FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE RONDONÓPOLIS INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DOUGLAS EDSON DIAS

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA RESFRIAMENTO EVAPORATIVO EM CASA DE VEGETAÇÃO

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE RONDONÓPOLIS INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DOUGLAS EDSON DIAS

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA RESFRIAMENTO EVAPORATIVO EM CASA DE VEGETAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Mato Grosso, Campus de Rondonópolis, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Tonny José Araújo da Silva

RONDONÓPOLIS –MT 2020

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

D541d Dias, Douglas Edson.

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA RESFRIAMENTO EVAPORATIVO EM CASA DE VEGETAÇÃO / Douglas Edson Dias. -- 2020

72 f.: il. color.; 30 cm.

Orientador: Tonny José Araújo da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Rondonópolis, 2020.

Inclui bibliografia.

1. Exaustor eólico. 2. Resfriamento evaporativo. 3. Casa de vegetação. 4. Celulose. 5. Argila Expandida. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO-GROSSO PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Avenida dos Estudantes, 5055 - Cidade Universitária, - CEP: 78736-900 -Rondonópolis/MT Tel.: (66) 3410-4121 - E-mail: spgeagri@hotmail.com

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA RESFRI-AMENTO EVAPORATIVO EM CASAS DE VEGETAÇÃO"

AUTOR: Mestrando Douglas Edson Dias

Dissertação defendida e aprovada em 28 de fevereiro de 2020.

Presidente da Banca / Orientador Doutor Tonny José Araújo da Silva Instituição: Universidade Federal de Mato Grosso

Examinador Interno: Doutor Everton Alves Rodrigues Pinheiro

Instituição: Universidade Federal de Mato Grosso

Examinador Externo: Doutor Marcio Venzon Instituição: Universidade Federal de Mato Grosso

Examinador Suplente: Doutor Heinsten Frederich Leal dos Santos

Instituição: Universidade Federal de Mato Grosso

Rondonópolis, 28 de fevereiro de 2020.



AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Edson Dias e Silvia Regina Lopes Dias, por dedicarem os seus esforços a me criar, me apoiar e ajudar a me tornar o homem que sou hoje. À minha irmã Dafne Cris Dias, pela ajuda e por sempre me inspirar a ser uma pessoa mais estudiosa.

À minha esposa Daniely Darth Ananias Dias por todo o amor, apoio, paciência, companheirismo e incentivo durante os dois anos e meio de viagens e tempos afastados. Ao meu filho Gustavo Darth Ananias Dias que, mesmo sem saber, é uma das minhas inspirações para continuar meu trabalho.

Ao professor Dr. Tonny José Araújo da Silva, por me escolher como seu orientado, pela paciência e pelos ensinamentos no processo de me tornar um pesquisador. Agradeço também aos professores do programa pelos conhecimentos.

Ao meu amigo Juan Vicente Liendro Moncada, por ter sido o meu braço direito no experimento, me ajudando de todas as formas possíveis durante a construção dos protótipos e no período em que eu não estava em Rondonópolis.

Ao meu amigo Wagner Oliveira dos Santos, pela companhia em nossas viagens de Primavera à Rondonópolis, pelo convívio desde os tempos da faculdade e pelo incentivo a ingressar no mestrado.

Aos meus colegas da UFMT, Raphael, Luana, Tássia, Rita, Well, Bency, Melke, Julio, Hederson, entre outros, pelos momentos de diversão e estudos.

Aos meus amigos Cristian, Altair, Diego, Judson, pelos diversos momentos em que tiveram de me ajudar.

Aos meus amigos de Rondonópolis, Gigechi, Lucas, Caroline, Caio, Fátima, Tio Neto, pelas diversas vezes em que me forneceram estadia na cidade.

Ao Instituto Federal de Mato Grosso que apoiou o desenvolvimento de minha pesquisa e qualificação.

Ao CNPQ e a CAPES pelo incentivo à ciência no Brasil.

A todo mundo que me ajudou contribuindo de forma direta ou indireta.

A todos, meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

Casas de vegetação são instrumentos de suma importância para o setor agrícola mundial, tanto em pesquisas quanto na produção de culturas que necessitam de proteção frente às adversidades climáticas. Na maioria das casas de vegetação em regiões de clima quente, o controle do microclima é realizado por meio de sistemas evaporativos de ar do tipo painel-exaustor. Nessa condição este trabalho teve como objetivo desenvolver um protótipo, em menor escala, de um sistema onde o exaustor convencional é substituído por um exaustor eólico, visando avaliar a eficiência de refrigeração e umidificação do ar. O protótipo foi desenvolvido na Universidade Federal de Mato Grosso, Câmpus de Rondonópolis - MT e foi composto por duas estruturas (casas de vegetação) com volumes aproximados de 9 m³, cada uma com um tipo de material em seu painel evaporativo: celulose e argila expandida. A estrutura foi monitorada por meio de sensores de temperatura e umidade, de modo a registrar o microclima dos ambientes protegidos, durante o período de um mês. Foram gerados gráficos e isotermas que permitiram a análise e comparação das estruturas. Os resultados demonstraram que os materiais utilizados no painel de resfriamento evaporativo não foram muito eficientes. Quando comparados, o painel de celulose teve uma melhor eficiência de resfriamento em relação ao de argila expandida.

Palavras-chave: Exaustor eólico, Resfriamento evaporativo, casa de vegetação, Celulose, Argila Expandida.

ABSTRACT

Greenhouses are extremely important devices for world agriculture, including researching and cultivation of cultures that need protection from climatic adversities. In most greenhouses in hot climates, the control of the microclimate is performed by pad-fan type evaporative air systems. In this condition, this work aimed to develop a small-scale prototype of a system where the conventional fan is replaced by a rotating turbine ventilator, aiming to evaluate cooling efficiency and air humidification. The prototype was developed at Federal University of Mato Grosso, Rondonópolis – MT, Brazil, and was composed of two structures (greenhouses) with approximate volumes of 9 m³, each with a type of material in its evaporative panel (cellulose and expanded clay). The structure was monitored by temperature and humidity sensors, in order to record the local microclimate for one month. Graphs and isotherms were generated that allowed the analysis and comparison of the structures. The results showed that the materials used in the evaporative cooling panel were not very efficient. When compared, the cellulose panel had a better cooling efficiency compared to the expanded clay.

Keywords: Rotating turbine ventilator, Evaporative Cooling, Greenhouse, Cellulose, Expanded Clay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito Estufa em casas de vegetação	15
Figura 2 - Fachadas de diferentes tipos de estruturas	17
Figura 3 - Mistura de ar seco e vapor d'água. Modelo de Dalton	19
Figura 4 – Representação gráfica da equação de Tetens	20
Figura 5 - Psicrômetros. (a) Psicrômetro manual. (b) Psicrômetro de aspiração	22
Figura 6 - Representação gráfica do déficit de vapor.	23
Figura 7 – Dispositivo de resfriamento evaporativo	24
Figura 8 - Representação do processo de resfriamento evaporativo na ca	rta
psicrométrica	26
Figura 9 - Sistema Painel-exaustor de resfriamento evaporativo em uma casa	de
vegetação	27
Figura 10 – Painel evaporativo de celulose	28
Figura 11 – Argila expandida (cinasita).	29
Figura 12 – Exaustor eólico.	29
Figura 13 – Exemplo de insuflação natural e exaustão mecânica	30
Figura 14 – Localização do experimento dentro do campus do campus	da
universidade	31
Figura 15 – Vista isométrica da estrutura, desenho em CAD	32
Figura 16 – Distribuição de temperatura dentro da casa de vegetação. a) Vista fron	tal
da estrutura com teto em arco. b) Vista lateral da estrutura com teto em arco. c) Vis	sta
frontal da estrutura com teto em capela. d) Vista lateral da estrutura com teto e	∍m
capela	33
Figura 17 – Teto do tipo capela em formato piramidal	34
Figura 18 - Suportes para os painéis evaporativo. a) Suporte do painel de arg	jila
expandida. b) Suporte do painel de celulose	35
Figura 19 – Eletrobomba de drenagem utilizada	36
Figura 20 – Sistema de circulação de água	36
Figura 21 – Reservatório principal de 5000L	37
Figura 22 – Distribuição dos pontos dentro da casa de vegetação. a) Localização d	os
níveis, medidas em mm. b) Sensores instalados	38
Figura 23 – Abrigos meteorológicos fabricados. a) Abrigo instalado dentro da casa	de
vegetação. b) Tubo e mecha utilizados para a medição da TBU	39

