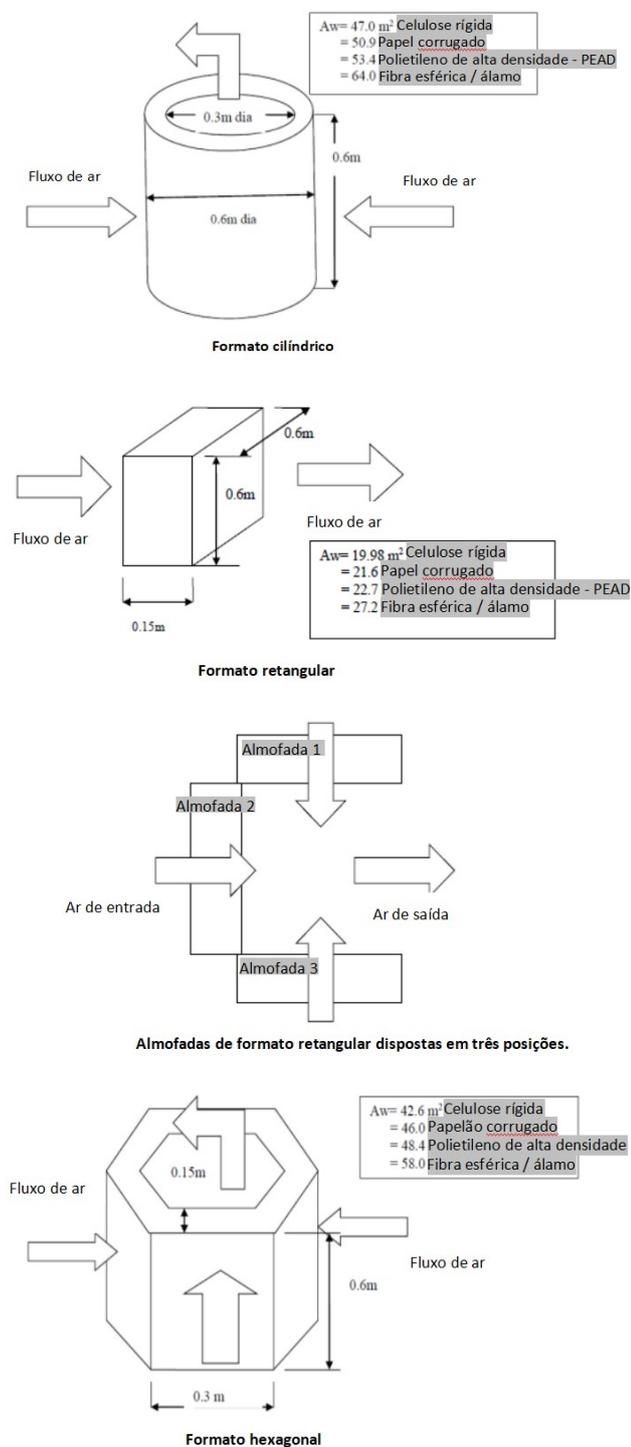
2.3.3 Resfriamento evaporativo direto (*Direct Evaporative Cooling - DEC*), Maulana Azad National Institute of Technology, em Bhopal - Índia

Este trabalho testou diferentes formatos para o resfriador (retangular, cilíndrico e hexagonal) (Figura 29), utilizando como colchão úmido, placas de 15cm de:

- celulose rígida;
- papelão corrugado;
- polietileno de alta densidade - PEAD;
- fibra esférica / álamo.

Os testes ocorreram em Bhopal, Índia, em época com temperatura média máxima de 39,9°C e umidade relativa de 32,8%.

Figura 29. Formatos cilíndrico, retangular e hexagonal de colchões úmidos.



Fonte: Traduzido de Kulkarni e Rajput (2013)

Os autores verificaram que:

- o fluxo de massa do ar e velocidade do vento precisa ser aumentado, à medida que o volume do colchão aumenta, a menos que a espessura e a área de superfície molhada por unidade de volume sejam maiores;
- quanto maior a espessura do colchão úmido, maior a área de superfície molhada, conseqüentemente, maior eficiência do resfriador;
- o desempenho de tais resfriadores exige grandes vazões de água para umedecimento adequado das superfícies;
- espera-se que os materiais com áreas de superfície umedecidas maiores tenham melhor desempenho.

A maior eficiência de saturação foi de 91% para a almofada hexagonal de álamo. A eficiência mais baixa foi de 72,4% com a almofada retangular de celulose.

2.4 Considerações sobre os modelos identificados na literatura

Muitos dos modelos apresentados são experimentos, seja em ambiente controlado ou real, demandando estudos de adaptação. Nesse sentido, as complementações construtivas aplicadas na Universidade de Ehine melhoraram o desempenho dos resfriadores, as medições auxiliaram na identificação do ponto ótimo de rega, assim como das melhores condições de temperatura, umidade e velocidade do vento.

A capacidade de armazenamento é um dado importante ao tratar de projetos de resfriador para uso coletivo, demandando resfriadores tipo “câmara com porta” e não “caixa com tampa”. Para aumentar a capacidade de armazenamento, é preciso considerar:

- o tamanho das caixas de transporte e do espaço de circulação;
- a variação de desempenho dentro do resfriador (base em relação ao topo e influência das aberturas).

Para a forma e localização, foram identificadas informações relevantes:

- formato cilíndrico alcançou maior grau de desempenho refrigerativo. A ver a transferência desse partido, no desenho de uma caixa para uma câmara;
- prover sombra, para prevenir ganho de temperatura por radiação;
- localizar em ambiente bem ventilado;
- semienterrar, quando possível, para tirar proveito das baixas temperaturas abaixo do nível do solo;
- favorecer a evaporação (combinar temperatura alta e umidade baixa).

Há referências na literatura que utilizaram areia e terra como materiais construtivos, demonstrando ser possível a sua utilização.

A recirculação de água, apesar de ser desejável do ponto de vista da preservação do recurso, tem gargalos: o excedente necessita ser recuperado e armazenado (calhas e reservatório), há risco de contaminação da água pelo material utilizado no colchão úmido ou microrganismos que se desenvolvem nele e que podem proliferar com o armazenamento.

O controle desses microrganismos demanda um aporte tecnológico que não condiz com a proposta. Dado que necessita de bastante aprofundamento, esse assunto não foi detalhado nesta revisão. Dessa forma, o uso otimizado da água, por meio de análise de dados de medição de temperatura, junto a métodos matemáticos de algoritmos genéticos e redes neurais, foi a solução identificada na literatura, que se mostrou mais apropriada para o contexto delineado.

Outra característica a ser seguida é a aparência, que deve ser boa, pois uma construção muito rudimentar ou de aparência não agradável terá menores chances de conquistar a confiança do agricultor. São traços não técnicos, mas socioculturais, que podem/devem fazer parte do processo de desenvolvimento de um produto.

Essas considerações suscitam atenção para a maneira de se prover os resfriadores à comunidade, que interfere tanto no custo direto (o resfriador em si) quanto no indireto (gestão, equipe, equipamentos, ferramentas), sendo algo a ser profundamente considerado na viabilidade da aplicação. E, pensar nessa provisão (formal - pública, privada, cooperativa,

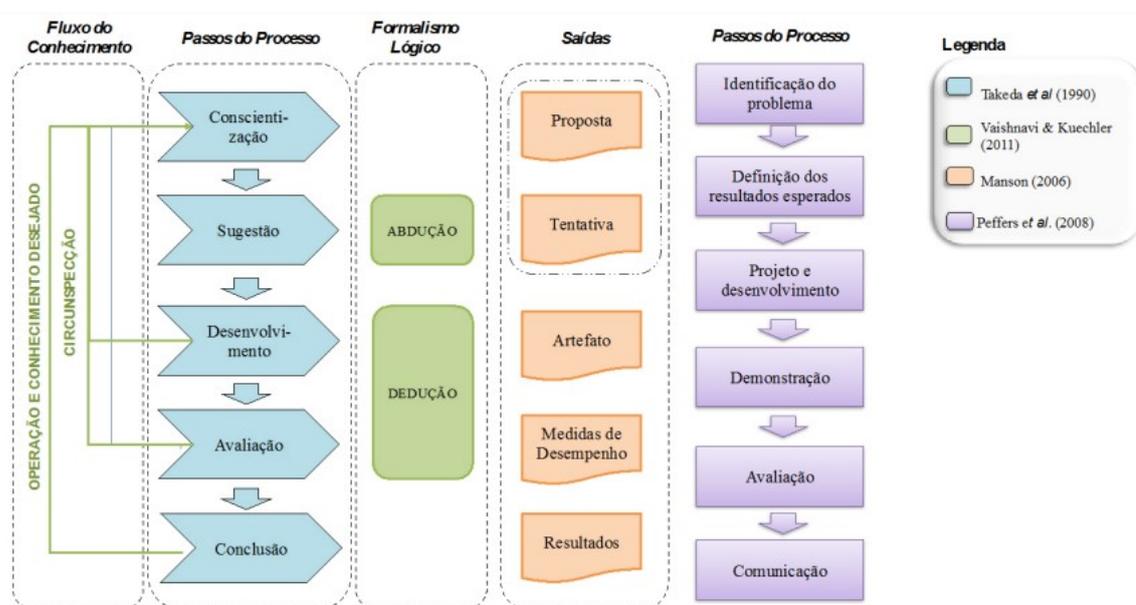
autoconstruída - ou informal), impacta o desenho (facilidade de construção) e as demais escolhas (transporte, materiais, equipamentos, ferramentas, manutenção). Por essas condições e buscando alcançar maior grau de aplicabilidade desses resultados, é proposto neste trabalho, realizar um estudo com foco no usuário, abordando aspectos trabalhados pela noção de tecnologia apropriada.

3 MÉTODO

Este é um trabalho de caráter experimental (GIL, 2017), envolvendo dados secundários (revisão de literatura) e primários (concepção, construção e medição).

Os procedimentos de coleta de dados seguiram passos básicos característicos do método de pesquisa *Design Science Research* - DSR (LUKKA, 2003; VAN AKEN, 2004 apud LACERDA et al., 2013) para gerar um produto com base na aplicação de experimento (SIMON, 1996, p. 28 apud LACERDA et al., 2013). O produto desta pesquisa classifica-se como um constructo (MARTH; SMITH, 1995 apud LACERDA et al., 2013).

Figura 30. Processo DSR



Fonte: Takeda et al., 1990; Vaishnavi; Kuecheler, 2009; Manson, 2006; Peffers et al., 2008 apud Lacerda et al. 2013

Processo e produto se confundem como “resultados” do experimento quando se trata de DSR. Assim, este item de método é bastante sucinto até o passo que trata da concepção da solução (ou projeto e desenvolvimento), para que o processo seja apresentado também como parte do resultado.

Já o item de validação (ou avaliação) é explicado em detalhes no método, para que o desempenho possa ser tratado mais objetivamente no item de apresentação de resultados.

Assim, exprimindo o conteúdo da Figura 30. Processo DSR, foram realizados os seguintes passos:

3.1 Identificação do problema

Foi realizada através de revisão de literatura e aborda a necessidade de conservação de alimentos por meio de resfriamento evaporativo, e a oportunidade de adaptação para uso em locais remotos. O produto correspondente a esse passo está apresentado na Introdução;

3.2 Identificação das soluções

Também via análise de referencial teórico, o processo de resfriamento evaporativo, assim como seu funcionamento, foi detalhado. Foi realizado um levantamento de diferentes modelos de resfriadores evaporativos, suas características construtivas, custos e métodos de medição de temperatura e umidade. Este passo está apresentado no item “Resfriadores evaporativos e seu desempenho”;

3.3 Concepção da solução

O resfriador foi concebido com base no processamento dos dados coletados em literatura, na experiência dos pesquisadores e consultores envolvidos e na escassez de recursos do contexto genérico de destino.

Houve uma evolução de projeto, podendo ser sintetizado em 4 versões. Essa evolução do projeto não ocorreu de forma linear, tendo sido entremeada por revisão de

literatura, pesquisas de campo, consulta a especialistas e aprendizado durante a execução. O projeto proposto é o resultado do *as built*, com introdução de novas modificações;

3.4 Construção do protótipo

Um protótipo em escala real foi construído dentro do campus da UFMS, para geração de dados a serem utilizados em futuras transferências. As etapas construtivas seguiram a ordem convencional de execução de obras, precedida pela atividade de produção de adobes, dado seu caráter artesanal:

- Produção de adobes estabilizados: traço 1:12, de cimento, terra, com variação do volume de água. Fibra de polipropileno foi acrescentada (100 gramas a cada 160 litros de massa);
- Escavação, nivelamento e compactação de vala;
- Execução de fundação;
- Execução de paredes duplas com contrafortes e preenchimento do colchão de areia;
- Execução de cobertura e coifa;
- Execução de porta, acesso e instalação hidráulica.

Apesar de desejável, as condições idênticas de trabalho das comunidades de destino (hipotéticas) não puderam ser experimentadas, dadas as limitações de tempo e esforço físico demandado.

Assim como no processo de projeto, a construção não ocorreu de forma linear, tendo também sido entremeado por revisão de projeto, pesquisas de campo, consulta a especialistas e aprendizado durante a execução, refletindo o esquema presente em variadas fontes da literatura sobre DSR (Figura 30).

3.5 Validação da solução

A validação do protótipo foi feita por meio de comparação com as diferenças de temperatura (Δt) e eficiências de resfriamento (ϵ) alcançadas por resfriadores evaporativos da literatura e do resfriador evaporativo comercial tipo colmeia da Basenge (por possuir uma

tabela que prevê as diferenças de temperaturas que podem ser alcançadas para cada situação de temperatura e umidade externa).

A máxima eficiência de resfriamento desejada para a câmara de resfriamento evaporativo, é de até 100%. Além disso, foram analisados parâmetros que demonstram a integridade do resfriador, ao longo do período da coleta de dados.

Como o protótipo foi construído em ambiente exposto a temperatura, umidade, radiação solar, chuva, vento, entre outras características locais, estando sujeito a todas as interferências de entorno e de clima local. Assim:

- foi feita uma caracterização dessas condições (que diferem das ideais e das condições dos locais das comunidades para as quais o resfriador desta pesquisa se destina) para delinear as suas limitações;
- foi definido um programa de rega;
- instrumentou-se o resfriador para medição de temperatura e umidade;
- foram coletados dados para atestar o funcionamento do resfriador;
- foram adotados parâmetros de materiais construtivos, formatos e comportamento evaporativo da construção.

3.5.1 Condições do local de construção do protótipo

Como Lal Basediya, Samuel e Beera (2011) já haviam dito, os resfriadores evaporativos são capazes de atingir temperaturas 10 a 15°C menores do que a temperatura ambiente, mantendo umidade relativa em torno de 90%. Esses parâmetros foram, em um primeiro momento, adotados como referência.

Entretanto, o local de implantação do protótipo é diferente das condições dos destinos. O protótipo foi projetado e construído considerando os parâmetros de tecnologia apropriada. Uma possível comunidade de destino poderá ser a região de São Domingos, em Guiné Bissau, que durante a estação seca (de outubro à junho), tem temperatura média diária acima é de 34°C. Durante o dia aumenta de 18°C até 35°C e durante a noite reduz de 35°C até 18°C. A menor taxa de umidade, durante a estação seca, chega à 5%. A pluviosidade

média é de 200 mm em outubro, e de 0 mm em março². Nessas condições, verduras, frutas e legumes recém colhidos tem baixa durabilidade, havendo perdas por amadurecimento acelerado e murchamento.

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 RPPN de 50,11 hectares, com vegetação de cerrado (raio de 10m) e dista 250m de um corpo d'água (Lago do Amor) (Figura 31). Apesar de serem fatores que interferem no desempenho do resfriador, o local foi escolhido por ser seguro e de acesso facilitado.

Figura 31. Características do entorno do resfriador do cerrado.

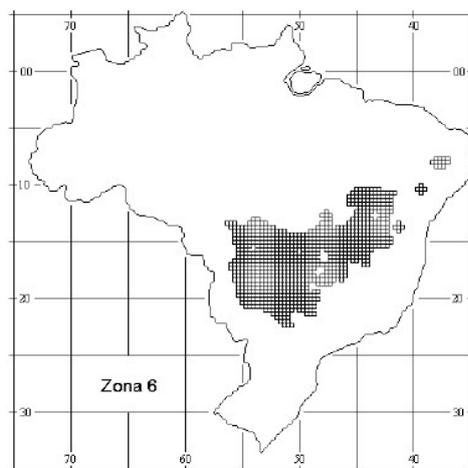


Fonte: Google Maps (2020).

Quanto à zona bioclimática, de acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), Campo Grande/MS encontra-se na zona bioclimática 6, que indica o resfriamento evaporativo como uma estratégia de condicionamento térmico adequada para o local, conforme mostram as Figura 32 e Figura 33 e o Quadro 1. Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 6, que inclui Campo Grande/MS.

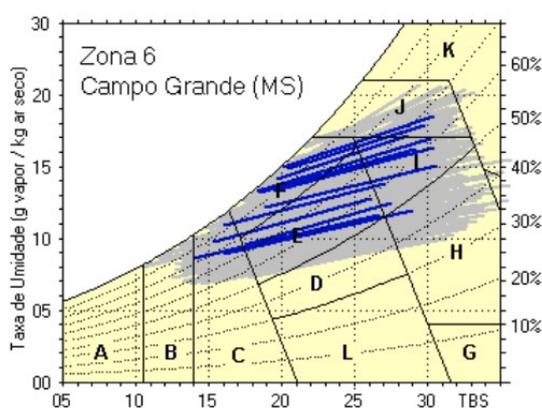
² Fonte: <https://pt.weatherspark.com/y/31647/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Bissau-Guin%C3%A9-Bissau-durante-o-anos#:~:text=Em%20Bissau%2C%20a%20esta%C3%A7%C3%A3o%20com,superior%20a%2038%20%C2%B0C>.

Figura 32. Zona Bioclimática 6.



Fonte: NBR 15220-3 (2005).

Figura 33. Carta bioclimática de Campo Grande / MS.



Fonte: Roriz e Roriz (2010).

Quadro 1. Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 6, que inclui Campo Grande/MS.

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	H) Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento J) Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa)
Inverno	C) Vedações internas pesadas (inércia térmica)
Nota: Os códigos H, J e C são os mesmos adotados na metodologia utilizada para definir o Zoneamento Bioclimático do Brasil (ver anexo B).	

Fonte: NBR 15220-3 (2005).

O lugar é caracterizado por verões quentes e chuvosos e inverno com temperaturas oscilantes e predominantemente seco. Ao longo do ano, em geral a temperatura varia de 16 °C a 31 °C e raramente é inferior a 10 °C ou superior a 36 °C. Vale notar que as temperaturas baixas de inverno não são as ideais para a ocorrência de evaporação, mas foi o viabilizado para o estudo.

No cerrado o clima predominante é o tropical-quente-subúmido, caracterizado por uma estação seca (maio a setembro) e outra chuvosa (outubro a abril). A precipitação média anual é de 1500 ± 500 mm. Podendo ocorrer períodos de seca de uma a três semanas, durante o período chuvoso, principalmente nos dois primeiros meses do ano (EMBRAPA, 2012).

As circunstâncias de implantação do protótipo (interferências do entorno e limitações do clima local) são mais amenas e limitam o desempenho do resfriador.

A determinação da eficiência de saturação é dada por Riangvilaikul (2010, apud BOTTEGA; SOUZA, 2015, p. 139):

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

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).

Para determinar: TBS_e e URe foram consideradas os dados de temperaturas e umidades relativas externas do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET; TBS_s foram considerados os dados dos sensores instalados no interior do resfriador; TBU_e, recorreu-se à carta psicrométrica, utilizando a TBS_e e URe considerando as medições que alcançaram as maiores diferenças de temperatura interna e externa, em cada período de rega.

3.5.2 Programa de rega

O resfriador depende de umidade no colchão úmido para ter um bom desempenho evaporativo. Para que não haja desperdício de água e nem escassez, a ponto de

comprometer o funcionamento do resfriador, é necessário encontrar o volume ótimo de água, que proporcione os maiores ganhos possíveis.

Para buscar a quantidade de água ideal para obter o melhor desempenho resfriativo, foi elaborado um programa de diferentes volumes de rega e de frequência por dia, tendo como ponto de partida, o modelo ZESS de Islam e Morimoto (2015a), o mesmo no qual se baseou a definição de forma e materiais.

A rega do ZESS variou de 5 a 30 litros/dia, alcançando a condição ideal aos 20 litros/dia. Proporcionalmente, o resfriador do Cerrado é 39.8 vezes maior do que o ZESS (considerando o volume de areia usado no colchão úmido). Nessa regra, o resfriador poderia chegar a uma rega diária máxima de quase 1200 litros, o que, já de início, foi avaliado como um volume muito grande (considerados os contextos das comunidades de destino).

Por isso, um planejamento com menores volumes foi elaborado: 50, 100, 200, 400 e 800 litros/dia. O limite de 800 litros é relativo ao ideal encontrado na referência, o que também pode ser considerado alto. A frequência diária: 4 regas a cada 3 horas, iniciando às 06h00 e concluindo as 15h00.

Foi estipulado um período de 2 semanas (15 dias) para cada volume, dado que o resfriador está exposto às condições naturais do clima local. Com esse período, o efeito negativo das variações de temperatura ou eventuais chuvas, que mascarariam o seu desempenho, poderia ser minimizado.

Com 6 diferentes quantidades de água a serem testadas, o tempo total do programa de rega foi definido em 90 dias, de junho a novembro de 2020, ultrapassando o período seco dado como ideal (Quadro 2).

Quadro 2. Volume, frequência e duração das regas.

período	volume (litros)	frequência/dia	duração (dias)
29/06 a 13/07/2020	seco	4x, a cada 3h, desde 6h	15
29/08 a 12/09/2020	40	4x, a cada 3h, desde 6h	15
13/09 a 27/09/2020	100	4x, a cada 3h, desde 6h	15
28/09 a 12/10/2020	200	4x, a cada 3h, desde 6h	15
13/10 a 27/10/2020	400	4x, a cada 3h, desde 6h	15
28/10 a 11/11/2020	800	4x, a cada 3h, desde 6h	15

Fonte: Autora (2020).

3.5.3 Instrumentos e medição de temperatura e umidade

Para analisar qual dos volumes de rega é o mais adequado (ou o mais próximo do adequado), foi elaborado um monitoramento de temperatura e umidade. As referências da literatura, todas baseadas em experimentos controlados, em laboratório, deram os primeiros inputs sobre as variáveis medidas e frequência (Quadro 3).

Quadro 3. Frequência, duração e variáveis medidas nos resfriadores de referência.

autor(es)	tempo	temperatura	umidade	velocidade do vento	pressão de vapor	radiação solar
Islam et al., 2012	Intervalos de 1 min, ciclos de 24 horas, (1440 leituras) por 7 dias	1 termômetro digital e 4 termopares, sendo: 3 termopares no topo, meio e chão do ZECC, 1 fora para medir a temperatura externa	1 higrômetro térmico	*	*	*
Islam e Morimoto, 2012	Intervalos de 1min, durante 24h (1440 leituras por dia) por 60 dias	4 termômetros digitais com <i>data logger</i> , cada um com 4 termopares (0,3mm) (precisão de $\pm 0,1$ ° C)	2 termo higrômetros	2 anemômetros digitais com <i>data logger</i>	1 medidor de pressão (variação de 0 a 1 MPa)	1 medidor de energia

continua

continuação

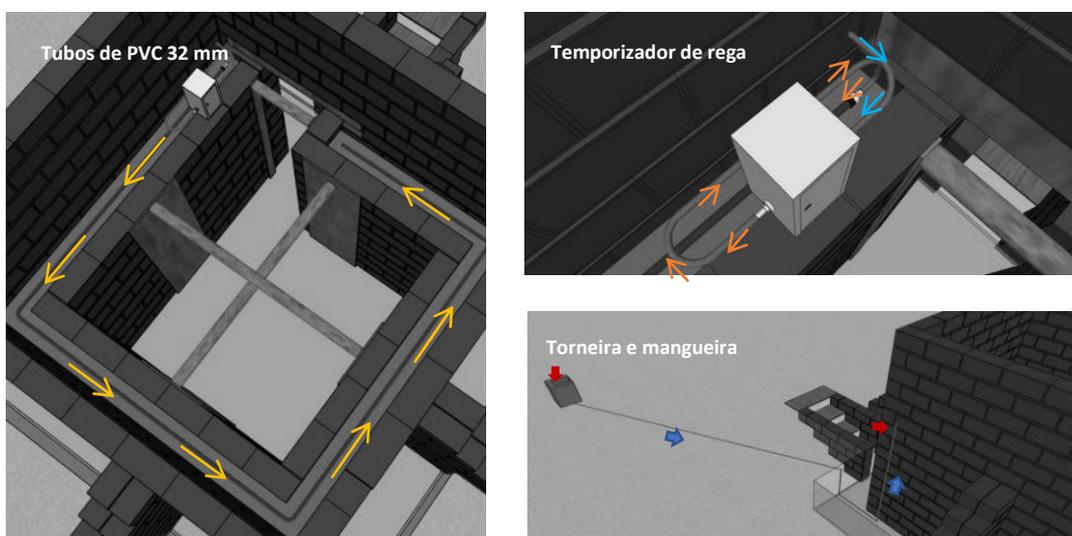
autor(es)	tempo	temperatura	umidade	velocidade do vento	pressão de vapor	radiação solar
Islam et al., 2013	Intervalos de 1min, ciclos de 24 h (1440 leituras por dia) por 1 ano	3 termômetros digitais, 4 termopares (0,3mm) (precisão de $\pm 0,5$ C ^o) para monitorar temperatura interna e externa	1 termo higrômetro	*	*	1 medidor quântico com registrador de dados
Islam e Morimoto, 2014	Intervalos de 1min, ciclos de 24h (1440 leituras por dia) por 23 dias	4 termômetros digitais com <i>data logger</i> , 4 termopares (0,3 mm) (precisão de $\pm 0,1$ C)	2 termo higrômetros com registro de dados	2 anemômetros digitais	1 manômetro (variação de 0 a 1 Mpa)	1 medidor de energia
Ndukwu e Manuwa, 2015	*	4 termopares em 4 pontos centralizados, temperatura média tem suas variações determinadas por equações	Umidade tem suas variações determinadas por equações	1 anemômetro digital de mão	*	*
Abano et al., 2011	*	temperatura diária, com 1 termo higrógrafo digital. A eficiência de resfriamento calculada com temperaturas de bulbo úmido e seco da corrente de ar dentro e fora do celeiro, usando a fórmula matemática	1 termo higrógrafo digital: temperatura, umidade relativa do fluxo de ar interno e externo	Software psicométrico para gerar as outras propriedades dos fluxos de ar	*	*
Ndukwu, 2011	*	termômetros digitais (precisão de $\pm 0,1$ °C) para medir temperatura de bulbo úmido e seco	Higrômetro (precisão de $\pm 0,1\%$)	*	*	*

Fonte: Autora (2020).

A água teve volume controlado pelo temporizador Coel RTST20, posicionado dentro do resfriador, no topo do colchão úmido (precisão de ± 2 seg/dia, conforme manual³) (Figura 34). Sensores foram instalados internamente: 3 Hobo (Onset) H08-003-02 (precisão de $\pm 5\%$, conforme manual⁴) e 1 Data Logger Testo 175T2 (precisão de $\pm 0,2^\circ\text{C}$, conforme site do fabricante⁵) (Figura 35).

Os dados foram comparados com as informações de uma estação meteorológica de referência (INMET), distante 15km do local. Essa estação está instalada na Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, em Campo Grande/MS) que capta e disponibiliza os dados no site <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A702#>. Os dados fornecidos são: temperatura, umidade do ar, velocidade e direção do vento, radiação solar, chuva e pressão atmosférica. Intervalos de 1 hora foram definidos para a coleta de dados, o mesmo praticado pela estação meteorológica de referência. A cada 15 dias os dados foram extraídos (BoxCar Pro 4.0, gratuito).

Figura 34. Fonte da água, posicionamento do temporizador e fluxo da rega.



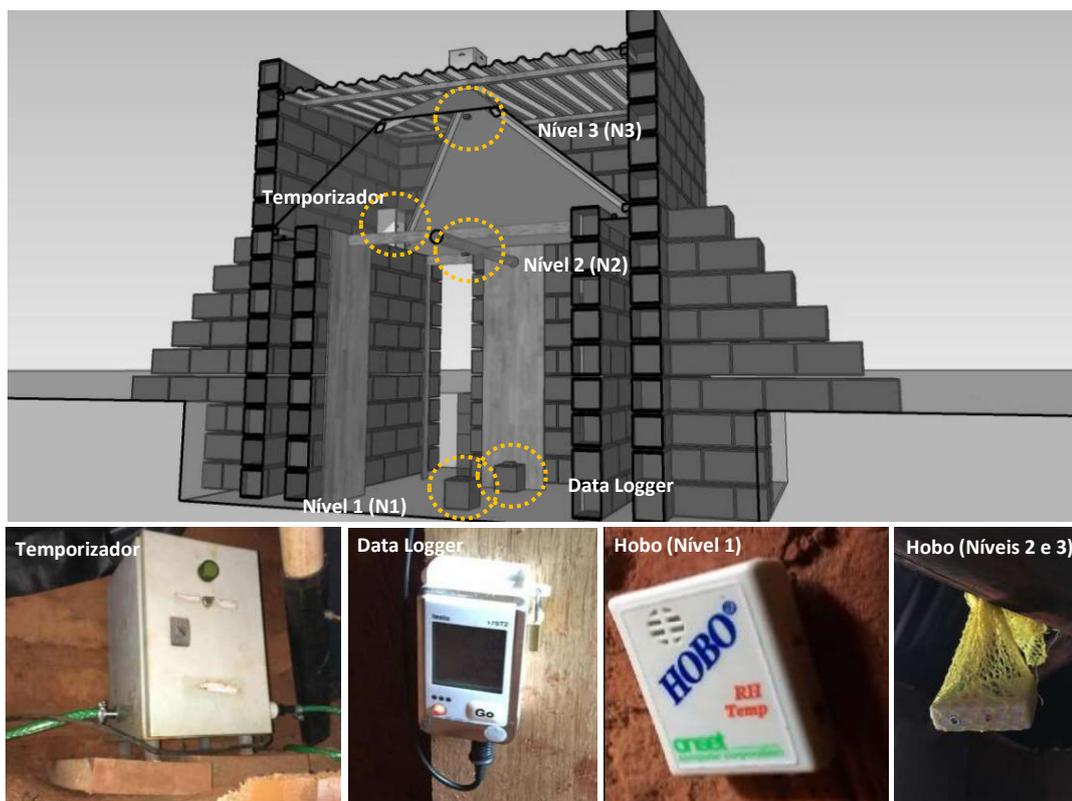
Fonte: Autora (2020).

³ http://www.helegil.com.br/Fotos_pdf/Manual%20RTST-20.pdf

⁴ https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/2016-H%20MAN-HO8.pdf

⁵ <https://www.testo.com/pt-BR/testo-176-t2/p/0572-1762>

Figura 35. Posicionamento dos instrumentos de medição de temperatura e umidade.



Fonte: Autora (2020).

Durante as medições, houve falha em sensores e perdas de dados. Como a medição a 1 m acima do chão foi considerada importante (altura média de trabalho), os dados perdidos foram substituídos por dados calculados, ainda que seja possível que estes dados não representem fidedignamente a realidade:

- umidade a 2,20m(N2) foi calculada para os períodos: 1° ao 15° dia; e do 48° às 19h00 ao 75° dia, sendo:
- variação de umidade entre 0,00m (N1) e 3,20 (N3):

$$\Delta umi = umi_{(N3)} - umi_{(N1)}$$

- redução de umidade por altura, sendo que entre 0,00m(N1) e 3,20m(N3) há 32 acréscimos de 0,10m:

$$umi_{(0,10m)} = \Delta umi / 32$$

- acréscimo total de umidade, sendo que entre 3,20m(N3) e 2,20m(N2) há 11 decréscimos de altura de 0,10m, assim como existem 11 acréscimos de umidade:

$$umi_{(-)} = umi_{(0,10m)} \times 11$$

- então, a umidade a 2,20m(N2) acima do chão é dada por:

$$umi_{(N2)} = umi_{(N3)} - umi_{(-)}$$

- temperatura e umidade no período seco, com rega de 40, 100 e 200 l/dia, as medições do N1 foram substituídas por medições do data logger também instalado no nível do chão.