Figura 24 - Disposição das casas de vegetação devido ao compartilhamento do
sistema de aquisição de dados e posicionamento da estação meteorológica41
Figura 25 – Dimensões do exaustor41
Figura 26 - Curva característica exaustor eólico - Rotação x Velocidade externa42
Figura 27 – Curva característica exaustor eólico – Rotação x Vazão de exaustão43
Figura 28 – Curva característica exaustor eólico – Velocidade média do vento externo
x Vazão de exaustão43
Figura 29 - Variação da temperatura média do ar interno das casas de vegetação,
com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo nos dias do
experimento às 8 horas45
Figura 30 - Variação da temperatura média do ar interno das casas de vegetação,
com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo nos dias do
experimento às 10 horas46
Figura 31 - Variação da temperatura média do ar interno das casas de vegetação,
com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo nos dias do
experimento às 12 horas46
Figura 32 - Variação da temperatura média do ar interno das casas de vegetação,
com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo nos dias do
experimento às 14 horas47
Figura 33 - Variação da temperatura média do ar interno das casas de vegetação,
com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo nos dias do
experimento às 16 horas47
Figura 34 – Plano de localização das isotermas49
Figura 35 – Dados meteorológicos do dia 27/10/201950
Figura 36 - Variação da temperatura média do ar interno das casas de vegetação,
com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo no dia 27/10/2019
51
Figura 37 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 27/10/2019. Corte longitudinal
às 8 horas53
Figura 38 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 27/10/2019. Corte longitudinal
às 10 horas53
Figura 39 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 27/10/2019. Corte longitudinal
às 12 horas 54

Figura 40 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 27/10/2019. Corte longitudinal
às 14 horas54
Figura 41 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 27/10/2019. Corte longitudinal
às 16 horas54
Figura 42 – Variação da umidade relativa média do ar interno das estufas com os dois
tipos de painéis em relação à umidade do ar externa no dia 27/10/201956
Figura 43 – Variação da temperatura média do ar interno às estufas com os dois tipos
de painéis em relação à temperatura do ar externo no dia 13/11/201957
Figura 44 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 13/11/2019. Corte longitudinal
às 8 horas58
Figura 45 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 13/11/2019. Corte longitudinal
às 10 horas59
Figura 46 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 13/11/2019. Corte longitudinal
às 12 horas59
Figura 47 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 13/11/2019. Corte longitudinal
às 14 horas59
Figura 48 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 13/11/2019. Corte longitudinal
às 16 horas60
Figura 49 – Variação da umidade relativa média do ar interno das estufas com os dois
tipos de painéis em relação à umidade do ar externa no dia 13/11/201961
Figura 50 - Comparação eficiência evaporativa versus velocidade do vento no dia
27/10/201962
Figura 51 - Comparação eficiência evaporativa versus velocidade do vento no dia
13/11/201962
Figura 52 – Vistas ortogonais da estrutura das estufas. Medidas em m70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores de médias das temperaturas	para	as	horas	do	dia	na	data
27/10/2019 à 0,5 m do solo	Err	o! I	ndicad	or r	ião d	defir	nido.
Tabela 2- Valores de médias das temperaturas	para	as	horas	do	dia	na	data
27/10/2019 à 1,0 m do solo							52
Tabela 3- Valores de médias das temperaturas	para	as	horas	do	dia	na	data
07/40/0040 } 0.0 -		الم	ndiaad	or r	.ão <i>(</i>	ا انام	obic
27/10/2019 à 2,0 m do solo	E rr	O! II	liulcau	OI I	iau (JEIII	iiuo.
Tabela 4- Valores de médias das temperaturas							
·	para	as	horas	do	dia	na	data
Tabela 4- Valores de médias das temperaturas	para Err	as o! I	horas ndicad	do or r	dia i ão d	na d efi i	data nido.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1.	Casas de vegetação	13
2.1.1.	Conceito de casa de vegetação	14
2.1.2. climática	Classificação quanto ao monitoramento e controle das v	
2.1.3.	Classificação quanto ao tipo de estrutura	17
2.2.	Piscrometria	18
2.2.1.	Ar úmido e ar seco	18
2.2.2.	Propriedades do ar úmido	19
2.2.3.	Resfriamento evaporativo	24
2.2.3.1.	Sistema painel-exaustor	26
2.2.3.2.	Painéis evaporativos	27
2.3.	Exaustor eólico	29
3.	MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1.	Localização do experimento	31
3.2.	Estrutura da casa de vegetação	32
3.3.	Painéis evaporativos	35
3.3.1.	Sistema de alimentação de água para os painéis evaporativos	35
3.4.	Medição de temperatura e umidade	37
3.4.1.	Sistema de aquisição de dados	40
3.5.	Sistema de ventilação	41
3.6.	Eficiência	44
3.7.	Análise de dados	44
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45

4.1.	Análise dos dias do experimento	.45
4.2.	Dias específicos avaliados	.48
4.2.1.	Avaliação dia 27/10/2019	.49
4.2.2.	Avaliação dia 13/11/2019	.56
4.3.	Eficiência evaporativa	.61
5.	CONCLUSÕES	.64
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.65
ANEXO	1	.69
ANEXO 2	2	.71

1. INTRODUÇÃO

A agricultura é uma atividade altamente dependente de fatores climáticos, períodos de chuva ou seca mais extensos que o normal pode reduzir ou até mesmo comprometer a produção. Uma técnica que vem se expandindo desde o início do século XX é o uso de cultivos protegidos na produção de algumas culturas, principalmente flores e hortaliças. Essa técnica consiste em realizar o plantio e manejo em um local protegido contra as intempéries. Estufas ou casas de vegetação são exemplos de sua aplicação.

Segundo Castilla (2005), o uso de cultivo protegido tem diversos objetivos, tais como: proteger os cultivos contra as variações de temperatura, reduzir a velocidade do vento, limitar os impactos de climas mais áridos, reduzir as necessidades de insumos e água necessárias às plantas, reduzir os danos causados por pragas e doenças e com o controle climático é possível otimizar a qualidade do cultivo.

Além de otimizar alguns tipos de produção, as casas de vegetação também são fundamentais na realização de pesquisas científicas, promovendo condições ambientais homogêneas e possibilitando um controle mais rígido das variáveis.

Conforme aponta o estudo de Chang et al (2013), o uso de cultivo protegido cresceu cerca de 400% no mundo entre os anos de 1990 e 2010, passando de aproximadamente 0,7 milhões de hectares para mais de 3,7 milhões de hectares. Países como China, Espanha, Coreia do Sul, Japão e Turquia, detêm de 92 a 96% da área coberta por casas de vegetação do mundo. A china lidera a produção em casas de vegetação com área próxima de 3,4 milhões de hectares, porém o Brasil ocupa apenas a 36ª posição com em torno de 26 mil hectares, sendo 50% dessa produção localizados no estado de São Paulo.

O alto custo de implantação e manutenção de casas de vegetação afasta o produtor brasileiro frente a outras vantagens encontradas no plantio convencional em, praticamente, todas as regiões do Brasil. Isso faz com que o método seja utilizado apenas em culturas que tenham baixos rendimentos no plantio

convencional, como o caso do pimentão em que sua cultivar verde é plantada em campo aberto e as cultivares coloridas em ambiente protegido.

Porém, algumas medidas estão sendo tomadas como forma de difundir o uso no Brasil como as ações do Instituto Centro de Vida (ICV, 2019), em algumas regiões de Mato Grosso, onde a idealização e distribuição de kits de casas de vegetação de baixo custo, vem promovendo a propagação do uso do cultivo protegido em produções de hortaliças e verduras para pequenos produtores.

Em maior parte das casas de vegetação, o custo mais elevado da manutenção está diretamente relacionado com o alto consumo de energia elétrica dos dispositivos de refrigeração e controle. Sistemas que utilizam resfriamento evaporativo como refrigeração, geralmente, possuem um consumo energético mais baixo que casas de vegetação totalmente climatizadas. No entanto, a utilização de exaustores elétricos ainda gera altos custos com o consumo de energia elétrica.

O princípio básico do resfriamento evaporativo consiste na passagem de ar por um painel que está constantemente molhado. O ar seco troca de calor com a água, evaporando-a, de modo que a umidade relativa do ambiente aumenta e a temperatura do ar diminua. O material mais comumente utilizado é o painel de celulose, devido a sua praticidade na instalação e padronização de tamanhos. Já a argila expandida surge como uma escolha em locais aonde o painel de celulose se apresenta economicamente inviável, sendo uma alternativa ao sistema comum por ter resistência mecânica elevada e um preço mais convidativo.

A proposta deste trabalho foi desenvolver e avaliar o funcionamento de um sistema de casa de vegetação onde a exaustão do ar é realizada por meio de exaustores eólicos, em substituição aos exaustores elétricos. Nessa avaliação, foram comparados dois tipos de painéis evaporativos: painel de celulose e painel de argila expandida (Cinasita). Para isso foram utilizadas medições espaciais de temperatura e umidade do ar dentro dos ambientes protegidos a fim de gerar gráficos para comparações e cálculo de eficiência.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Casas de vegetação

A produção agrícola está presente na humanidade desde os tempos mais antigos. Por volta de 10 mil anos atrás, as civilizações começaram a implantar os primeiros sistemas de cultivos como uma alternativa ao sistema de predação de animais, sempre posicionando as culturas em locais que promoviam de condições para o plantio (MAZOYER e ROUDART, 2010). Devido a dependência que a agricultura possui ante aos fatores climáticos, a Humanidade sempre sofreu danos decorrentes da dificuldade - ou até impossibilidade - de controlar as condições climáticas da atmosfera. Dessa forma, o cultivo protegido nasceu com o intuito de mitigar essa dependência.

Conforme Bliska Jr e Honório (2000), os primeiros registros de cultivo protegido são de 93 A.C. Até meados do século XVII eram estruturas como adegas, celeiros e buracos encoberto por galhos, que tinham como objetivo abrigar a cultura protegida das ações da natureza (chuva, neve, entre outros). As primeiras casas de vegetação começaram a ser desenvolvidas nos Estados Unidos da América, por volta dos anos de 1800.

Durante muito tempo, o objetivo das casas de vegetação era de gerar a produção em climas mais frios, utilizando da estrutura para propiciar uma reserva de calor em períodos aonde a temperatura da atmosfera não era favorável à cultura. Estas estruturas eram constituídas utilizando o vidro como material transparente. Somente após a década de 50, e com o desenvolvimento de polímeros de polietileno, que as primeiras estufas e casas de vegetação começaram a utilizar o plástico em sua concepção. (BLISKA JR e HONÓRIO, 2000)

Com o passar do tempo, foi observada a possibilidade de utilização das casas de vegetação em outros climas além do frio. Hoje, o método também é utilizado em regiões tropicais e até mesmo desérticas, além de promover o cultivo de

diversas culturas em qualquer estação do ano. No Brasil, esse tipo de tecnologia foi introduzido somente a partir da década de 70, por meio da implantação de projetos promovidos pelo Instituto Adventista Agroindustrial de Manaus, no Amazonas, nos quais foram realizados testes com culturas de tomate, e pela Cooperativa Agrícola de Cotia, em São Paulo, em que foi utilizada a cultura de pepino japonês. (VECCHIA e KOCH, 1999)

2.1.1. Conceito de casa de vegetação

De acordo Cermeño (1990 apud OLIVEIRA, 1995), casa de vegetação é uma estrutura coberta e abrigada artificialmente com materiais transparentes, para proteção das plantas contra a ação dos agentes meteorológicos exteriores. Em seu interior é possível desenvolver culturas em todo seu ciclo vegetativo. Reis (2005) a define como um instrumento de proteção ambiental de plantas, composta por estrutura construída de material diversos, como madeira ou aço, coberta com material transparente que permite a passagem de luz solar, possibilitando o crescimento e desenvolvimento da cultura cultivada.

Casas de vegetação são comumente chamadas de estufas, devido ao efeito estufa que é o princípio básico de seu funcionamento.

O efeito estufa pode ser descrito da seguinte forma: O sol emite radiação em vários comprimentos de ondas, não somente o espectro visível. A radiação que ultrapassa a cobertura é absorvida pelo material presente dentro da casa de vegetação (solo, plantas e estruturas), aumentando a temperatura deste material. Todos os corpos dentro da casa de vegetação gerarão radiação, porém novamente, a radiação com comprimento de ondas maiores não consegue ultrapassar a cobertura, ficando retida no interior da casa de vegetação, confinando calor e elevando a temperatura interna, Figura 1.

Com o possível controle da temperatura interna e outras variáveis é possível propiciar condições climáticas diferentes às externas, propiciando o cultivo de algumas espécies em estações do ano que não seriam recomendadas para a cultura.

Conforme Farias, *et al*, (1993) para obter-se um efeito estufa eficiente, o material de cobertura deve apresentar transmissividade máxima para a radiação térmica no comprimento de onda de 0,3 a 3µm, algumas vezes chamadas de ondas curtas, e mínima para a radiação infravermelha distante, especialmente no intervalo de 8 a 14 µm, algumas vezes chamadas de ondas longas.

É importante que o material de cobertura tenha alta transmissividade para o comprimento de onda de 0,4 à 0,7 µm. Esta radiação, chamada de PAR (Photosynthetic Active Radiation, Radiação Fotossinteticamente Ativa), é a fração do espectro de radiação solar global utilizada no processo da fotossíntese. (FINCH, et al., 2004)

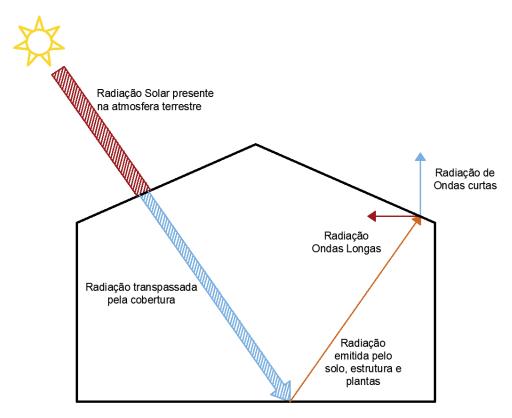


Figura 1 - Efeito Estufa em casas de vegetação. Adaptado de CASTILLA (2005)

Dos materiais para cobertura, o mais efetivo é o vidro, pois possui quase 90% de transmissividade para radiação solar e quase nula para a radiação infravermelha distante. Porém, o custo elevado de instalação e de manutenção inviabilizam sua utilização em larga escala, sendo comumente utilizada no Brasil o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), cuja transmissividade gira em torno de 80 % para radiação solar de ondas curtas. (BURIOL, *et al.*, 1995) Entretanto, ele

também possui alta transmissividade para comprimento de ondas maiores, por isso faz-se necessário aplicar um filme de proteção em sua superfície.