Durante as primeiras medições, foi notada a necessidade de dados de temperatura e umidade no nível intermediário, entre o chão interno e o topo da parede dupla (2,2m), para possibilitar a compreensão do fenômeno do resfriamento evaporativo e sem interferência da temperatura do chão ou da cobertura. Para compensar a ausência de um sensor a 1m, esse dado foi calculado proporcionalmente, sendo:

- a variação de temperatura entre 2,20m (topo) e 0,00 (chão):

$$\Delta t = t_{(topo)} - t_{(ch\grave{a}o-meio)}$$

- o aumento de temperatura por altura, sendo que entre 0,00m e 2,20m há 21 acréscimos de 0,10m:

$$t_{(0,10m)} = \Delta t / 21$$

- decréscimo total de temperatura, sendo que entre 2,20m e 1,00m há 11 decréscimos de altura de 0,10m, assim como existem 11 decréscimos de temperatura:

$$t_{(-)} = T_{(0,10m)} \times 11$$

- então, a temperatura a 1m acima do chão é dada por:

$$t_{(1m)} = t_{(topo)} - t_{(-)}$$

Para determinar a umidade a 1m foi adotado o mesmo procedimento:

- variação de umidade entre 0,00m (N1) e 2,20m (N2):

$$\Delta umi = umi_{(N2)} - umi_{(N1)}$$

- redução de umidade por altura, sendo que entre 0,00m(N1) e 2,20m(N3) há 21 acréscimos de 0,10m:

$$umi_{(0,10m)} = \Delta umi / 21$$

- acréscimo total de umidade, sendo que entre 1,00m e 0,00m (N1) há 11 decréscimos de altura de 0,10m, assim como existem 11 acréscimos de umidade:

$$umi_{(-)} = umi_{(0,10m)} \times 11$$

- então, a umidade a 1,00m acima do chão é dada por:

$$umi_{(N2)} = umi_{(N2)} - umi_{(-)}$$

3.5.4 Elaboração de indicadores de desempenho da construção

Como a estrutura é submetida à presença constante de água e também devido o risco de desenvolvimento de doenças devido à umidade excessiva, atenção foi dada para a avaliação das paredes duplas de adobe durante as regas. Não se trata de uma avaliação de durabilidade.

3.5.5 Limitações do estudo

O estudo foi realizado com o resfriador vazio, sem prateleiras. E não englobou testes de longevidade de hortaliças. Foram coletados dados de temperatura e umidade. Dados de vento e radiação solar não fizeram parte deste estudo.

Os passos subsequentes previstos no DSR, de retroalimentação e comunicação não foram alvo do estudo, dadas as limitações de tempo. Tais passos também dependem de resultados consistentes para serem executados.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 A concepção da câmara de resfriamento evaporativo

O resfriador proposto é descrito como “câmara” porque tem mais volume interno, com altura suficiente para permitir que o usuário entre e saia por uma porta, configurando um espaço e não mais um utensílio.

4.1.1 Princípios para concepção

A principal referência tecnológica é o ZESS, modelo de Islam e Morimoto, 2015a, que suscitou a escolha dos materiais e o desenho de uma coifa no topo. Esse trabalho foi escolhido por ter investido mais em soluções construtivas, ao invés de equipamentos, para melhorar o desempenho evaporativo.

Os princípios e cuidados seguidos para a concepção, de acordo com a noção de tecnologia apropriada, foram:

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

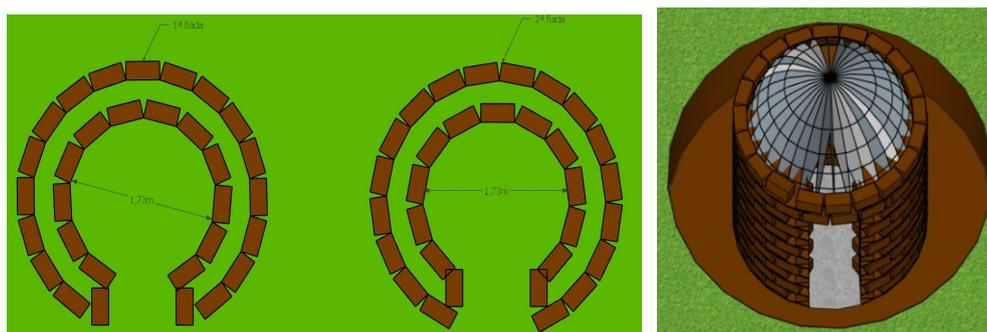
4.1.2 Evolução do projeto

O projeto partiu inicialmente de um volume semienterrado, de forma cilíndrica (Figura 36), de 2,34m² e 5,16m³, para depois ser modificada para uma forma retangular (Figura 37), de 3,66m² e 9,66m³ e, por último, quadrada (Figura 38) de 4,49 m² e 9,60m³. Em todas as versões foram utilizados adobe de 20x20x40cm que são medidas encontradas nas construções visitadas em Guiné Bissau (contexto adotado como referência e descrito em Yuba et al. (2021)).

Apesar da parede cilíndrica ser a mais otimizada em relação a volume de material, tanto a exequibilidade quanto a distribuição dos hortifrúteis na parte interna ficariam comprometidos.

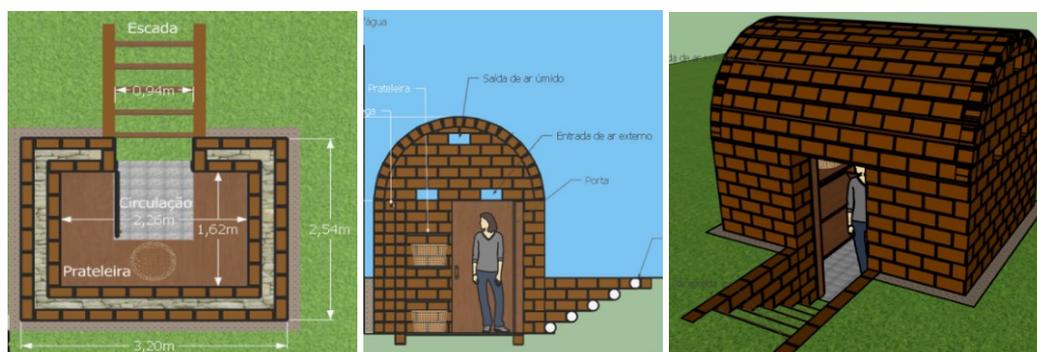
Para evitar o uso de pilares, os adobes formam uma estrutura portante de alvenaria estrutural. Devido à presença de umidade nas paredes, em função do colchão de areia, optou-se por estabilizar o adobe com cimento, para manter a integridade do adobe diante da umidade de chuvas e das regas. A altura das paredes também foi definida pelas restrições impostas pelos adobes, já que cada um pode pesar até 30 kg (adobes de 40cm). A altura final das paredes é a altura que 2 homens sobre andaime conseguem elevar um adobe dessas dimensões.

Figura 36. Versão 1 - cilíndrica com cobertura em cúpula.



Fonte: Autora (2020).

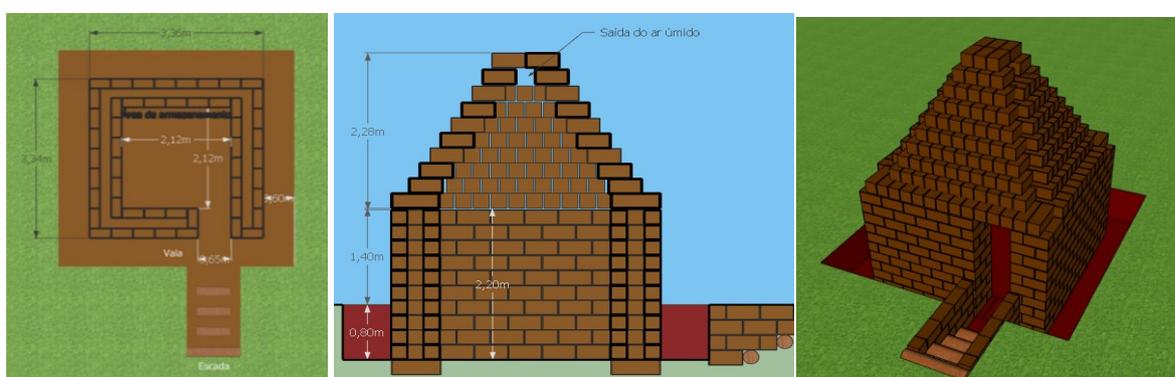
Figura 37. Versão 2 - retangular com cobertura abobadada.



Fonte: Autora (2020).

A versão quadrada foi uma redução da retangular, buscando maximizar o espaço ocupado para prateleiras e minimizar a circulação de pessoas (Figura 39). A porta foi posicionada em um dos lados e sua largura foi reduzida (63cm) para minimizar a entrada de ar quente. A porta tem um vão na porção inferior para permitir a entrada de ar frio. Essa solução também deixa menos exposto a situações que causam deterioração ao conjunto porta e batente. O tamanho das aberturas para entrada e saída de ar foram decorrentes dos materiais disponíveis para executar o protótipo e facilidade de execução.

Figura 38. Versão 3 - quadrada com cobertura piramidal.

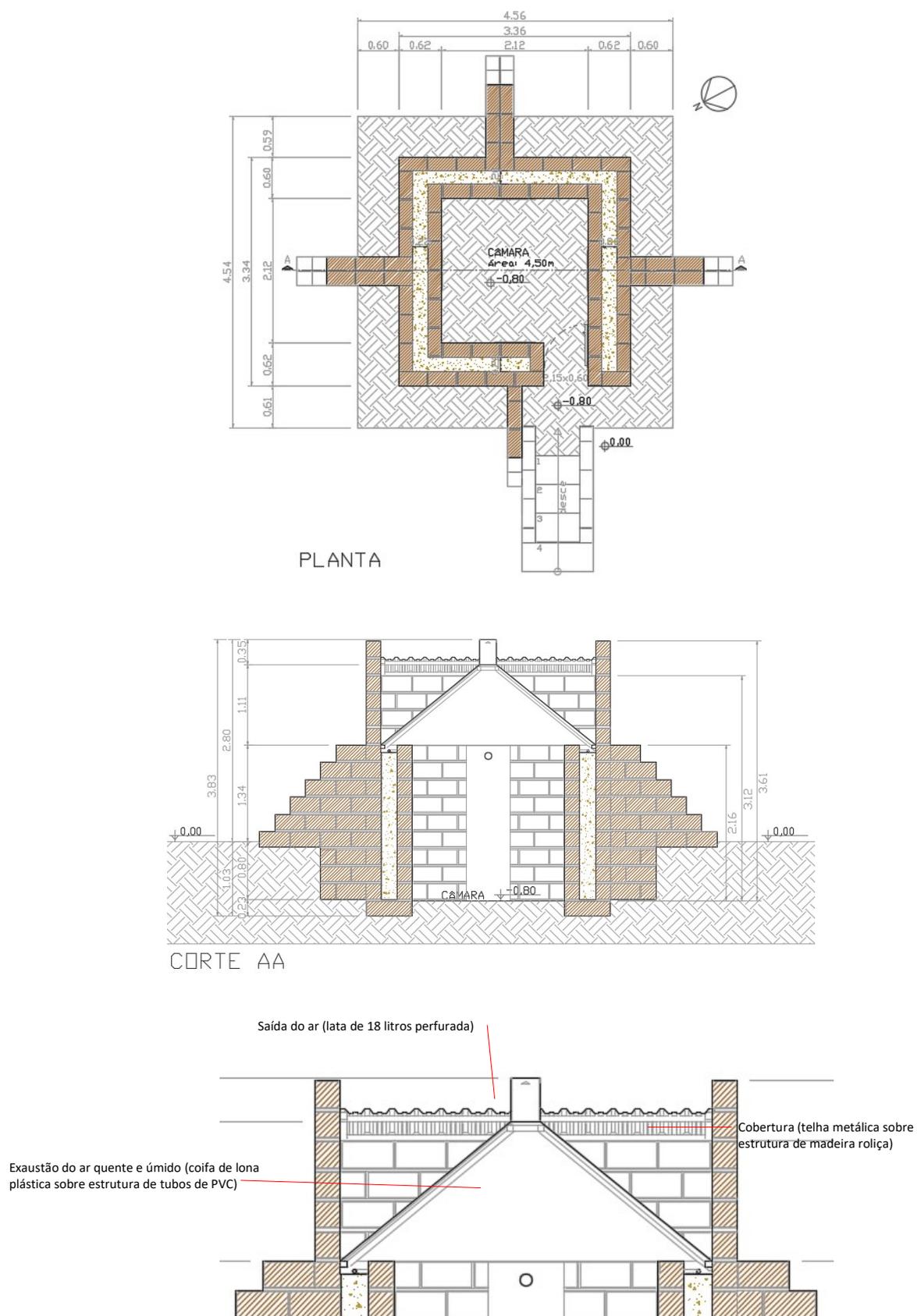


Fonte: Autora (2020).

Os adobes seriam usados até na cobertura, seguindo a proposta de reduzir a diversidade de materiais e favorecendo a exaustão do ar quente.

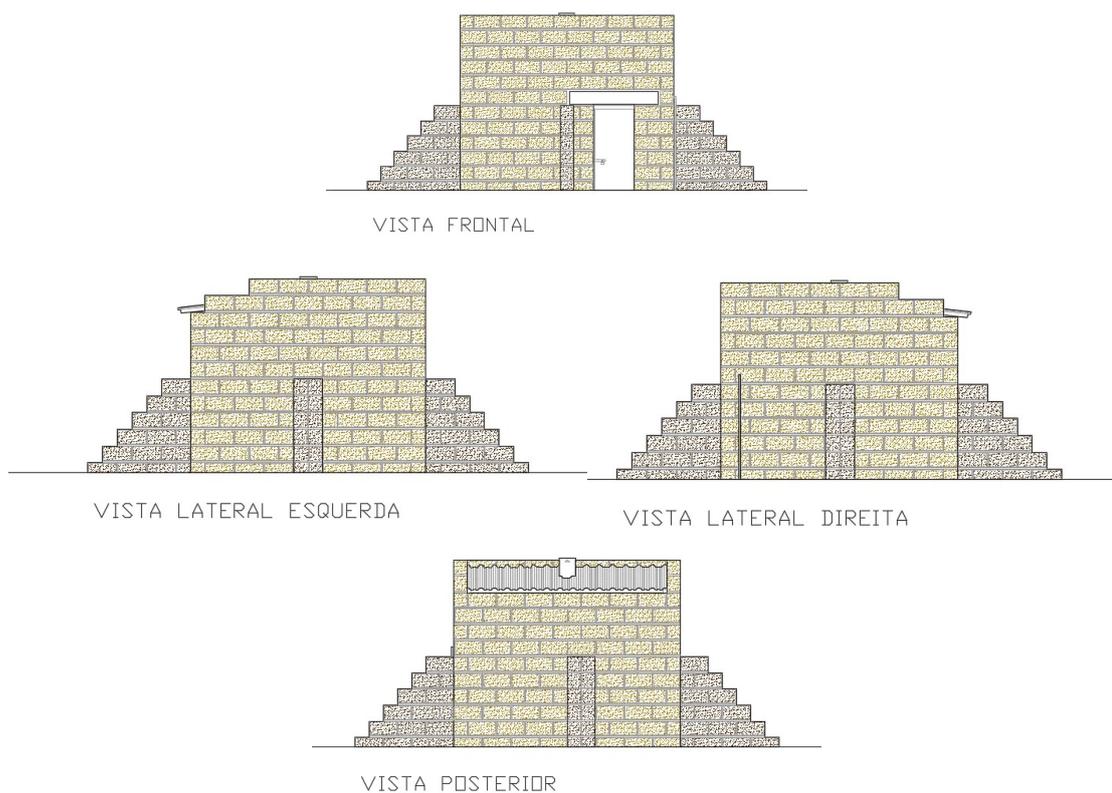
Mas a cobertura com adobes, em formato de falso arco, tornaria a estrutura instável, propensa a colapso por tombamento, até ser completada, demandando escoramento. Dada a dificuldade de execução e o risco de acidentes, os adobes da cobertura foram substituídos por telhas metálicas simples, semelhantes às encontradas no comércio varejista de vários países africanos, e uma coifa de lona plástica com exaustor de lata de 18 litros reaproveitada (Figura 39 e Figura 40).

Figura 39. Versão 4 – quadrada com cobertura metálica e coifa de lona plástica.



Fonte: Autora (2020).

Figura 40. Aspecto geral do resfriador proposto.