2.1.2. Classificação quanto ao monitoramento e controle das variáveis climáticas

Oliveira (1995) divide as estruturas de casas de vegetação em quatro tipos: Casas de vidro climatizadas; Casas de vidro semi-climatizadas; Casas de plástico semi-climatizadas, com efeito estufa presente; Casas de plástico "guarda-chuva" não climatizadas. Reis (2005) apresenta em seu trabalho uma divisão que abrange melhor a realidade do Brasil, visto que quase não existem casas de vegetação de vidro por aqui. O autor classifica em relação ao controle dos parâmetros meteorológicos como: Climatizadas, semiclimatizadas e não climatizadas.

As casas de vegetação climatizadas possuem elementos que controlam automaticamente as variáveis dentro do ambiente, especialmente Umidade Relativa, Temperatura e Luz. Seu uso comercial é mais comum em países onde o poder aquisitivo é mais elevado, como Japão, EUA e Alemanha, devido ao seu alto custo de implantação.

As casas de vegetação semiclimatizadas possuem um certo grau de automatização dos mesmos parâmetros, porém não são totalmente controladas. Frequentemente presente em instituições de ensino e utilizadas em pesquisas científicas relacionadas à agropecuária em geral, as não climatizadas não utilizam equipamentos que necessitam de energia, não havendo, assim, nenhum controle dos parâmetros além da cobertura para o cultivo. Esse tipo de casa de vegetação é costumeiramente utilizado na produção de hortaliças em razão da à alta viabilidade econômica em sua instalação e manutenção.

2.1.3. Classificação quanto ao tipo de estrutura

Além da classificação quanto ao tipo de monitoramento e controle das casas de vegetação, existem diversos tipos de estruturas que podem ser implementadas de acordo com a aplicação e condições locais.

Conforme Makishima, et al (1998) demonstram em seu trabalho que o nível de complexidade da estrutura irá depender de diversos fatores climáticos como ventos, chuvas, temperatura, entre outros e, portanto, estão diretamente ligados às características da a região do país em que irão serem implantadas. Alguns dos tipos utilizados no Brasil estão dispostos na Figura 2.

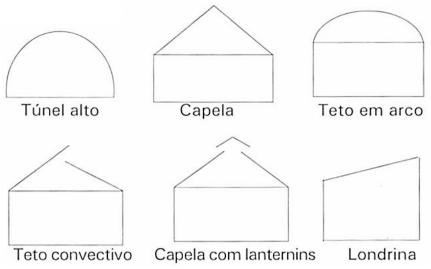


Figura 2 - Fachadas de diferentes tipos de estruturas Fonte: (MAKISHIMA, *et al.* 1998)

Para a região do centro oeste, as estruturas mais comuns de serem encontradas, conforme Reis (2005), são as do tipo 'teto em arco', 'capela' e 'teto convectivo', podendo ser de fabricação artesanal ou industrial. As estruturas podem ser construídas em módulo único ou em estruturas multimodulares (união de estruturas modulares únicos, de modo a formar uma única estrutura maior). A cobertura e, quando necessário, o cortinamento lateral são constituídos de plástico de polietileno de baixa densidade (PEBD) aditivado contra radiação ultravioleta, nas espessuras de 75, 100, 120 e 150 micra.

O material de fabricação da estrutura pode variar de acordo com a necessidade do produtor, sendo constituídos desde armações simples de bambu ou madeiras até grandes estruturas de aço galvanizado e fundações de concreto armado. As dimensões também irão variar de acordo com o tipo da estrutura, tendo como padrão o pé direito entre 2 e 3 m de altura e uma variação de combinações de largura e comprimento, dependendo da aplicação.

2.2. Piscrometria

Derivado das palavras gregas *pricro*, que significa frio, e *metria*, que significa medida, psicrometria é definida como a área de conhecimento que estuda as propriedades da mistura ar-vapor de água. Nesta seção será visualizado como essas propriedades interferem no processo de resfriamento evaporativo.

2.2.1. Ar úmido e ar seco

Para explicar o funcionamento do resfriamento evaporativo faz-se necessário entender como é constituído o ar da atmosfera em que o sistema irá funcionar. O ar atmosférico é definido como o ar que está presente suspenso em nossa atmosfera e é composto de diversos componentes gasosos, vapor d'água e contaminantes (ASHRAE, 2001).

Quando este ar está livre de todo o vapor d'água e dos contaminantes é chamado de ar seco. O ar seco é composto aproximadamente de 78,084% de nitrogênio; 20,95% de oxigênio; 0,934% de argônio; e 0,03% de outros componentes em percentuais menores.

O ar úmido é uma mistura de dois componentes, ar seco e vapor d'água. A quantidade de vapor d'água presente na mistura pode variar de zero até um valor máximo. Este valor máximo está diretamente relacionado com a temperatura e pressão. Quando existe um estado de equilíbrio entre o ar úmido e a fase aquosa condensada, esta condição é chamada de saturação. (ASHRAE, 2001).

2.2.2. Propriedades do ar úmido

O estudo das equações pertinentes às propriedades do ar úmido se baseia no modelo de Dalton, em que cada componente da mistura se comporta como se fosse independente e ocupasse o volume total do recipiente à uma determinada temperatura da mistura, exercendo cada um a sua parcela de pressão, esta pressão é chamada de pressão parcial, Figura 3. A soma das pressões parciais do ar seco (pa) e de vapor d'água (ea) resulta na pressão da mistura, Equação 1. A massa total da mistura também será a soma da massas de ar seco dos dois (ma) e de vapor (mv), Equação 2

$$p_{atm} = p_a + e_a \tag{1}$$

$$m = m_a + m_v \tag{2}$$

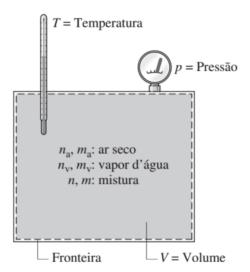


Figura 3 - Mistura de ar seco e vapor d'água. Modelo de Dalton. Fonte: (MORAN, *et al,* 2005)

Por convenção, pode-se admitir que tanto o ar seco quanto o vapor d'água se comportam como um gás ideal e, portanto, obedecem a lei dos gases ideais, Equação 3. Essa relação descreve o comportamento do gás ideal sob condições de pressão e temperatura diferentes.

$$PV = nRT (3)$$

Onde:

P - Pressão;

V – Volume:

n - Número de mols do gás ideal;

R – Constante universal do gás ideal;

T – Temperatura;

Para uma pressão atmosférica constante, quanto maior a temperatura, maior o volume de ar. Quanto maior o volume de ar, maior é a quantidade de vapor d'água que pode estar suspensa no ar e, consequentemente, maior a saturação. A pressão de saturação (e_s) pode ser descrita pela equação de Tetens (1930), Equação 4 e o seu comportamento pode ser visualizado na Figura 4.

$$e_s = A \times 10^{\frac{7.5T_{AR}}{237.3 + T_{AR}}} \tag{4}$$

Onde:

A – Fator de conversão – igual a 610,8 Pa (para resultados em Pa), 0,6108 kPa (para resultados e kPa) e 4,58 mmHg (para resultados em mmHg). es – Pressão de saturação do vapor d'água (Pa, kPa ou mmHg); TAR – Temperatura do ar em °C

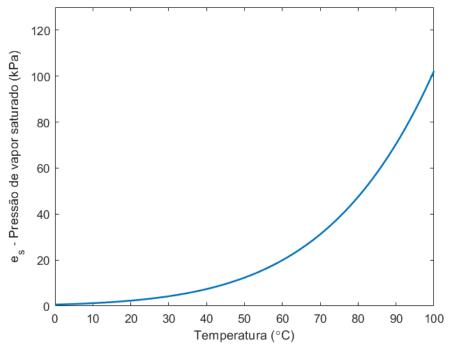


Figura 4 – Representação gráfica da equação de Tetens.