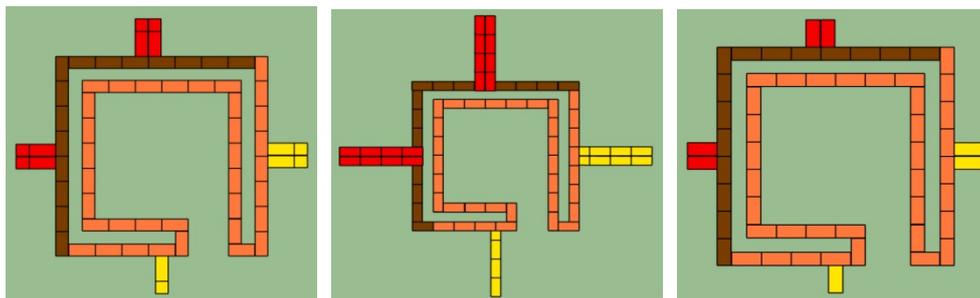
Fonte: Autora (2020).



Fonte: Autora (2020).

Para conter o empuxo provocado pelo preenchimento de areia, 4 contrafortes de adobe foram acrescentados ao projeto, para substituir a necessidade de armadura de aço (Figura 41). Internamente, a contenção é feita com tábuas e toras, para não haver comprometimento do espaço de armazenamento. A fundação é uma camada de adobes, distribuídas sobre solo compactado, formando uma “sapata corrida”.

Figura 41. Versão 4 - composição da 1ª, 4ª e 9ª fiada com contrafortes.



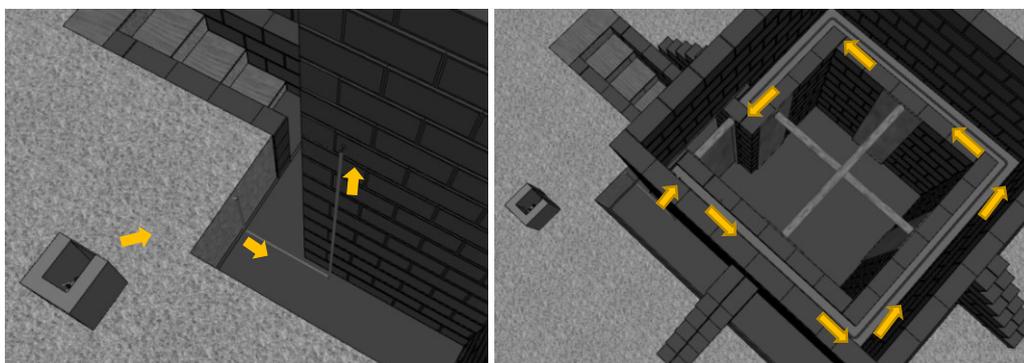
Fonte: Autora (2020).

O projeto resultante, denominado Resfriador Evaporativo do Cerrado, pode ser definido como uma câmara quadrada de medidas internas 2.10 x 2.10m e 2.20m de altura para armazenamento e conservação de 1080 quilos de hortifrúti (correspondente a 54 engradados plásticos). O sistema tem 4 paredes duplas de adobe estabilizado com cimento, preenchidas com areia, totalizando 60cm de espessura.

A partir do umedecimento do colchão, por gotejamento de água sobre a areia (200 litros/dia), o resfriamento ocorre com a evaporação da água, possibilitada pela porosidade das paredes de adobe, que permite o contato do ar com a água. O ar quente gerado pelo armazenamento dos hortifrúti é expelido pela coifa, cujo topo transpassa a cobertura. O ar expelido é substituído por ar externo, que entra no ambiente pela abertura abaixo da porta.

A concepção da instalação hidráulica não incluiu a fonte de abastecimento de água (dado que é muito variável) e limitou-se ao desenho da distribuição interna (Figura 42).

Figura 42. Instalação hidráulica do resfriador (fonte de água genérica).



Fonte: Autora (2020).

O acesso à câmara semienterrada seria dado por degraus escavados ou rampa, para possibilitar a proximidade de um carrinho de mão, por exemplo.

4.2 A construção do protótipo

4.2.1 Produção de adobes (20 dias)

A quantidade de adobes demandada para a obra e avaliação dos adobes em laboratório (APÊNDICE C) era de 706, sendo:

- 653 adobes de 20x20x40cm;
- 53 adobes de 20x20x60cm.

Duas fôrmas de madeira compensada plastificada (espessura 18mm) para 6 adobes cada foram utilizados para produção.

A terra utilizada para os adobes é arenosa, visualmente semelhante à encontrada na produção de adobes de Guiné Bissau. O traço utilizado foi 1:12 (cimento: terra) e água, com adição de 200g de fibra de polipropileno. Desmoldagem, cura e secagem (de 15 à 20 dias) foram feitos no local (Figura 43).

Figura 43. Fabricação e cura dos adobes.



Fonte: Autora (2020).

Foram produzidos, efetivamente, 1065 adobes em 20 dias, sendo:

- 950 adobes de 20x20x40cm (45,5% a mais, com margem para perdas e mudanças de projeto,) e;
- 115 adobes de 20x20x60cm (117% a mais, considerando margem para perdas e mudanças de projeto).

A produção foi realizada por mão de obra de 2 pessoas por dia, em média. A quantidade ideal de pessoas para este trabalho é de 4, sendo 1 para mistura, 1 para amassamento, 1 para transporte e 1 para moldagem. Esses dados foram obtidos a partir do acompanhamento diário da produção dos adobes (APÊNDICE B).

4.2.2 Escavação, nivelamento e compactação de vala (3 dias)

Para semienterrar o resfriador, foi escavada (manualmente e com máquina retroescavadeira) vala de 4.5x4.5m e 80cm de profundidade. O fundo da vala foi nivelado e compactado (Figura 44).

Figura 44. Escavação de vala para fundação.



4.2.3 Execução de fundação (1 dia)

Adobes de 60cm foram utilizados para a fundação do resfriador, a 80cm abaixo do nível do solo (Figura 45).

Figura 45. Execução de fundação.



Fonte: Autora (2020).

4.2.4 Execução de paredes duplas com contrafortes e preenchimento do colchão (18 dias)

As paredes duplas foram planejadas para terem 10 fiadas (Figura 46), mas devido a variação de espessura dos adobes e da argamassa de assentamento, alcançou 2,16m com 9 fiadas. A argamassa de assentamento tem o mesmo traço dos adobes, acrescido de aditivo plastificante.

Figura 46. Execução das paredes duplas.



Fonte: Autora (2020).

Foram utilizados efetivamente 607 adobes menores para a execução das paredes, e 3,94 m³ de areia para o colchão úmido. Verga (tábuas parafusadas) e contenções internas foram colocadas de forma permanente (Figura 47).

Figura 47. Verga e contenções internas.



Fonte: Autora (2020).

4.2.5 Execução de cobertura e coifa (1 dia)

As 3 telhas metálicas trapezoidais (1.05 x 3.40m) foram fixadas sobre estrutura de eucalipto roliço (3 terças de diâmetro 6cm e 4m de comprimento), já pré-cortadas para encaixe da chaminé. A vedação foi executada com silicone (Figura 48).

Figura 48. Instalação de cobertura e chaminé metálicos.



Fonte: Autora (2020).

A coifa foi estruturada em tubos de PVC, formando uma pirâmide de base quadrada. As lonas plásticas foram coladas com adesivo de contato, tanto à estrutura quanto à chaminé (Figura 49).

Figura 49. Execução da coifa.



Fonte: Autora (2020).

4.2.6 Execução de porta, acesso externo e instalação hidráulica (4 dias)

Um batente foi chumbado nos adobes, 20cm acima do nível do piso e instalada uma porta semi-oca de madeira (0.63x2.10m). Os degraus foram escavados (Figura 50).

A água, obtida de reservatório, tem distribuição feita com mangueira flexível e tubos de PVC (1/2") perfurados (28 furos de $\approx 1\text{mm}$ cada), com vazão de 2.5 litros/minuto, medida antes da instalação dentro da câmara de resfriamento (Figura 50).

A Figura 51 apresenta o aspecto geral do protótipo do resfriador concluído.

Figura 50. Porta, escada e tubulação em teste da instalação hidráulica.



Fonte: Autora (2020).

Figura 51. Aspecto externo do protótipo do resfriador concluído.



Fonte: Autora (2020).

O tempo total de construção foi de 27 dias, da escavação até a execução dos acabamentos, com o trabalho realizado por 2 pessoas (pedreiro e servente), em jornadas diárias de 8h. Somado o tempo de produção dos adobes, o resfriador demandou 47 dias de trabalho.

4.2.7 Apropriação de custos

A construção do protótipo do resfriador consumiu materiais e serviços (mão de obra de pedreiro e locação de equipamentos). Mas para o contexto delineado (comunidades remotas), apenas os custos de materiais devem ser considerados, pois entende-se que a mão de obra é contrapartida das comunidades atendidas e que não se utiliza serviço de locação). Gastos com produção de formas também não são considerados na transferência, pois trata-se de ferramenta de trabalho pré-existente nas comunidades.

Essas condições não se deram ao acaso, são aspectos minuciosamente estudados no contexto-referência e nos princípios da tecnologia apropriada. Dentre os materiais, há os de obtenção local (sem custo) e os industrializados (adquiridos em comércio) (Quadro 4).

Quadro 4. Custo de materiais para construção do protótipo.

	qtde	custo unitário	custo parcial
Fundação e paredes			
Terra (m ³)	21	Extraído	
Fibra vegetal (volume variável)	-	Extraído	
Areia (m ³)	4	Extraído	
Tora de madeira (d: 10cm, 2,1m) para escoramento interno (un)	2	Extraído	
Cimento (saco 50kg)	25	19,70	492,50
Cal ou aditivo plastificante para argamassa (900ml)	3	7,71	23,13
Porta completa (batente, folha, trinco, fechadura, dobradiça) (un)	1	300,00	300,00
Pregos 19 x 36 para escoramento interno (kg)	1	11,50	11,50
Barra roscada ¼" 1m (un)	1	3,50	3,50
Porca ¼" (un)	8	0,10	0,80
Arruela ¼" (un)	8	0,10	0,80
Prancha de madeira - verga (5x20cm), 1,5m (ref: cambará) (un)	4	Extraído	
Pranchas de madeira - escoras internas (2,3x30cm), 3m (ref: cedrinho) (un)	4	Extraído	
Custo parcial			832,23
Cobertura			
Tora de madeira- estrutura de telhado (d: 8-10cm), 2.95m (un)	3	Extraído	
Tora de madeira (d: 5-8cm, 2.40m) para coifa (un)	4	Extraído	
Lata 18 litros vazia (reaproveitamento) (un)	1	-	
Telha metálica trapezoidal (1.05 x 3.36m) (un)	3	70,56	211,68
Barra roscada ¼" 1m (un)	4	3,50	14,00
Porca ¼" (un)	8	0,10	0,80
Arruela ¼" (un)	8	0,10	0,80
Parafuso 4.0x30 e bucha 8mm (un)	8	0,20	1,60
Membrana de polietileno (larg: 1.40m) (m)	6	10,66	63,96
Adesivo de contato (lata 730gr)	1	30,90	30,90
Custo Parcial			323,74

continua

continuação

	qtde	custo unitário	custo parcial
Instalação hidráulica			
Tubo PVC ½" (m)	10,5	2,38	25,00
Cotovelo PVC ½" (un)	3	1,00	3,00
Luva soldável ½" (un)	1	2,50	2,50
Conector para luva soldável com encaixe de mangueira (un)	1	2,50	2,50
Mangueira com adaptadores (rolo 10m)	1	22,55	22,55
Parafuso 4,0x30 e bucha 8mm (un)	6	0,20	2,80
Abraçadeira "U" 40mm (un)	3	1,00	3,00
Custo parcial			61,35
Custo Total			1.217,32**

*Esse custo não inclui as prateleiras, nem engradados plásticos.

**Equivalente a US\$ 292, em setembro de 2019

Fonte: Autora (2020).

Tais valores oferecem uma estimativa do custo do resfriador, mas devem ser analisadas as particularidades em cada contexto, como o tipo de solo para adobe, o tipo de solo para fundação, o engajamento da comunidade para a construção, as condições climáticas, entre outras.

Os demais itens usados na execução do protótipo (formas, serviços de terceiros, ferramentas e equipamentos), assim como a duração das atividades, foram coletados visando futura replicação da tecnologia. Os Quadro 5. Custo das formas para produção de adobe. a Quadro 8 apresentam tais dados.

Quadro 5. Custo das formas para produção de adobe.

Materiais	qtde	Custo
Chapa de compensado tipo madeirite plastificado (esp 18mm, 1,1x 2,1m) (un)	2	R\$284,14
Parafusos (un)	72	R\$10,80
Plástico liso para revestimento interno das formas (larg: 1,2m) (m)	5	R\$49,01
Percevejos latonados (Caixa com 100 unidades)	2	R\$9,00
Óleo diesel (litro)	2	R\$15,00
	Custo Total	R\$ 367,95

Fonte: Autora (2020).

Quadro 6. Locação de equipamentos para construção do protótipo do resfriador.

Equipamento	Quantidade (un)	Tempo (mês)	Custo
Andaimes (peças H)	16	1	R\$250,00
Betoneira 400 Litros	1	1	R\$250,00
Custo Total			R\$ 500,00

Fonte: Autora (2020).

Quadro 7. Serviços de terceiros para construção do protótipo do resfriador.

Descrição	Quantidade de trabalhadores	Tempo	Custo
Produção de adobes e construção	1 pedreiro	6 semanas	R\$2.650,00
Preenchimento do colchão de areia e cobertura	2 ajudantes	1 dia	R\$126,00
Produção de adobes	1 ajudante	1 semana	R\$350,00
Instalação de porta e mangueira enterrada com eletroduto	1 pedreiro	2 dias	R\$114,28
Construção de caixa de proteção para torneira	1 pedreiro	1 dia	R\$57,14
Custo Total			R\$ 3.297,42

Fonte: Autora (2020).

Quadro 8. Ferramentas para construção do protótipo do resfriador.

Descrição	qtde (un)	Finalidade
Mangueira	1	Molhar os adobes durante o processo de cura e auxiliar na produção da massa do adobe.
Carrinho de mão	3	Carregar massa de adobe e adobes.
Pá	3	Produzir a massa do adobe.
Enxada	3	Produzir a massa do adobe.
Peneira	1	Retirar pedras da terra utilizada para a produzir adobe.
Extensão elétrica	2	Ligar betoneiras e máquinas de corte.
Baldes (10 à 12l)	8	Medir quantidades de terra, cimento e água e auxiliar no preenchimento dos vãos entre as paredes com areia.
Pá de ponta	1	Abrir vala para construção da câmara de resfriamento.
Chibanca	2	Abrir vala para construção da câmara de resfriamento.
Escova de aço	1	Limpar betoneiras.

continua

continuação

Descrição	qtde (un)	Finalidade
Linha de pedreiro (rolo)	1	Auxiliar com prumo para a construção das paredes.
Soquete de madeira	2	Nivelamento da vala.
Mangueira de nível	1	Nivelamento da vala.
Serrote	1	Cortar madeiras para fixação de lona da chaminé, escoras, estrutura do telhado e tábuas para viga.
Tesoura para corte de chapa metálica	1	Cortar telha metálica e lata.
Martelo	1	Montar escoras, estrutura do telhado e chaminé.
Lixadeira	1	Realizar acabamento nas paredes.
Plaina	1	Nivelar e retirar irregularidades da folha de porta.
Serra Circular	1	Cortar folha de porta e bambu para fixação de mangueira na parede externa.

Fonte: Autora (2020).

Comparado com os modelos da literatura, o resfriador proposto tem volume correspondente a 54 engradados (Tabela 1). Apesar do volume ser significativo e do **custo ser 4 vezes menor do que os similares**, ainda não se pode afirmar que é possível armazenar todo esse montante, pois é preciso analisar a capacidade refrigerativa e também o calor dos hortifrúteis ao serem colocados no resfriador.

Tabela 1. Custos de resfriadores evaporativos.

modelo	Engradado*	capacidade	custo (USD)	custo/kg (USD)*	fonte
ECC 100kg	5	100 kg	100	1	Saran; Roy; Kitinoja (2012)
ECC 200kg	10	200 kg	813	4	Saran; Roy; Kitinoja (2012)
ZECC walk-along	50	1000kg	1.000	1	Saran; Roy; Kitinoja (2012)
ECC 200kg	5	200 kg	200 - 300	1 a 1,5	Ambuko et al. (2017)
Resfriador do cerrado	54	1080 kg	292**	0,27	Autora (2020)

*considerando engradados empilhados, cada um com altura de 25cm

**dólar em 21/09/2019 = 4,16

Fonte: Autora (2020).

Os dados obtidos nesse processo tornam-se pré-requisitos para uma adequada transferência:

- a mão de obra para produção de adobes e para a construção do resfriador deve ser voluntária e, de preferência, numerosa (regime de mutirão) para que a construção do resfriador não compita com os afazeres do dia a dia;
- os materiais de construção não processados e não industrializados (terra, areia, madeira roliça, fibra vegetal) devem ser obtidos no local e sem custo financeiro de extração;
- ferramentas simples devem ser disponíveis na comunidade-alvo, assim como as fôrmas para adobe;
- a água superficial deve estar disponível, em torneiras ou baldes, mas para cálculo de custo, foi considerado que há água disponível em reservatório, com tubulação e torneira, até 10m de distância do resfriador.

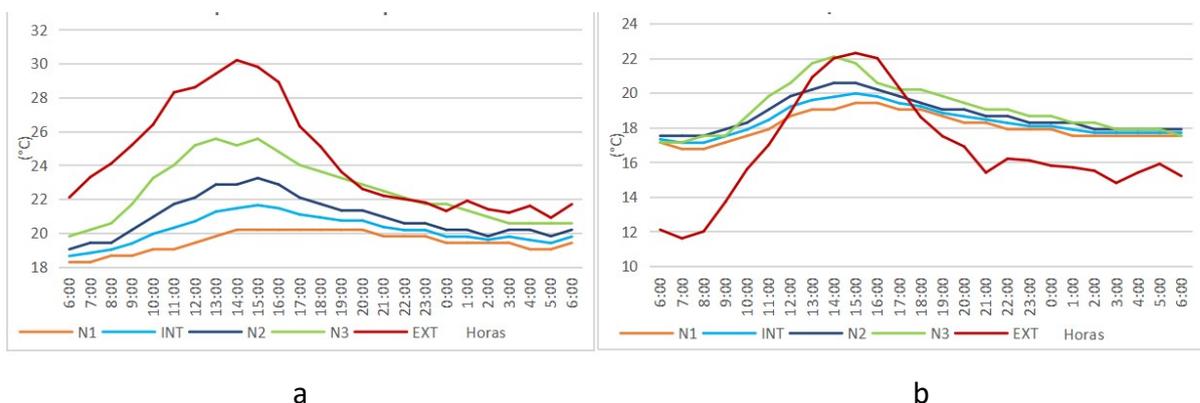
4.3 Desempenho resfriativo

4.3.1 Temperatura:

De acordo com o Figura 52a, em qualquer condição (sem ou com rega) as mais baixas temperaturas ocorrem próximo ao chão. Com maior frequência, a temperatura externa permaneceu mais quente que a interna entre o amanhecer e o anoitecer. Durante as noites, a temperatura externa se aproximou ou se igualou a temperatura interna.

No geral, as curvas de temperatura interna acompanharam a curva da temperatura externa, gerando diferenças de temperatura positiva ($\Delta t+$). Entretanto, em alguns períodos mais frios (menos de 20°C) a temperatura interna, menos variável, não acompanhou a temperatura externa, tornando o interior mais quente do que o exterior, ocorrendo diferença de temperatura negativa ($\Delta t-$) (Figura 52b).

Figura 52. Variação de temperatura em um dia típico quente (a) e frio (b)



a: de 06h00 do dia 05/07 a 06h00 do dia 06/07/2020

b: de 06h00 do dia 09/07 a 06h00 do dia 10/07/2020

(posição dos sensores, de acordo com a Figura 35, INT = 1m)

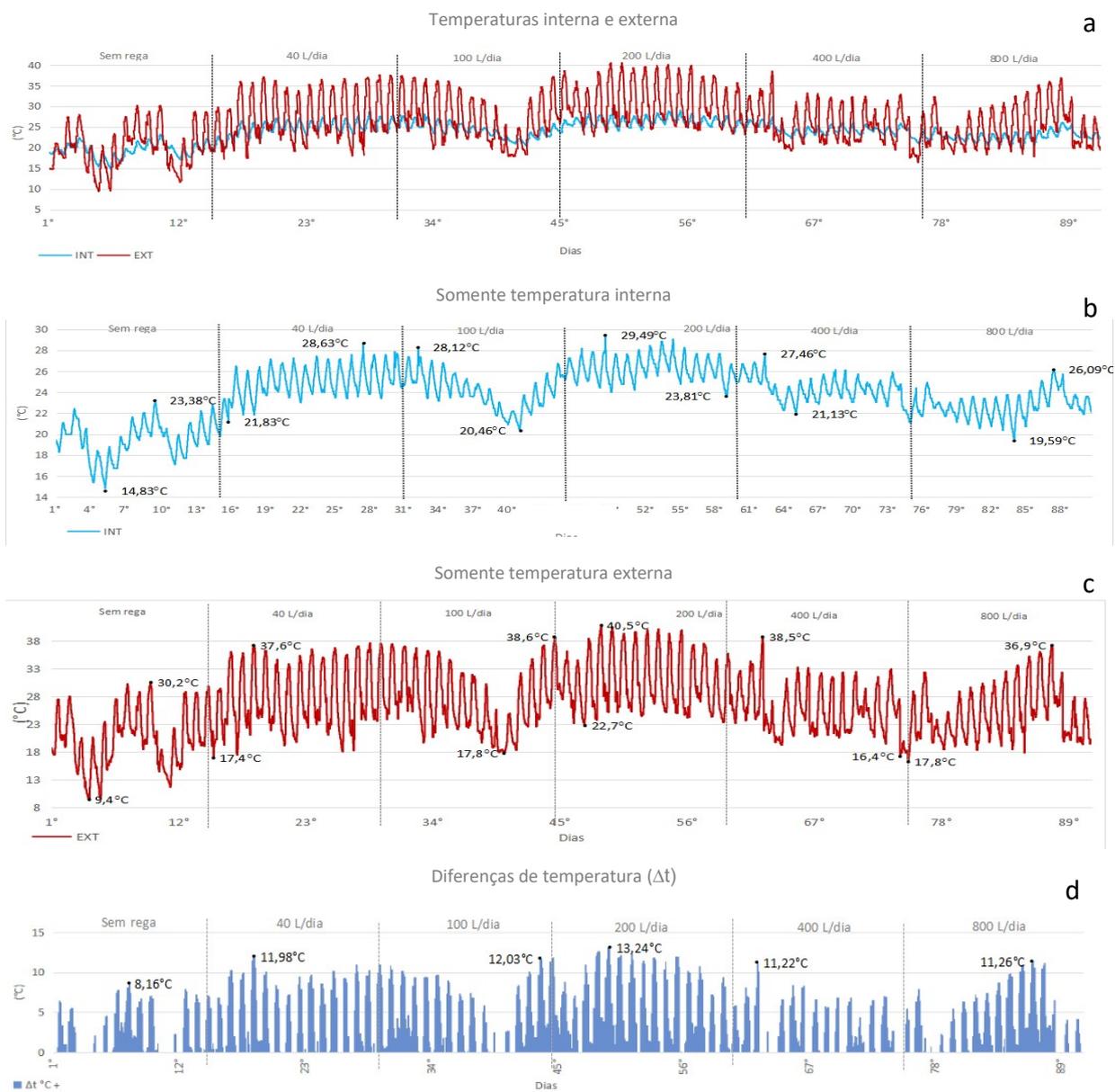
Fonte: Autora (2020).

O sensor mais alto (N3) registrou, como esperado, as temperaturas mais altas entre os 3 níveis de medição, pois sua função é auxiliar, com sua inclinação e abertura superior, no escape de todo ar quente acumulado (Figura 53).

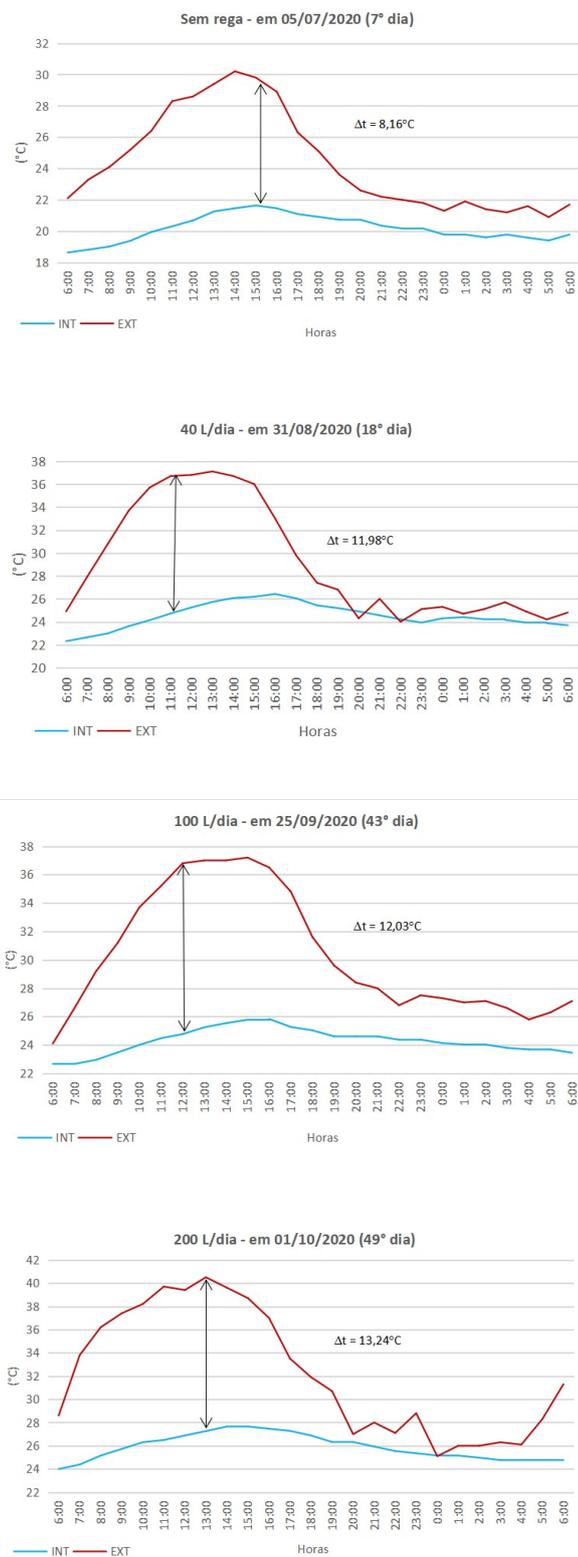
Ao analisar o comportamento das temperaturas ao longo dos 90 dias de medição, pôde-se observar que quedas bruscas de temperatura ocorreram (por ser inverno), resultando em temperatura interna maior do que a externa e não permitiu a evaporação, portanto o fenômeno de resfriamento não ocorreu. Quanto mais quente foi a temperatura externa, maior foi o Δt (Figura 53). Ambos os comportamentos identificados se devem à inércia térmica.

Entre os diferentes períodos de 15 dias, sem rega e com rega, o período com rega de 200 litros/dia obteve as mais altas temperaturas externas e atingiu o mais alto Δt de todo o período de 90 dias = 13,24°C (Figura 54). Pôde-se observar que os maiores Δt s dos dias ocorrem entre 11h00 e 15h00.

Figura 53. Medições de temperatura - 90 dias.



Fonte: Autora (2020).

Figura 54. Maiores Δt s por volume de rega.



Fonte: Autora (2020).

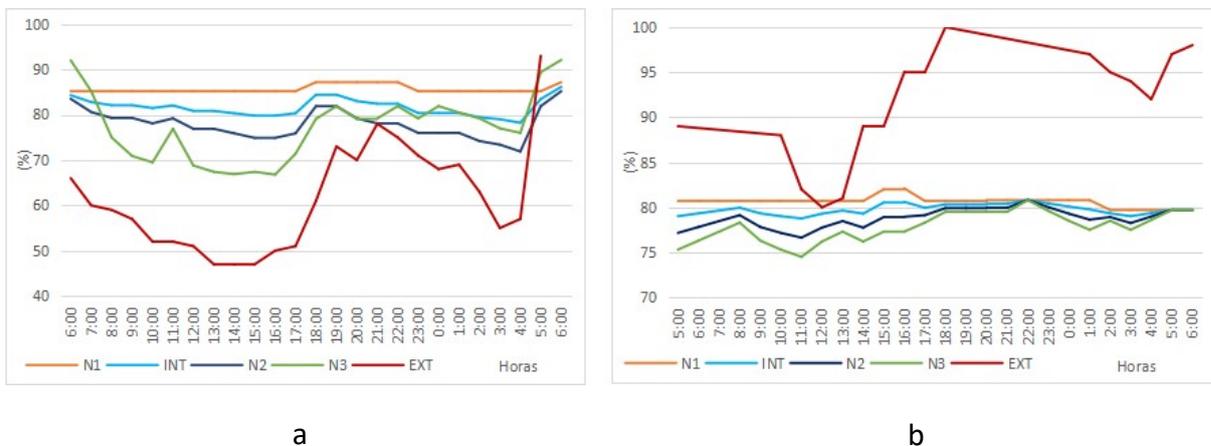
4.3.2 Umidade

Em qualquer condição (sem ou com rega) a taxa de umidade aumenta quanto mais próximo do chão (Figura 55).

Com maior frequência, a umidade externa permaneceu menor que a interna entre o amanhecer e o anoitecer. Durante as noites, a umidade externa se aproximou ou se igualou a umidade interna (Figura 55a).

As exceções de comportamento das curvas de umidade ocorreram em dias e noites chuvosas - ocasiões impróprias para a ocorrência do resfriamento evaporativo. Nestes casos, a maior estabilidade da umidade interna não permitiu que sua curva acompanhasse a curva da umidade externa (Figura 55b).

Figura 55. Aspecto típico das curvas de umidade, em dia seco e chuvoso.



a: de 06h00 do dia 28/10 a 06h00 do dia 29/10/2020

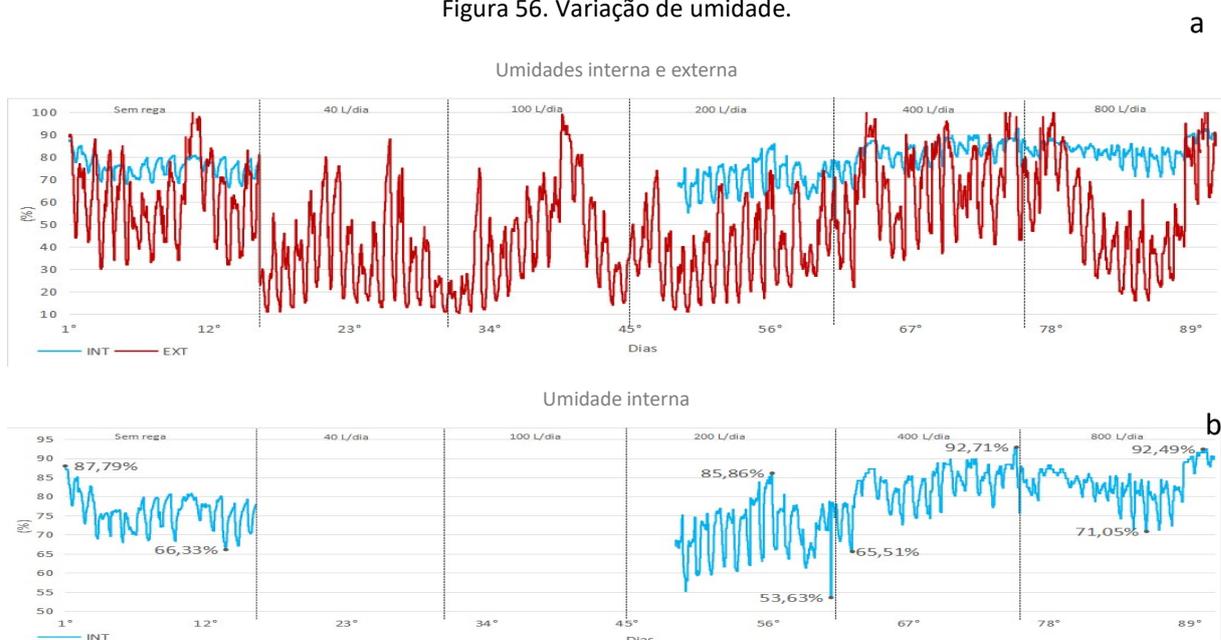
b: de 05h00 do dia 08/07 a 06h00 do dia 09/07/2020

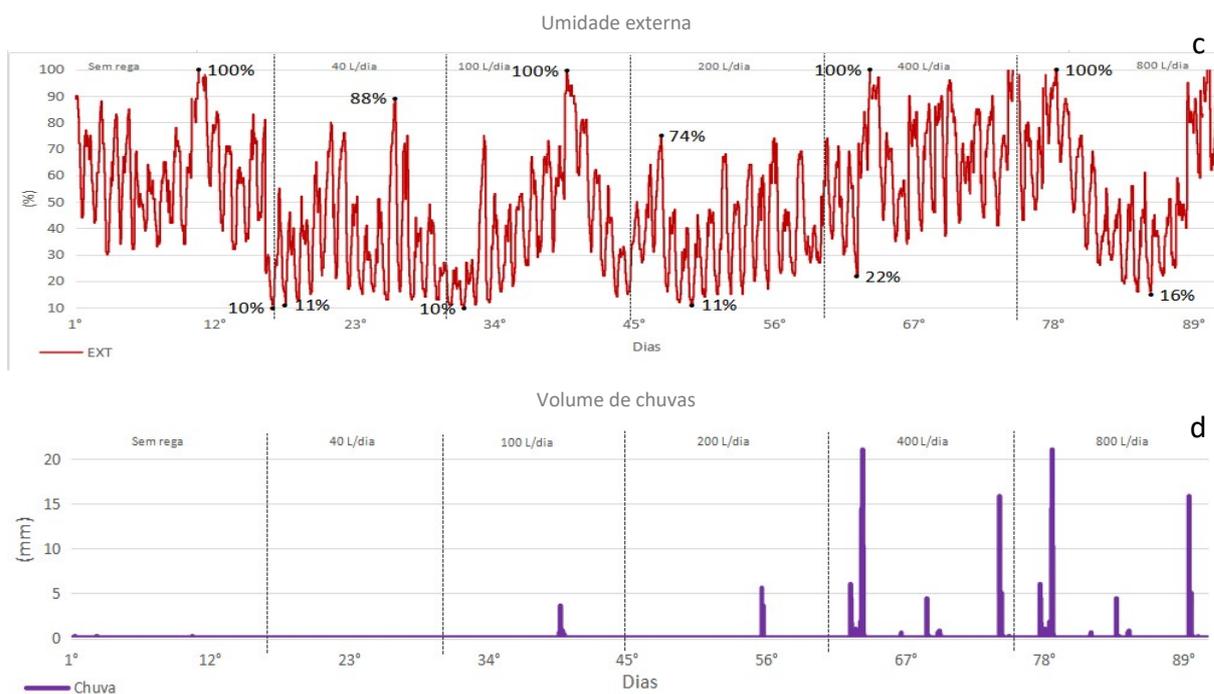
(posição dos sensores, de acordo com a Figura 35, INT = 1m)

Fonte: Autora (2020).