A umidade absoluta é uma maneira de demonstrar a quantidade de vapor d'água presente no ar úmido, ela é definida como a razão entre a quantidade de massa de vapor d'água sobre a quantidade de volume do ar. Por meio da equação dos gases ideais, Equação 3, pode-se chegar à Equação 5. Aplicando os valores comuns para à água, obtém-se a Equação 6. Se a pressão do vapor se encontra na região de saturação umidade, é chamada de umidade de saturação, Equação 7.(MIRANDA, et al. 2015).

$$UA = \frac{e_a}{RT} M_{H2O} \tag{5}$$

$$UA = 2168 \frac{e_a}{T} \tag{6}$$

$$US = 2168 \frac{e_s}{T} \tag{7}$$

Onde:

UA – Umidade Absoluta (g H₂O m⁻³ de ar).

US – Umidade de Saturação (g H₂O m⁻³ de ar).

ea - Pressão do vapor d'água (kPa).

es – Pressão de saturação do vapor d'água (kPa).

R – Constante Universal dos gases ideais – 8,31x10⁻³ kPa.m³.mol⁻¹.K⁻¹.

T – Temperatura (K).

M_{H2O} – Massa molar da água – 18,015 g.mol⁻¹.

É mais comum que a umidade seja representada em valores de porcentagem por meio da umidade relativa (UR) e não por unidade de massa de vapor por unidade de massa de ar.

Vale frisar que os valores de umidade relativa, apresentados de 0 a 100%, correspondem à uma faixa de 0 a 4% do volume de ar úmido, ou seja, 100% de umidade relativa do ar é igual à 4% do volume total de ar úmido de vapor, acima desse valor o ar encontra-se saturado e o vapor d'água começa a se condensar. Conforme Pereira *et al* (2007), para condições desérticas, a quantidade de vapor suspensa no volume de ar úmido fica próximo de 0% e chega mais próximo de 4% em regiões quentes e úmidas. A equação que demonstra o valor da umidade relativa (UR) é a razão entre a pressão parcial de vapor do ar e a pressão de saturação do vapor, Equação 8.

$$UR\% = \frac{e_a}{e_s} * 100 \tag{8}$$

Para ser possível calcular a pressão parcial de vapor do ar, também chamada de pressão atual de vapor, faz-se necessário entender como é realizada a medição das temperaturas. A temperatura, medida com o auxílio de um termômetro comum, irá demonstrar o valor da temperatura do ar úmido presente na atmosfera. Essa temperatura é chamada de temperatura de bulbo seco (TBS). A temperatura medida quando o ar está totalmente saturado é chamada de temperatura de bulbo úmido (TBU). A medição desta temperatura ocorre com um termômetro envolto em um tecido de algodão, onde esse algodão permanece sempre úmido, de forma a deixar o ar em volta do termômetro o mais próximo possível da saturação. Um equipamento que é capaz de medir TBS e TBU é chamado de Psicrômetro, Figura 5.

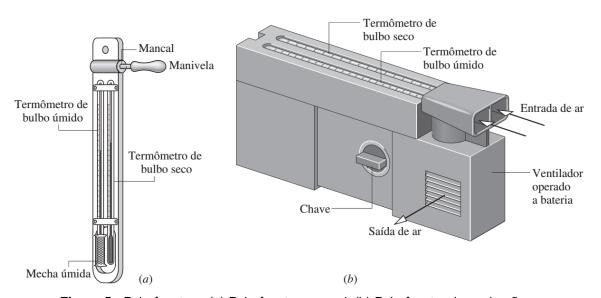


Figura 5 - Psicrômetros. (a) Psicrômetro manual. (b) Psicrômetro de aspiração. Fonte: (MORAN, *et al*, 2005)

De acordo com a ASHRAE (2001), a pressão parcial de vapor d'água pode ser calculada em função da umidade absoluta (UA) e a pressão atmosférica (p), Equação 9.

$$e_a = \frac{p * UA}{0.62198 + UA} \tag{9}$$

Para as medições realizadas com os psicrômetros, é possível utilizar equação empírica, Equação 10, para encontrar os valores de ea, que utiliza uma constante dependente do psicrômetro utilizado na medição (PEREIRA, *et al.* 2007).

$$e_a = e_{SU} - B * P (TBS - TBU)$$
 (10)

Onde:

ea – Pressão parcial de vapor d'água ou pressão atual de vapor na temperatura da mistura, em kPa.

e_{su} – Pressão de saturação de vapor d'água na temperatura de bulbo úmido, em kPa.

B – Constante dependente do tipo de psicrômetro utilizado na medição, sendo igual a 0,00067 °C⁻¹ para psicrômetros com ventilação forçada e igual a 0,00080 °C⁻¹ para com ventilação natural.

P – Pressão atmosférica local, em kPa.

TBS – Temperatura de bulbo seco, em °C.

TBU – Temperatura de bulbo úmido, em °C.

O déficit de pressão do vapor do ar (Δe), Equação 11, é uma variável muito importante quando se trata de psicrometria. Quanto maior o déficit de pressão, maior é a diferença entre a pressão de saturação e a pressão parcial de vapor, portanto maior a capacidade do ar em absorver água. Essa variação pode ser demonstrada no gráfico da Figura 6, onde foram marcados os pontos das pressões parciais e de saturação sobre o gráfico da Figura 4, sendo Tu a temperatura de bulbo úmido, Ts a temperatura de bulbo seco e To a temperatura de orvalho.

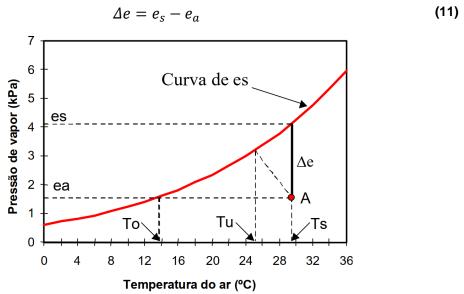


Figura 6 - Representação gráfica do déficit de vapor. Fonte: (PEREIRA, et al. 2007).

Os valores das propriedades psicrométricas variam de acordo com a temperatura da mistura e a pressão atmosférica. Uma maneira mais prática para determinar estes valores é a utilização da carta psicrométrica, constituída por um gráfico que reúne as propriedades psicrométricas, o que facilita a visualização e interpretação.

2.2.3. Resfriamento evaporativo

Regiões onde as temperaturas são elevadas e possuem uma baixa umidade relativa do ar são ambientes perfeitos para a utilização de resfriamento evaporativo. Esse tipo de resfriamento consiste na utilização da evaporação de água como uma maneira eficiente de diminuir a temperatura dos ambientes.

O processo funciona com base na umidificação do ar por meio da evaporação de água. Uma corrente de ar, geralmente com baixa umidade, é forçada a passar por uma matriz continuamente molhada ou por uma região onde ocorre a pulverização de água. Ao passar por essa zona, o ar fornece energia à água presente, fazendo com que parte seja evaporada. Ao fornecer energia à água suspensa, a temperatura do ar reduz. Devido a evaporação, a massa de água no ar úmido é elevada, aumentando a umidade na saída da região molhada. Um modelo simplificado do resfriamento evaporativo pode ser visualizado na Figura 7.