Ao longo dos 90 dias de medições, a umidade interna oscilou menos do que a umidade externa, acompanhando o comportamento da temperatura interna (Figura 56).

Figura 56. Variação de umidade.



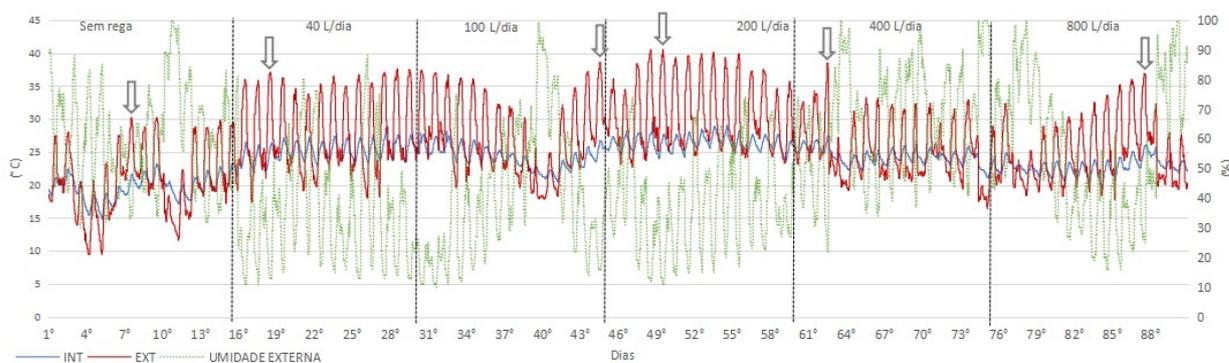


Fonte: Autora (2020).

A rega possibilitou manter e aumentar a umidade interna, mesmo quando a umidade externa diferiu bastante da interna (durante o período com 200 litros por dia e com 800 litros por dia, por exemplo) (Figura 56).

O comportamento higrotérmico do adobe, assim como dados de vento no entorno do protótipo (que não foram coletados) também devem ser incluídos em futuros estudos para melhor compreensão do fenômeno. Limitaram as análises também os dados perdidos em 2 dos 6 períodos de medição. Os maiores $\Delta t(+)$ por período de rega, assim como a umidade externa estão destacados na Figura 57.

Figura 57. As maiores diferenças de temperatura externa-interna, com umidade, por período de rega.



Fonte: Autora (2020).

4.3.3 Eficiência do resfriamento evaporativo

Basenge (2020) apresenta uma tabela de desempenho de um sistema comercial de resfriador evaporativo com colmeias de umidificação e ventilação forçada, contendo diferentes temperaturas de entrada e umidades relativas do ar e suas respectivas temperaturas de saída.

A Tabela 2 é um recorte desses resultados potenciais, para temperatura de entrada a 26°C, combinadas com diferentes taxas de umidade relativa. Esses dados foram usados para comparação com os dados medidos no Resfriador do Cerrado, apesar de terem funcionamento diferentes.

Tabela 2. Redução de temperatura por meio de sistema de resfriamento evaporativo tipo colmeia.

Temperatura externa	UR externa	Temperatura resultante interna	Redução de temperatura
26°C	20%	15,5	10,5
	25%	16	10
	30%	17	9
	35%	18	8
	40%	19	7
	45%	19,5	6,5
	50%	20	6
	55%	21	5
	60%	21,5	4,5
	65%	22	4
	70%	22,5	3,5
	75%	23	3

Fonte: Adaptado de Basenge (2020).⁶

Comparando os dados do Resfriador do Cerrado com os dados de Basenge, nota-se que as temperaturas internas alcançadas estão entre 0,64 e 2,78°C acima do resfriador comercial (Tabela 3). Considerando-se que o Resfriador do Cerrado não utiliza energia elétrica, o desempenho pode ser considerado bom.

⁶ <https://www.basenge.com.br/tabela-reducao-temperatura-sistema-resfriamento-evaporativo>

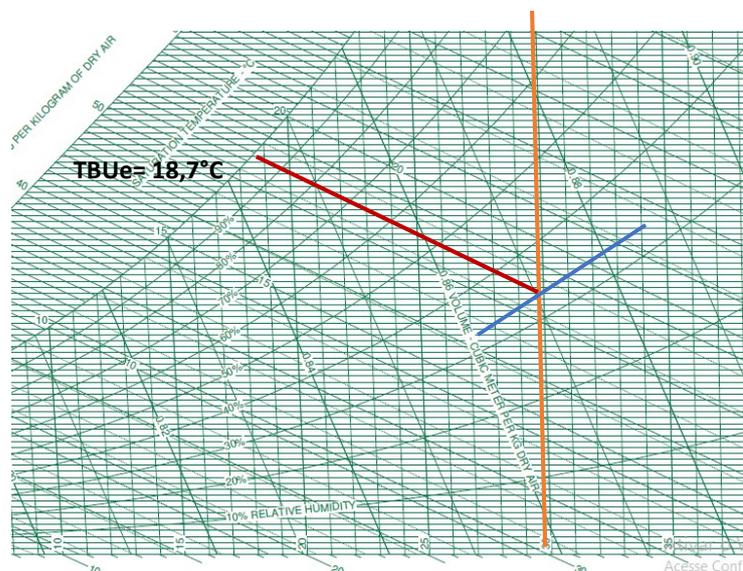
Tabela 3. Maiores Δt_s do resfriador do cerrado comparados com dados do resfriador comercial Basenge.

Rega	Condição de entrada		Temperatura de saída (°C)		Redução de temperatura (°C)		
	Temp. (°C)	UR (%)	Basenge (2020)*	Resfriador do cerrado	Basenge (2020)*	Resfriador do cerrado	diferença
Seco	29,8	34	21	21,64	8,8	8,16	0,64
40 L/dia	36,7	14	23	24,72	13,7	11,98	1,72
100 L/dia	36,8	18	23	24,77	13,8	12,03	1,77
200 L/dia	40,5	11	25	27,26	15,5	13,24	2,26
400 L/dia	38,5	22	24,5	27,28	14	11,22	2,78
800 L/dia	35,6	24	22,5	24,34	13,1	11,26	1,84

* dados aproximados

Fonte: Autora (2020).

Adotando-se temperatura e umidade externas dos maiores Δt_s (Figura 54), obteve-se TBSe e URe. Com TBSe e URe definidos, foi possível realizar a análise da carta psicrométrica e encontrar a TBUE e calcular a eficiência de resfriamento evaporativo (ϵ) para cada período de rega (Figura 58 a 63).

Figura 58. Identificação de TBUE do período sem rega e $\Delta t = 8,16^\circ\text{C}$.

Fonte: Autora (2020).

Se:TBSe = 29,8°C;

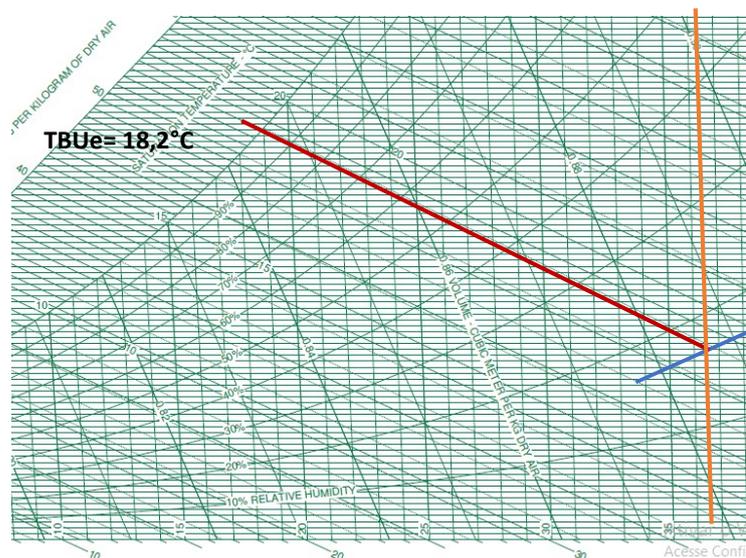
TBSs = 21,64°C;

$$TBUe = 18,7^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Ent\~{a}o: } \varepsilon = [(29,8^{\circ}\text{C} - 21,64^{\circ}\text{C}) / (29,8^{\circ}\text{C} - 18,7^{\circ}\text{C})] * 100$$

$$\varepsilon = 73,51\%$$

Figura 59. Identificação de TBUe do período com rega de 40 L/dia e $\Delta t = 11,98^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Autora (2020).

$$\text{Se: } TBS_e = 36,7^{\circ}\text{C};$$

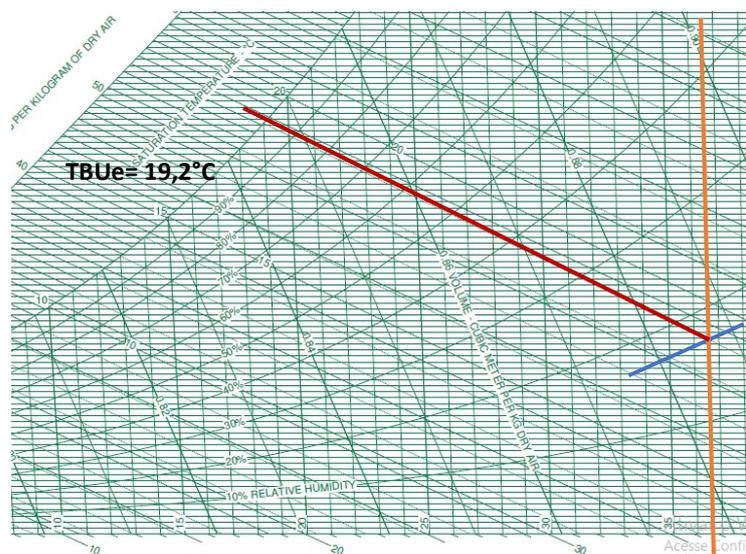
$$TBS_s = 24,72^{\circ}\text{C};$$

$$TBU_e = 18,2^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Ent\~{a}o: } \varepsilon = [(36,7^{\circ}\text{C} - 24,72^{\circ}\text{C}) / (36,7^{\circ}\text{C} - 18,2^{\circ}\text{C})] * 100$$

$$\varepsilon = 64,75\%$$

Figura 60. Identificação de TBUe do período com rega de 100 L/dia e $\Delta t = 12,03^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Autora (2020).

Se:TBS_e = 36,8°C;

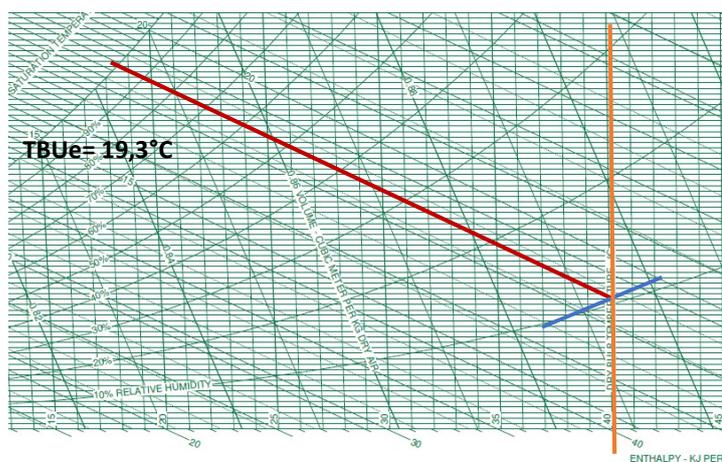
TBS_s = 24,77°C;

TBU_e = 19,2°C

Então: $\varepsilon = [(36,8^\circ\text{C} - 24,77^\circ\text{C}) / (36,8^\circ\text{C} - 19,2^\circ\text{C})] * 100$

$\varepsilon = 68,35\%$

Figura 61. Identificação de TBU_e do período com rega de 200 L/dia e $\Delta t = 13,24^\circ\text{C}$.



Fonte: Autora (2020).

Se:TBS_e = 40,5°C;

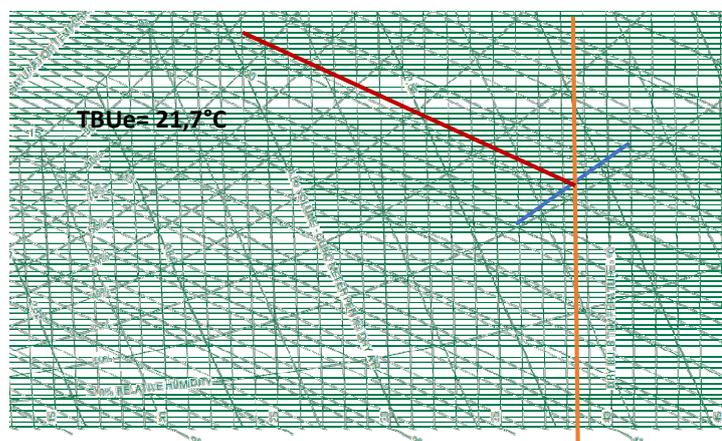
TBS_s = 27,26°C;

TBU_e = 19,3°C

Então: $\varepsilon = [(40,5^\circ\text{C} - 27,26^\circ\text{C}) / (40,5^\circ\text{C} - 19,3^\circ\text{C})] * 100$

$\varepsilon = 62,45\%$

Figura 62. Identificação de TBU_e do período com rega de 400 L/dia e $\Delta t = 11,22^\circ\text{C}$.



Fonte: Autora (2020).

Se:TBSe = 38,5°C;

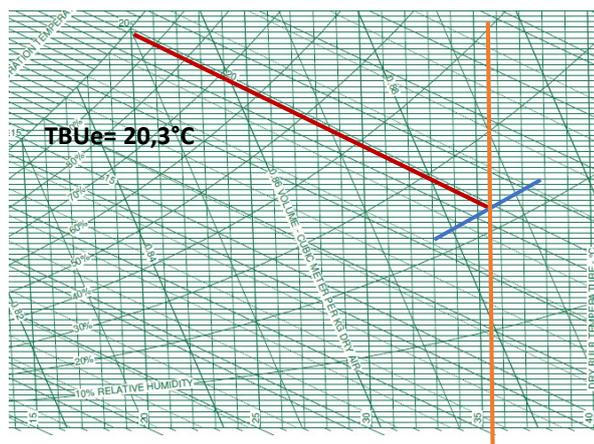
TBSs = 27,28°C;

TBUe = 21,7°C

Então: $\varepsilon = [(38,5^\circ\text{C} - 27,28^\circ\text{C}) / (38,5^\circ\text{C} - 21,7^\circ\text{C})] * 100$

$\varepsilon = 66,78\%$

Figura 63. Identificação de TBUe do período com rega de 800 L/dia e $\Delta t = 11,26^\circ\text{C}$.