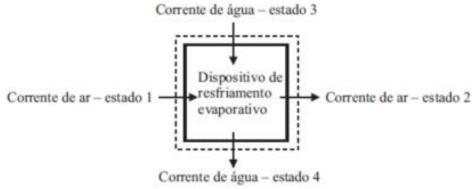


Figura 7 – Dispositivo de resfriamento evaporativo. Fonte: (MITCHELL e BRAUN, 2018)

Seguindo o modelo de Dalton, os componentes do ar úmido não reagem entre si podendo ter o valor da entalpia total calculado de forma análoga à massa do ar úmido, somando as entalpias do ar. A entalpia específica da mistura é demonstrada pelas Equações 12 e 13. Entalpia é definida como a máxima energia que pode ser cedida por um sistema termodinâmico na forma de calor. (MORAN, et al, 2005)

$$h = h_a + h_v \tag{12}$$

$$h = c_{p,mist}T + w \left(h_{cong,ref} - c_{p,vapor}T_{ref,vapor}\right)$$
 (13)

Onde:

h – Entalpia específica total da mistura, em kJ.kg⁻¹.

ha – Entalpia específica do ar seco, em kJ.kg⁻¹.

h_v – Entalpia específica do vapor d'água, em kJ.kg⁻¹.

c_{p,mist} – Calor específico da mistura, em kJ.kg⁻¹ K⁻¹.

T – Temperatura da mistura, em °C.

w – Umidade ou razão de mistura, em g de vapor/ kg de ar seco.

h_{cong,ref} – Entalpia específica na temperatura de referência à 0°C, em kJ.kg⁻¹.

T_{ref,vapor} – Temperatura de referência à 0°C.

c_{p,vapor} – Calor específico do vapor d'água, em kJ.kg⁻¹ K⁻¹.

Mitchell e Braun (2018) mostram que, de modo geral, pode-se desprezar a transferência de calor entre o dispositivo de resfriamento e o ambiente, o trabalho gerado pelo dispositivo e todos os efeitos das energias cinéticas e potencial, além de considerar que durante o processo, toda a água é evaporada, o balanço de energia para o volume de controle da Figura 7 pode ser demonstrado como:

$$h_2 = (\omega_2 - \omega_1)h_3 + h_1 \tag{14}$$

Onde:

h₁ – Entalpia específica do ar na entrada do dispositivo, em kJ.kg⁻¹.

h₂ – Entalpia específica do ar na saída do dispositivo, em kJ.kg⁻¹.

h₃ – Entalpia específica da água na entrada do dispositivo, em kJ.kg⁻¹.

 ω_1 – Umidade do ar na entrada do dispositivo, em g de vapor/ kg de ar seco.

 ω_2 – Umidade do ar na saída do dispositivo, em g de vapor/ kg de ar seco.

Devido ao termo $(\omega_2 - \omega_1)h_3$ ser relativamente pequeno em comparação com a magnitude dos termos relacionados à entalpia do ar nos estados 1 e 2, ele pode ser desconsiderado, fazendo com que a entalpia do processo varie apenas ligeiramente, podendo ser considerado constante, Figura 8.

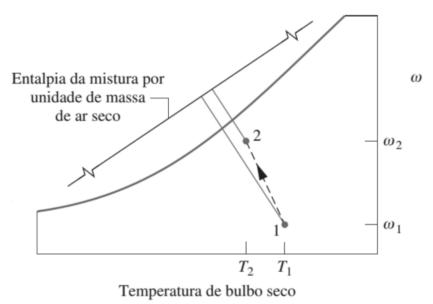


Figura 8 – Representação do processo de resfriamento evaporativo na carta psicrométrica. Fonte: (MORAN, et al, 2005)

Conhecendo os valores de vazão mássica de ar de entrada (\dot{m}_{ar}), umidade de entrada e saída, é possível determinar qual a vazão mássica mínima de água (\dot{m}_{H2o}) necessária para promover o aumento de umidade e consequente queda de temperatura, conforme Equação 15.

$$\dot{m}_w = (\omega_2 - \omega_1)\dot{m}_{qr} \tag{15}$$

2.2.3.1. Sistema painel-exaustor

O sistema painel-exaustor ou sistema "pad-fan", é um sistema de resfriamento evaporativo que consiste na utilização de um painel com capacidade de reter água e um exaustor no sentido oposto da casa de vegetação que proporciona a sucção

do ar externo, de forma que esse ar passa pelo painel e por todo o ambiente até ser expelido para o exterior do ambiente novamente pelo exaustor, Figura 9.

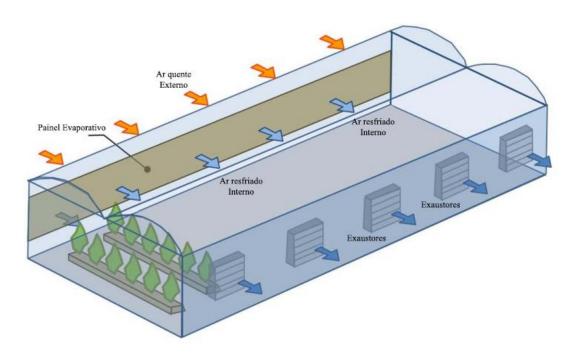


Figura 9 – Sistema Painel-exaustor de resfriamento evaporativo em uma casa de vegetação. Fonte: (FRANCO, *et al.*, 2014)

Segundo Franco *et al* (2014) o sistema painel-exaustor possui melhor eficiência, é mais barato, consome menos energia e menos água que o sistema de nebulização de água. Porém, este sistema requer que o ambiente seja hermeticamente fechado, de maneira que todo o ar seja forçado a passar pelos painéis.

2.2.3.2. Painéis evaporativos

O painel evaporativo é o elemento principal de funcionamento do resfriamento evaporativo. Pode ser constituído de qualquer material que permita a passagem de ar e que seja capaz de promover um escoamento contínuo de água em forma de "barreira" na região de entrada do ar, observando a sua respectiva eficiência de resfriamento.

Um material largamente utilizado em aplicações rurais como painel evaporativo é a celulose corrugada impregnada com resina. Geralmente construído em formato de colmeia, o painel é constituído de tiras de papel onduladas coladas entre si, formando canaletas que alternam entre declive e aclive, Figura 10. Tem uma eficiência evaporativa relativamente alta (entre 70 e 90%), baixa perda de carga, capacidade alta de saturação de água e é facilmente encontrada em módulos padronizados, facilitando sua instalação. Porém tem um alto custo de manutenção e implantação, vida útil reduzida, caso a manutenção não seja adequada, e permite a proliferação de algas em seu interior. (BOM, *et al.*, 1999).

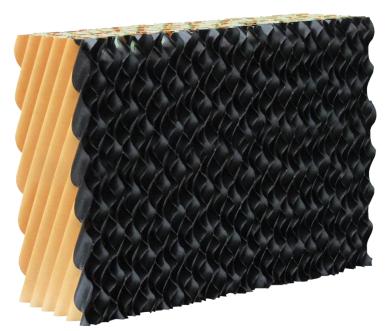


Figura 10 – Painel evaporativo de celulose. Fonte: Munters (2019)

Outro material largamente estudado como alternativa ao painel de celulose é a argila expandida (cinasita), como é possível observar nos trabalhos de Silva (2002), Tinôco et al. (2002) e Vigoderis et al. (2007). A argila expandida (cinasita), Figura 11, é um agregado de cerâmica, produzido em formato esférico de diversos diâmetros (2,5 à 32 mm). Tem elevada resistência mecânica, leveza, baixo coeficiente de transferência de calor e inércia química. Amplamente utilizado na construção civil para dar leveza à preenchimento de concreto e aumentar a capacidade de isolante térmico em paredes. Devido às suas características, a facilidade e baixo preço de compra, vem sendo utilizado em sistemas de resfriamento evaporativo em casas de vegetação e produção animal.



Figura 11 – Argila expandida (cinasita). Fonte: Cinexpan (2019)

2.3. Exaustor eólico

Exaustores eólicos são exaustores utilizados em sistemas de ventilação para galpões, indústrias e locais fechados. Têm como objetivo promover trocas de ar do ambiente, de forma a reduzir a temperatura interna e melhorar a qualidade do ar. Feitos, geralmente, de alumínio ou aço galvanizado, são compostos por diversas aletas acopladas em torno de um eixo, Figura 12, promovendo a sucção do ar de dentro para fora, de forma a proporcionar um fluxo de ar. Compacto, leve, de simples montagem e fácil manutenção, têm como característica principal a desnecessidade de se utilizar energia elétrica, o que reduz despesas.. Essas características os tornam uma excelente alternativa, amplamente utilizada em sistemas de ventilação industrial.