Fonte: Autora (2020).

Se:TBSe = 35,6°C;

TBSs = 24,34°C;

TBUe = 20,3°C

Então: $\varepsilon = [(35,6^\circ\text{C} - 24,34^\circ\text{C}) / (35,6^\circ\text{C} - 20,3^\circ\text{C})] * 100$

$\varepsilon = 73,59\%$

Com estes cálculos, foi verificada que a eficiência de resfriamento (ε) do Resfriador do Cerrado varia entre 62,45 e 73,59%. Também foi analisado que nem sempre que ocorrem as maiores diferenças entre as temperaturas externas e internas, o resfriador obtém a melhor eficiência de resfriamento, porque as maiores diferenças de temperatura podem acontecer em dias mais quentes, enquanto a eficiência de resfriamento dependerá da quantidade de rega e da umidade relativa em que são expostos a areia e os adobes.

As regas de 200L e 400L/dia não são eficazes, conforme a Tabela 3, o que se confirma pelos resultados da eficiência de resfriamento.

A eficiência de resfriamento evaporativo encontrada é próxima da eficiência dos resfriadores da literatura (Quadro 9.)

Quadro 9. Eficiência de resfriamento dos modelos da literatura

resfriador	volume (m ³)	eficiência de resfriamento (E)
<i>Clay Evaporative Cooling</i> (Resfriador evaporativo de argila) ¹	0,23	20% - 90%
<i>Evaporative cooler for sweet potatoes storage</i> (Refrigerador evaporativo para armazenamento de batata doce) ²	0,27	87,17%
<i>Evaporative Cooler (EVC)</i> (Resfriador Evaporativo) ³	*	17,3% - 98,8%
<i>Evaporative Cooling Barn</i> (Evaporative Cooling Barn) ⁴	18,81	127%
Resfriador do Cerrado	9,7	62,45% - 73,59%

Fonte: Adaptado de (1) Ndukwu (2011), (2) Seweh et al. (2016), (3) Ndukwu e Manuwa (2015), (4) Abano et al. (2011).

4.4 Observação do desempenho da construção durante as regas

4.4.1 Percepção de cheiro

Durante períodos de chuva, o interior da câmara apresentou cheiro de mofo; em períodos sem chuva e sem rega, apresentou-se inodoro; em períodos sem chuva e com rega, cheiro de terra molhada.

4.4.2 Presença de limo

A formação de limo ocorreu nas faces das paredes externas, próximas ao chão e nas faces das paredes internas.

4.4.3 Formação de eflorescências

Houve formação de manchas brancas em diferentes alturas, resultantes de eflorescência do cimento utilizado para estabilizar os adobes. As manchas brancas começaram a aparecer na primeira semana de rega e ao longo do tempo formaram-se cristais brancos próximos ao ponto de entrada de água (Figura 64).

4.4.4 Manchas de umidade excessiva

Em alguns pontos de rega, a água escorreu por cima das paredes antes que percolasse na areia, o que ocasionou manchas de escorrimento pela face das paredes internas. O ponto de entrada de água no resfriador sofreu muitos vazamentos pelas conexões utilizadas (Figura 64).

Figura 64. Aspecto geral do resfriador do cerrado proposto.



Fonte: Autora (2020).

4.4.5 Presença de trincas

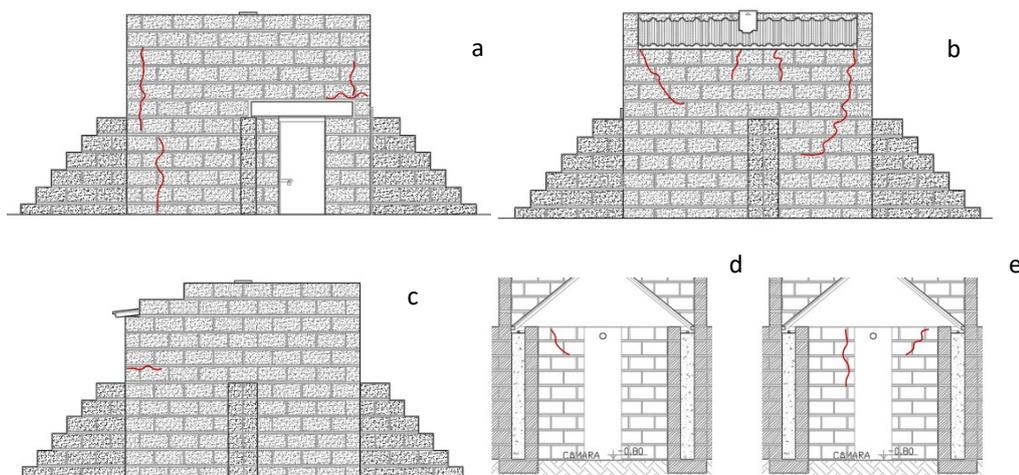
Foram observadas trincas nas paredes internas e externas, menores que a espessura de uma agulha (1,5mm), que surgiram ao longo do tempo, sem comprometimento da integridade dos adobes, diante da umidade a que foram expostas as paredes do resfriador (Figura 66). Trincas fora deste padrão, apenas na parede posterior, no topo da parede. Estas trincas são mais largas (2,0 mm) e se formaram durante a finalização da construção (Figura 65).

Figura 65. Trincas maiores que 2,0 mm.



Fonte: Autora (2020).

Figura 66. Trincas menores que 1,5 mm.



(a) fachada frontal

(b) fachada posterior

(c) fachada lateral direita

(d) parede interna lateral direita

(e) parede interna posterior.

Fonte: Autora (2020).

Apesar do odor de mofo ocasional, não foram observados fungos no interior do resfriador.

Então, para avaliar o desempenho do adobe estabilizado como o principal material e o desempenho da estrutura como um todo, os indicadores propostos são:

- formação de eflorescência (mancha branca);
- surgimento e propagação de fissuras;
- presença de umidade superficial (mancha escura);
- marca de escoamento de água.

Para avaliar o potencial de ameaça de danos à saúde, foram definidos os seguintes indicadores:

- odor de mofo;
- presença de fungos;
- formação de bolhas de condensação de vapor;
- presença de insetos.

4.5 Discussão dos resultados obtidos

Os estudos sobre o comportamento higrotérmico de materiais terrosos, realizados por Rempel e Rempel (2016) foram importantes, pois demonstraram que o resfriamento evaporativo em materiais terrosos ocorre mesmo na ausência de chuva ou irrigação, apenas com umidade relativa do ar sendo adsorvida. Esta constatação, assim como a ocorrência do inchamento da areia com umidades intermediárias (entre o estado seco e encharcado de 800 L/dia) podem explicar as eficiências de resfriamento semelhantes tanto para o período sem rega, quanto no período com a maior rega.

Portanto, o resfriador evaporativo pode ser eficaz em uma ampla gama de climas, incluindo os subtropicais úmidos, desde que o material higroscópico seja uma boa combinação para o clima, assim como é aplicável em regiões com escassez de água, devido a capacidade de resfriamento evaporativo intrínseco.

É possível também desenvolver um resfriador evaporativo que combine elementos mais finos que podem ser dedicados ao resfriamento evaporativo natural de materiais de terra, com elementos mais espessos, também de terra, que forneçam inércia térmica ao resfriador.

No aspecto construtivo, o entendimento do trabalho pela equipe executora foi de fácil assimilação, mas a execução foi difícil diante do volume de trabalho e da quantidade de pessoas disponíveis como mão-de-obra. A dimensão e o peso médio dos adobes limitou o manuseio dos mesmos sem o uso de andaimes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os objetivos desta pesquisa, o Resfriador do Cerrado pode ser considerado concebido e esses resultados apresentados mostram dados promissores de desempenho.

Os passos genericamente delineados pelo DSR representaram com propriedade o processo de desenvolvimento do produto, inclusive nos feedbacks entre os passos. Cada loop ocorrido contribuiu para consolidar o produto proposto e sua viabilidade técnica.

Construtivamente, o adobe estabilizado demonstrou ser uma boa escolha para uso no resfriador, mesmo estando sujeita à umidade. Para aplicação em comunidades remotas e carentes também tem bom potencial, pelo baixo custo, mas principalmente pela baixa dependência de produtos industrializados, principalmente dos de alta tecnologia.

A ampliação do resfriador, um dos objetivos específicos, assim com a forma adotada para o resfriador, com introdução de coifa sob cobertura, demonstrou sua efetividade, pois gerou um artefato de execução comum, com baixa necessidade de uso de equipamentos especializados.

O resfriador evaporativo pode evoluir em futura pesquisa para uma tecnologia social e, posteriormente, para uma tecnologia com adaptações técnicas. Essa evolução inclui questões não trabalhadas neste projeto, como a mão-de-obra (contratada, familiar, mutirão, entre outros), adaptações de dimensões e de materiais.

Cabe realizar uma análise do grau de adequação do adobe sob o seu aspecto construtivo, em diferentes contextos das diversas comunidades passíveis para aplicação.

Quanto à eficiência do resfriamento evaporativo, ainda são necessários mais estudos, apesar dos resultados, de caráter preliminar terem apontado um desempenho equivalente ou muito próximo dos exemplares da literatura em vários momentos ao longo do período de medição. É preciso melhorar a instrumentação para medição das variáveis, com redundâncias nos sensores.

A influência das variáveis ambientais do local onde o protótipo está instalado não foi totalmente compreendida ainda e o fato de estar construído em ambiente aberto demanda mais tempo de monitoramento para determinar o desempenho.

Ainda que insipientes, os dados obtidos mostram que o resfriador, como esperado, tem o seu melhor desempenho nos dias mais quentes e mais secos, reduzindo a temperatura interna (até 13,24°C de diferença) e consegue manter a umidade interna praticamente constante.

Quanto ao consumo de água para a evaporação, não há resultado conclusivo, apesar de indícios de que com água ou no estado seco, o desempenho foi similar. Vale notar que as maiores diferenças de temperatura interna-externa foram obtidas com 200 litros diários (o

consumo de 1,7 pessoas por dia), mas nesse mesmo período também ocorreram os dias mais quentes e mais secos da medição.

Dados mais numerosos também permitirão elaborar novas formas de avaliar com mais acurácia o desempenho e eventualmente, a introdução de modelagem mais fiel.

Uma sugestão para futuros estudos é a realização de análise do ciclo de vida - ACV, do adobe e do resfriador desenvolvido com os refrigeradores convencionais, para explicitar as facetas do seu desempenho ambiental, que não foram exploradas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABANO, E.E.; TEYE, E.; AMOAH, R.S.; TETTEH, J.P. Design, Construction and Testing of an Evaporative cooling barn for Storing Sweet Potatoes in the Tropics. **Asian Journal of Agricultural Research**. v. 5, n. 2, p. 115-126, 2011.
- 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**. p. 1-7, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, p. 2-14, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467: Agregados - Determinação do inchamento do agregado miúdo - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, p. 1-5, 2006.
- BABAMERU, K. O.; OMODORA, M. A.; FAYOMI, O. S. I.; OKOKPUJIE. I. P.; OLUWAFENI, J. O. Design and optimization of an active evaporative cooling system. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**. v. 9, n. 10, p. 1051-1061, 2018.
- BOTEGGA, Lluçs Decarli e DE SOUZA, Samuel Nelson Melegari. Análise da Eficiência de Um Sistema de Resfriamento Evaporativo para a Cidade de Cascavel-Pr. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**. v.4, n. 3, p. 131- 143, 2015.
- CAMARGO, J. R. Resfriamento Evaporativo: Poupança de Energia e o Meio Ambiente. **Revista Ciências Exatas, Taubaté**. v. 9/10, n. 1-2, p. 69-75, 2004.
- DA ROSA, Claudio Porto. Tecnologia Adequada: Um Conjunto Homogêneo? **Revista de Administração de Empresas**. v. 29, n. 1, p. 47-51, 1989.
- CUI, Xin; YANG, Xiaohu; SUN, Yanjun; MENG, Xiangzhao; JIN, Liwen. Energy Efficient Indirect Evaporative Air Cooling Data: 05/11/2018. In: MURSHED, SM Sohel. **Advanced Cooling Technologies and Applications**. IntechOpen, 2019. p 9 - 25. Disponível em: < <https://www.intechopen.com/chapters/62339> > Acesso em: 28/12/2020.
- DA SILVA, Antonio César Silveira Baptista. **Simulação de Resfriamento Evaporativo por Microaspersão D'Água**. 2004. 15 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- DUQUE, Thaís Oliveira e VALADÃO, José de Arimatéia Dias. Abordagens teóricas de tecnologia social no Brasil. **Pensamento Contemporâneo em Administração**. v. 11, n. 5, p. 1-19, 2017.
- EMBRAPA Cerrados, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **O Cerrado**. Brasília, 2012. Disponível em: < <https://www.cpac.embrapa.br/unidade/ocerrado/> > Acesso em: 25/02/2022.

GARCIA, Ramon Moreira. Tecnologia Apropriada: Amiga ou Inimiga Oculta? **Revista de Administração de Empresas**. v. 27, n. 3, p. 26-38, 1987.

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

Gomes, Maria Salete de Oliveira. **Conservação Pós-Colheita: Frutas e Hortaliças - Coleção SABER 2**. EMBRAPA-SPI, 1996.

HU, Huafen; KRIESKE, Mathew; DJUNAEDY, Ery; VAN DEN WYMELENBERG, Kevin; ACKER, Brad, P.E. Performance Evaluation of Multi-Stage Evaporative Cooling for Classrooms in a Hot and Dry Climate. **ASHRAE Papers CD**, p. 1-8, 2013.

IIF-IIR - Institute International Du Froid - International Institute of Refrigeration; LAZZARIN, R. **27ª Nota Informativa, p. 5. 2015.** Disponível em: < file:///C:/Users/Karine/Downloads/IFD_FICJOINT_0015060.pdf > Acesso em: 17/09/2018.

INSTRUCTABLES OUTSIDE; BERKANA. **A Practical Zeer Pot (Evaporative Cooler / Non-electrical Refrigerator), 2014.** Disponível em: < <https://www.instructables.com/A-Practical-Zeer-Pot-evaporative-cooler-non-electr/> > Acesso em: 25/07/2021.

ISLAM, M.P. e MORIMOTO, T. Evaluation of a new heat transfer and evaporative design for a zero energy storage structure. **Solar Energy**. v. 118, p. 469-484, 2015 a.

ISLAM, Md. Parvez e MORIMOTO, Tetsuo. A new zero energy cool chamber with a solar-driven adsorption refrigerator. **Renewable Energy**. v. 72, p. 367-376, 2014.

ISLAM, Md. Parvez e MORIMOTO, Tetsuo. Progress and development in brick wall cooler storage system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 50, p. 277-303, 2015 b.

ISLAM, Md Parvez e MORIMOTO, Tetsuo. 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.

ISLAM, M. P.; MORIMOTO, T.; HATOU, K. Dynamic optimization of inside temperature of Zero Energy Cool Chamber for storing fruits and vegetables using neural networks and genetic algorithms. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 95, p. 98-107, 2013.

ISLAM, M. P.; MORIMOTO, T.; HATOU, K. Storage behavior of tomato inside a zero energy cool chamber. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**. v. 14, n. 4, p. 209-217, 2012.

ISLAM, M. P.; MORIMOTO, T.; HATOU, K.; HASSAN, L.; AWAL, M. A.; HOSSAIN, S. T. Case study about field trial responses of the zero energy storage system. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**. v. 15, n. 4, p. 113-118, 2013.

KIM, Nae-Hyun. Heat and moisture transfer in a counter flow regenerative evaporative cooler made of plastic film/paper composite. **Journal of Mechanical Science and Technology**. v. 30, n. 3, p. 1449-1457, 2016.

KIM, W.; DONG, H.W.; PARK, J.; SUNG, M.; JEONG, J.W. Impact of an ultraviolet reactor on the improvement of air quality leaving a direct evaporative cooler. **Sustainability (Switzerland)**. v. 10, n. 4, p. 1-16, 2018.

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.

KITINOJA, L.; ALHASSAN, H. Y. Identification of Appropriate Postharvest Technologies for Small Scale Horticultural Farmers and Marketers in Sub-Saharan Africa and South Asia – Part 1. Postharvest Losses and Quality Assessments. **Acta Horticulturae, International Society for Horticultural Science**. n. 934, p. 31-40, 2012.