Figura 12 – Exaustor eólico. Fonte: (Exaustores Eólicos Marivent, 2019)

O funcionamento do exaustor é baseado e duas ações: o movimento dos ventos e o efeito convectivo, ou "efeito chaminé", do inglês "stack effect". Por ser constituídos de aletas, a ação do vento consegue movimentar o exaustor de forma a promover uma rotação em torno de seu eixo central. Essa rotação determina a capacidade de exaustão do ar do ambiente. O valor da vazão de exaustão de ar varia de acordo com as dimensões das aletas, espaçamento entre aletas e diâmetro de entrada do exaustor. Segundo o fabricante, as vazões podem variar de 0 à 3000 m³.h-¹. Já no trabalho de Mauler Junior (2004), é possível visualizar valores em função de vazão mássica variando entre 600 e 2000 kg.h-¹.

Na ausência de vento, o fator que permite a rotação do exaustor é o efeito convectivo. Conforme Macintyre (1990), o efeito convectivo ocorre devido às correntes convectivas de ar proporcionadas pelo gradiente de temperatura do ambiente. O ar quente, sendo menos denso que o ar frio, tende a subir, de modo que o ar frio, mais denso, desce, ocupando o local que era do ar quente.

Em ambiente onde o exaustor eólico é utilizado, o tipo de ventilação empregado, geralmente, é o de insuflação natural e exaustão mecânica. O exaustor retira o ar do recinto para o exterior, reduzindo a pressão interna tornando-a menor que a pressão do ambiente externo, Figura 13.

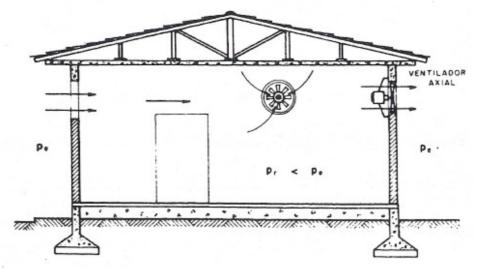


Figura 13 – Exemplo de insuflação natural e exaustão mecânica. Fonte: Fonte: (MACINTYRE, 1990, p. 74)

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização do experimento

O experimento foi realizado na Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Rondonópolis, localizado na cidade de Rondonópolis, sob as coordenadas de latitude 16°27'51.5"S, longitude 54°34'52.4"W e altitude 289 m, Figura 14. Conforme a classificação climática de Köppen-Geiger, Rondonópolis possui um clima do tipo Aw, tropical com chuvas no verão e invernos secos.



Figura 14 – Localização do experimento dentro do campus do campus da universidade (Identificar melhor, talvez uma letra "A"??).

A construção das casas de vegetação deu-se no período compreendido entre março e setembro de 2019 e a coleta de dados foi realizada de outubro a novembro 2019.

3.2. Estrutura da casa de vegetação

Foram construídas duas estruturas retangulares, com teto do tipo capela, instaladas no sentido Norte-Sul com dimensões de 1,8 m de largura, 2,30 m de comprimento e 2,45 m de altura, com volume aproximado de 9 m³(Figura 15).O projeto contendo as medidas e especificações dos tubos está presente no anexo 1. A fim de reduzir os efeitos causados pela absortância da radiação na estrutura, a superfície metálica foi revestida de pintura branco brilhante. Seu tamanho reduzido foi escolhido com o intuito de diminuir os custos de fabricação e promover a possibilidade de ser uma estrutura modular, permitindo a instalação de várias estruturas lado a lado. O fechamento foi realizado com filme plástico próprio para casas de vegetação com proteção UV de 150 micra. Os custos da confecção do projeto estão contidos no anexo 2.



Figura 15 – Vista isométrica da estrutura, desenho em CAD.

A estrutura foi projetada em conformidade com a norma NBR 16032 – Estrutura de estufa e viveiro agrícola – Requisitos de projeto, construção, manutenção e restauração (ABNT, 2012), sendo dimensionada para os estados-limites últimos e estados-limites de serviço, para as cargas geradas pelo vento à 0° e 90° na região do ensajo.

Devido a direção do fluxo ser diferente dos sistemas painel-exaustor convencionais, o teto da estrutura foi pensado de maneira a produzir um fluxo direto para o exaustor instalado no topo, tentando melhorar a eficiência do efeito convectivo.

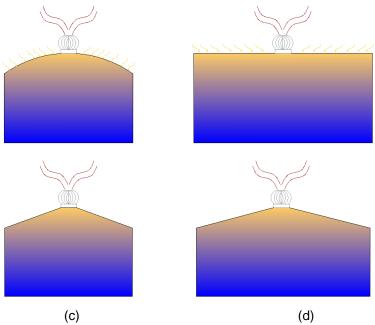


Figura 16 – Exemplo de distribuição de temperatura dentro da casa de vegetação. a) Vista frontal da estrutura com teto em arco. b) Vista lateral da estrutura com teto em arco. c) Vista frontal da estrutura com teto em capela. d) Vista lateral da estrutura com teto em capela.

Seu formato piramidal tem como objetivo eliminar os possíveis bolsões térmicos que estariam presentes nos cantos longitudinais do teto, caso o fosse de estrutura convencional, Figuras 16 e 17.



Figura 17 – Teto do tipo capela em formato piramidal.

Para a fixação dos painéis evaporativos, foram confeccionados suportes removíveis que são presos às laterais da casa de vegetação por meio de parafusos. Optou-se pela utilização de dois tipos de suportes: um com uma tela de proteção para o armazenamento da argila expandida, Figura 18a; e outro sem a tela, que suporta o painel de celulose, Figura 18b; Esses suportes foram produzidos com a utilização de cantoneiras de aço de tamanho de 19,05 x 3,17 mm, fixados entre si por meio de juntas soldadas e parafusadas. Para o suporte da argila expandida, foram utilizadas duas chapas expandidas, de 25,4 mm, intercaladas de modo que o espaço da chapa fosse diminuído impossibilitando a saída dos pedaços de argila.



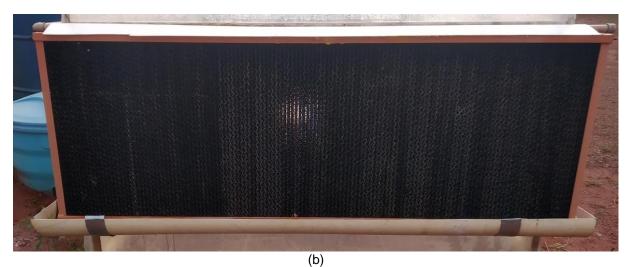


Figura 18 – Suportes para os painéis evaporativo. a) Suporte do painel de argila expandida. b) Suporte do painel de celulose

3.3. Painéis evaporativos

Os materiais utilizados como elementos evaporativos foram: para o primeiro painel argila expandida (cinasita) do tipo 3222, com diâmetro aproximado de 32 mm, Figura 18a e para o outro painel uma placa de celulose corrugada, do tipo colmeia com dimensões 1,80 m de comprimento, 0,80 m de largura e 0,15 m de espessura, Figura 18b.

3.3.1. Sistema de alimentação de água para os painéis evaporativos

Para a água ser movimentada pelos painéis foi necessário montar um sistema de circulação de água, no qual foram utilizados dois sistemas independentes interligados em sua alimentação. Cada sistema é composto por uma caixa d'água de polietileno com capacidade de 300 L, funcionando como reservatório de água, uma eletrobomba de drenagem da marca ASKOLL, 127V, com vazão de 14 L.min¹, acoplada à uma voluta utilizada em máquinas de lavar roupas, Figura 19, e tubos e conexões de PVC de 25 mm de diâmetro. O esquema de distribuição está disposto na Figura 20.