KITINOJA, L.; SARAN, S.; ROY, S.K. Appropriate Postharvest Technologies for Small Scale Horticultural Farmers and Marketers in Sub-Saharan Africa and South Asia – Part 2. Field Trial Results and Identification of Research Needs for Selected Crops. **Acta Horticulturae, International Society for Horticultural Science**. n. 934, p. 41-52, 2012.

KITINOJA, L. e THOMPSON, James F. Pre cooling systems for small-scale producers. **Stewart Postharvest Review**. v. 6, n. 2, p. 1-14, 2010.

LACERDA, Daniel Pacheco; DRESCH, Aline; PROENÇA, Adriano; JÚNIOR, José Antonio Valle Antunes. **Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção**. Gest. Prod., São Carlos, v. 20, n. 4, p. 741-761. 2013.

LAL BASEDIYA, A.; SAMUEL, D. V.; BEERA, V. Evaporative cooling system for storage of fruits and vegetables - a review. **Journal of food science and technology**. v. 50, n. 3, p. 429–442., 2011. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0311-6>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. PROJETEE, Projetando Edificações Energeticamente Eficientes. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/projeteee/estrategia/resfriamento-evaporativo-inercia-termica-para-resfriamento/> > Acesso em: 25/02/2022.

NDUKWU, M. C. e MANUWA, S. I. Review of research and application of evaporative cooling in preservation of fresh agricultural produce. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**. v. 7, n. 5, p. 85-102, 2014.

NDUKWU, Macmanus Chinenye. Development of clay evaporative cooler for fruits and vegetables preservation. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**. v. 13, n. 1, p. 1-6, 2011.

NDUKWU, Macmanus C. e MANUWA, Seth I. A techno-economic assessment for viability of some waste as cooling pads in evaporative cooling system. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**. v. 8, n. 2, p. 151-158, 2015.

ONU, Organização das Nações Unidas. **Agenda 2030, de 2015, que dispõe sobre os objetivos de desenvolvimento sustentável**. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/> > Acesso em: 20/11/2018.

ONU, Organização das Nações Unidas. **Perspectivas Mundiais de População 2019: Destaques**. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org/populacao-mundial-deve-chegar-a-97-bilhoes-de-pessoas-em-2050-diz-relatorio-da-onu/> > Acesso em: 07/12/2019.

ORR, Ryan; KLESNER, Keith. **Ignore Data Center Water Consumption at Your Own Peril**. Data: 17/06/2016. Disponível em: < <https://journal.uptimeinstitute.com/dont-ignore-water-consumption/> > Acesso em: 28/12/2020.

REMPEL, A.R. e REMPEL, A.W. Intrinsic evaporative cooling by hygroscopic earth materials. **Geosciences (Switzerland)**. v. 6, n. 3, p. 1-38, 2016.

RORIZ, Maurício e RORIZ, Victor Figueiredo. **Estudo: Níveis de Desempenho Térmico de Edificações Habitacionais com Paredes em Concreto**. Data: 03/2010. Disponível em: < http://abesc.org.br/wp-content/uploads/2015/12/Conforto-ABCP-18mar2010_PDF.pdf > Acesso em: 23/07/2021.

SCI, Solar Cookers International. **Pot-in-Pot Cooler**. Data: 23/02/2018. Disponível em: < https://solarcooking.fandom.com/wiki/Pot-in-pot_cooler > Acesso em: 25/07/2021.

SEWEH, Emmanuel Amomba; DARKO, Joseph Ofei Darko; ADDO, Ahmad; ASAGADUNGA, Paul Akidiwe; ACHIBASE, Sebastian. Design, construction and evaluation of an evaporative cooler for sweet potatoes storage. **Asian Journal of Agricultural Research**. v. 5, n. 2, p. 115-126, 2016.

SINGH, Sanjay; SINGH, A. K.; JOSHI, H K.; LATA, K.; BAGLE, B. G.; MORE, T. A. Effect of zero energy cool chamber and post-harvest treatments on shelf-life of fruits under semi-arid environment of Western India. Part 1. Ber fruits. **Journal of Food Science and Technology**. v. 47, n. 4, p. 446-449, 2010 a.

SINGH, Sanjay; SINGH, A. K.; JOSHI, H. K.; BAGLE, B. G.; MORE, T. A. Effect of zero energy cool chamber and post-harvest treatments on shelf-life of fruits under semi-arid environment of Western India. Part2. Indian gooseberry fruits. **Journal of Food Science and Technology**. v. 47, n. 4, p. 450-453. 2010 b.

SNA, Sociedade Nacional de Agricultura. **Resfriamento na conservação das frutas e hortaliças**. Data: 16/01/2014. Disponível em: < <https://www.sna.agr.br/resfriamento-na-conservacao-das-frutas-e-hortalicas/> > Acesso em: 12/07/2021.

SOPONPONGPIPAT, N. e 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.

SULLIVAN, Karl. **Whats evaporative cooling?** Data: 02/01/2018. Disponível em: < <https://www.cosaf.co.uk/blog/what-is-evaporative-cooling> > Acesso em: 28/12/2020.

TINÔCO, Ilda de F. F.; FIGUEIREDO, José L. A.; SANTOS, Rodrigo C.; PAULO, Marcos O. de; VIGODERIS, Ricardo B.; PUGLIESI, Nelson L. Avaliação de materiais alternativos utilizados na

confeção de placas porosas para sistemas de resfriamento adiabático evaporativo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - AGRIAMBI**. v. 6, n. 1, p. 147-150. 2002.

VERPLOEGEN, Eric; RINKER, Peter; OGNAKOSSAN, Kukom Edoh. **Evaporative Cooling Best Practices: Producing and Using Evaporative Cooling Chambers and Clay Pot Coolers**. Data: 01/06/2018. Disponível em: < <http://d-lab.mit.edu/resources/publications/evaporative-cooling-best-practices-guide> > Acesso em: 28/12/2020.

YANHUA, Liu; ENLI, Lyu; RAHMAN, Muhammad M.; YU, Wang; JIAMING, Guo; JIE, Zhang. Numerical simulation of temperature and relative humidity in zero energy cool chamber. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**. v. 10, n. 3, p. 185-193. 2017.

YUBA, A. N.; ALVES, G. M.; PINTO, J. O. P.; TRUJILLO, J. C.; LATOSINSKI, K. T. Seeding picoscale solutions for social macro goals: complex thinking in projects for vulnerable communities. In: BRAGANÇA, L.; ALVAREZ, C. E.; CABEZA, L. F. (org.). **Sustainable Urban Development: topics, trends and solutions**. IOP, 2021. p. 7-1 - 7-21.

YUE, Xiao-Guang e ASHRAF, Muhammad. The study on the integration of green architecture and appropriate technology. **Engineering Heritage Journal**. v. 2, p. 01-03. 2018.

APÊNDICE A: CÁLCULO DA QUANTIDADE DE TERRA, CIMENTO E CAL PARA PRODUÇÃO DOS ADOBES E ARGAMASSA

TERRA PARA ADOBES (TRAÇO 1:12)		
Volume (1 adobe 0,4 X 0,2 X 0,2)	0,016	m ³
Volume de terra (1 adobe)	0,015	m ³
Volume de terra por compactação (1 adobe)	0,012	m ³
Volume total de terra (1 adobe)	0,027	m ³
Volume de terra (648 adobes para o resfriador)	17,496	m ³
Volume (1 adobe 0,6 X 0,2 X 0,2)	0,024	m ³
Volume de terra (1 adobe)	0,022	m ³
Volume de terra por compactação (1 adobe)	0,018	m ³
Volume total de terra (1 adobe)	0,040	m ³
Volume de terra (48 adobes para o resfriador)	1,92	m ³
TERRA PARA ARGAMASSA (TRAÇO 1:1:12)		
Volume (1 adobe + junta vertical 2cm + junta horizontal 2cm)	0,018	m ³
Volume da argamassa (junta vertical + junta horizontal)	0,002480	m ³
Volume de terra para argamassa (1 adobe)	0,00212571	m ³
Volume de terra para argamassa (648 adobes para o resfriador)	1,38	m ³
Volume (1 adobe + junta vertical 2cm + junta horizontal 2cm)	0,027	m ³
Volume da argamassa (junta vertical + junta horizontal)	0,003280	m ³
Volume de terra para argamassa (1 adobe)	0,002811	m ³
Volume de terra para argamassa (48 adobes para resfriador)	0,13	m ³
TOTAL DE TERRA (ADOBES + ARGAMASSA)	20,926	m³

CIMENTO PARA ADOBES (TRAÇO 1:12)		
Volume de cimento (1 adobe 0,4X0,2X0,2)	0,001	m ³
Volume de cimento (648 adobes)	0,648	m ³
Peso do cimento (648 adobes)	907,2	kg
Sacos de cimento (648 adobes)	18,144	sc (50kg)
Volume de cimento (1 adobe 0,6 X 0,2 X 0,2)	0,002	m ³
Volume de cimento (48 adobes)	0,096	m ³
Peso do cimento (48 adobes)	134,4	kg
Sacos de cimento (48 adobes)	2,688	sc (50kg)
CIMENTO PARA ARGAMASSA (TRAÇO 1:1:12)		
Volume de cimento para argamassa (1 adobe 0,4 X 0,2 X 0,2)	0,0001771	m ³
Volume de cimento para argamassa (648 adobes)	0,115	m ³
Peso do cimento para argamassa (648 adobes)	160,66	kg
Sacos de cimento para argamassa (648 adobes)	3,213	sc (50kg)
Volume de cimento para argamassa (1 adobe 0,6 X 0,2 X 0,2)	0,0002008	m ³
Volume de cimento para argamassa (48 adobes)	0,0096	m ³
Peso do cimento para argamassa (48 adobes)	13,49	kg

Sacos de cimento para argamassa (48 adobes)	0,269	sc (50kg)
TOTAL DE CIMENTO (ADOBES + ARGAMASSA)	24,314	sc (50kg)

CAL HIDRATADA PARA ARGAMASSA (TRAÇO 1:1:12)		
Volume de cal para argamassa (1 adobe)	0,0001771	m ³
Volume de cal para argamassa (648 adobes)	0,111	m ³
Peso do cal hidratada para argamassa (648 adobes)	188,48	kg
Volume de cal para argamassa (1 adobe)	0,0002343	m ³
Volume de cal para argamassa (48 adobes)	0,011	m ³
Peso do cal hidratada para argamassa (48 adobes)	19,11	kg
Sacos de cal hidratada para argamassa (648 adobes + 48 adobes)	10,379	sc (20kg)

APÊNDICE B: ACOMPANHAMENTO DIÁRIO DA PRODUÇÃO DE ADOBES

	data	mão de obra	ferramentas utilizadas	produção (un)	eventualidades
1	08/08/2019 9 quinta	1 pessoa amassando com o pé e moldando + 1 pessoa misturando com a enxada	Enxada. Mistura no chão.	3	Não utilizado fibra. Produção feita no fim da tarde.
2	14/08/2019 9 quarta	1 Pedreiro fazendo a mistura seca na betoneira e misturando água no chão com enxada + 1 pessoa amassando com o pé (ambos moldaram)	Betoneira de 145 litros com massa depositada no chão.	4	Produção apenas no período matutino. Adobes sem fibra.
3	15/08/2019 9 quinta	1 pedreiro fazendo a mistura na betoneira + 2 pessoas amassando e moldando	Betoneira de 145 litros com massa depositada no chão.	24	Utilização de fibra e mistura molhada feita na betoneira.
4	16/08/2019 9 sexta	1 pedreiro + 1 ajudante	Betoneira de 145 litros com massa depositada no chão.	34	Conserto de forma de 0,60m (1 divisória abriu)
5	17/08/2019 9 sábado	1 pedreiro fazendo a mistura na betoneira + 2 pessoas transportando a massa + 2 pessoas moldando + 2 pessoas amassando com o pé + 1 pessoa misturando com a enxada.	Betoneira de 145 litros com massa depositada no chão.	74	Mutirão com 3 frentes de trabalho (1 - produção na betoneira, amassando com o pé e misturando com enxada; 2 - transporte de massa e auxílio na primeira e terceira frente de trabalho; 3 - moldagem.)
6	19/08/2019 9 segunda	Pedreiro + 1 pessoa moldando	Betoneira de 145 litros com massa depositada no chão.	36	Mistura molhada na betoneira.
7	20/08/2019 9 terça	Pedreiro + ajudante	Betoneira de 145 litros com massa depositada em carrinho de mão.	66	Finalizou a produção de adobes de 0,60m (115 adobes de 0,60cm e 126 adobes de 0,40m).
8	21/08/2019 9 quarta	Pedreiro + ajudante	Betoneira de 145 litros com massa depositada em carrinho de mão.	75	Chegou no fim da tarde a betoneira alugada de 400 litros.
9	22/08/2019 9 quinta	Pedreiro + ajudante	Betoneira de 400 litros + massa depositada em carrinho de mão.	72	*
10	23/08/2019 9 sexta	Pedreiro + ajudante	Betoneira de 400 litros + massa depositada em carrinho de mão.	48	*
11	24/08/2019 9 sábado	Pedreiro + ajudante	Betoneira de 400 litros + massa depositada em	90	Sem Fibra (acabou).

			carrinho de mão.		
12	25/08/2019 domingo	Pedreiro	Betoneira de 400 litros + massa depositada em carrinho de mão.	*	Desmonte da estrutura de bambu.
13	26/08/2019 segunda	Pedreiro + ajudante	Betoneira de 400 litros + massa depositada em carrinho de mão.	71	Sem fibra (acabou).
14	27/08/2019 terça	Pedreiro + ajudante	Betoneira de 400 litros + massa depositada em carrinho de mão.	79	Com fibra.
15	28/08/2019 quarta	Pedreiro	Betoneira de 400 litros + massa depositada em carrinho de mão.	60	*
16	29/08/2019 quinta	Pedreiro	Betoneira de 400 litros + massa depositada em carrinho de mão. / Chibanca + Pá	29	Acabou a terra. Início da escavação. Escorpiões nos adobes.
17	30/08/2019 sexta	Pedreiro	Betoneira de 400 litros + massa depositada em carrinho de mão.	67	12 m3 de terra chegaram pela manhã + 2 ajudantes da UFMS.
18	31/08/2019 sábado	Pedreiro + 1 pessoa moldando	Betoneira de 400 litros + massa depositada em carrinho de mão.	93	Adobes grudando nas formas: Terra argilosa
19	02/09/2019 segunda	Pedreiro + 2 ajudantes período matutino	Betoneira de 400 litros + massa depositada em carrinho de mão.	56	Utilização de 2 litros de óleo diesel nas formas como desmoldante.
20	03/09/2019 terça	Pedreiro + 2 ajudantes período matutino	Betoneira de 400 litros + massa depositada em carrinho de mão. / Chibanca + Pá	84	Utilização de óleo de cozinha nas formas como desmoldante. De manhã adobes, a tarde escavação.

APÊNDICE C: ENSAIOS DOS ADOBES EM LABORATÓRIO

Os adobes foram testados para analisar a sua resistência à compressão, com amostras de adobes de 60cm e 40cm (Tabela C - 1).

Tabela C - 1. Resultados dos testes dos adobes

dimensão (cm)	peso (kg)	compressão (t)	tração (kN)*
60(C) x 20(L) x 20(A)	45,98	5,61	0.13
	48,08	8,87	4.84
	45,32	6,49	9.06
40(C) x 20(L) x 20(A)	26,82	6,29	**
	28,20	1,90	**
	29,74	4,57	**

*com carga de 13,33 kg/segundo e força de 0,13 kN/segundo.

**não foi realizado devido a dimensão do adobe.

Fonte: Autora (2020).

Figura C - 1. Teste de compressão.



Fonte: Autora (2020).

O teste de compressão apresentou resultados variados, mas demonstrou a capacidade de os adobes suportarem a carga das fiadas acima. Considerando que cada adobe de 40 cm suportaria em média 4.253 kg e que cada adobe pesa 28,25 kg, o peso acima de um único adobe da primeira fiada seria de 226 kg (8 fiadas do colchão úmido), mais 169,5 kg (6 fiadas de fechamento da coifa e o telhado), totalizando 395,5 kg. O teste de

compressão demonstrou que um adobe de 40 cm de comprimento suportaria quase 10 vezes mais o peso requerido pelo total de fiadas do resfriador.

Como a quantidade de amostras não é suficiente para estabelecer conclusões, os resultados do ensaio não foram apresentados no corpo da dissertação.