Figura 19 – Eletrobomba de drenagem utilizada.

Strobel, *et al.* (1999) apresentam tabelas que determinam o fluxo de água mínimo para uma bomba que promove a circulação de água em sistemas evaporativos. Para o painel de celulose utilizado, o valor mínimo da vazão seria de 6 L.min⁻¹. Como cada bomba fornece 14 L.min⁻¹ para dois painéis simultâneos, o valor de 7 L.min⁻¹ foi suficiente. A mesma vazão foi utilizada no painel de argila expandida.

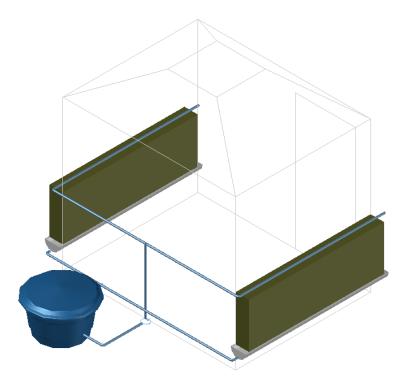


Figura 20 – Sistema de circulação de água.

Devido a localização das casas de vegetação, não havia nenhum ponto de água que pudesse suprir um fluxo constante de água necessário aos painéis. Para corrigir este problema, foi instalada uma caixa d'água de 5000 L de polietileno, Figura 21, que serve como abastecimento para os dois reservatórios menores (300 L). Os reservatórios menores promoviam o fluxo contínuo de água para os painéis. O reservatório maior era abastecido semanalmente.



Figura 21 – Reservatório principal de 5000L.

3.4. Medição de temperatura e umidade

Realizar a medição de apenas um ponto de temperatura dentro da casa de vegetação não demonstra com fidelidade o real gradiente de temperatura, para isso, fez-se necessária a instalação de vários sensores de temperatura, distribuídos espacialmente em uma malha, para avaliar de forma mais eficiente a distribuição deste gradiente.

Visando obter dados de todo o volume da casa de vegetação, foram instalados 18 pontos de medições em cada estrutura. A distribuição dos sensores ficou conforme a Figura 22, dividindo a casa de vegetação em três níveis: um próximo ao solo, logo abaixo do painel evaporativo (30 cm), outro à aproximadamente 1 m do solo, logo acima do painel evaporativo e um à 2 m de altura, no topo da

estrutura. A altura próxima ao solo foi selecionada objetivando verificar o comportamento térmico para culturas plantadas diretamente ao solo, o segundo nível foi escolhido com o objetivo de monitorar o comportamento caso a cultura estivesse sendo cultivada em vasos postos sobre uma bancada padrão de 90 cm de altura e o último nível com o intuito de estimar com mais proximidade a distribuição de temperatura nas regiões mais elevadas da casa de vegetação.

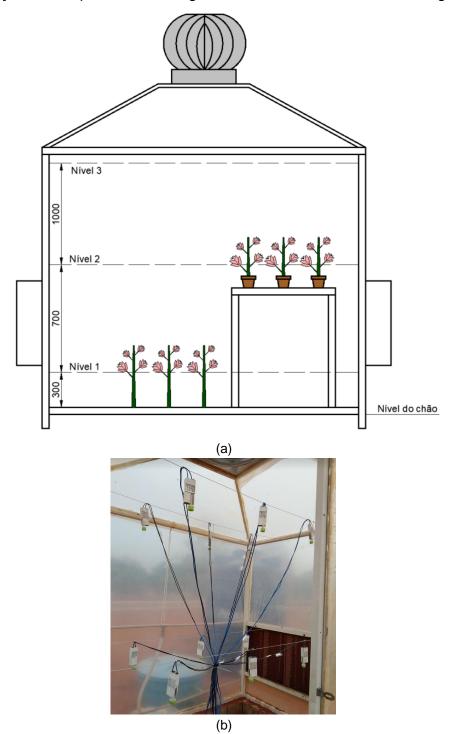


Figura 22 – Distribuição dos pontos dentro da casa de vegetação. a) Localização dos níveis, medidas em mm. b) Sensores instalados.

Para cada ponto foram confeccionados abrigos meteorológicos em alumínio e pintados de branco brilhante, capazes de acomodar dois sensores: um para a temperatura de bulbo seco e outro para a temperatura de bulbo úmido (TBS e TBU), Figura 23a. Para a medição da TBU foi necessário prender à ponta do sensor uma mecha de algodão que está sempre com a ponta submersa em água por meio de um tubete de PVC fixado ao abrigo meteorológico, Figura 23b.



(b)

Figura 23 – Abrigos meteorológicos fabricados. a) Abrigo instalado dentro da casa de vegetação. b)

Tubo e mecha utilizados para a medição da TBU.

3.4.1. Sistema de aquisição de dados

Dois tipos de sensores foram utilizados no sistema de aquisição de dados: termopares do tipo T (Constantan e Cobre), com resolução de 0,1 °C, e sensores de temperatura ds18b20 com encapsulamento à prova d'água e resolução programável em 11 bits de 0,125 °C. Para armazenagem de dados, utilizou-se um datalogger Campbell CR1000 equipado com o multiplexador AM16/32B, juntamente com um sistema composto por dois Arduinos uno R3, equipados com shield de datalogger+ RTC (Real Time Clock).

Tanto os termopares quanto os sensores de temperatura ds18b20 foram calibrados pelo método de banho térmico. Eles foram igualmente distribuídos entre as duas casas de vegetação, 18 sensores de cada tipo em cada uma. Essa distribuição influenciou na posição de uma estrutura em relação à outra, pois, devido à necessidade de compartilhar o mesmo sistema de aquisição de dados, as estruturas deveriam estar próximas o suficiente para não haver gastos elevados com a confecção dos termopares e afastadas de modo que uma não produzisse sombreamento sobre a outra, conforme Figura 24.

As variáveis meteorológicas como radiação solar, temperaturas externas, velocidade e direção do vento, foram adquiridas por meio de uma estação meteorológica acoplada ao *datallogger*, Figura 24.

Equipamentos da estação meteorológica:

Datallogger Campbell – Modelo CR1000 e Multiplexador AM16/32B

Piranômetro Apogee – Modelo SP 110

Conjunto anemômetro e direção de vento - Modelo 03001

Sensor de temperatura do tipo Termistor localizado dentro de um abrigo metereológico



Figura 24 — Disposição das casas de vegetação devido ao compartilhamento do sistema de aquisição de dados e posicionamento da estação meteorológica.

3.5. Sistema de ventilação

O sistema de ventilação é baseado no exaustor eólico instalado no teto de cada casa de vegetação. Usado como única fonte de exaustão do ambiente, é ele que promove a queda de pressão interna, produzindo o fluxo de ar aspirado pelos painéis evaporativos e direcionado para o ambiente externo.

O modelo utilizado nos dois protótipos é da marca "MARIVENT" do tipo exaustor eólico, confeccionado em aço inoxidável e com dimensões representadas na Figura 25.



Figura 25 – Dimensões do exaustor Fonte: (MARIVENT, 2019)

Conforme o fabricante, a vazão do exaustor eólico varia de acordo com a temperatura do ambiente e, principalmente, o vento externo, podendo chegar à um valor próximo de 3000 m³.h⁻¹.

Com o intuito de descobrir o comportamento do exaustor utilizado, foram coletados dados de campo e estimadas curvas características, relacionando a velocidade do vento externo com a rotação do exaustor (Figura 26), e a rotação do mesmo com a vazão de exaustão (Figuras 27). A Figura 28, relaciona as equações das Figuras 26 e 27, gerando uma comparação entre a velocidade média do vento externo e a vazão de exaustão.

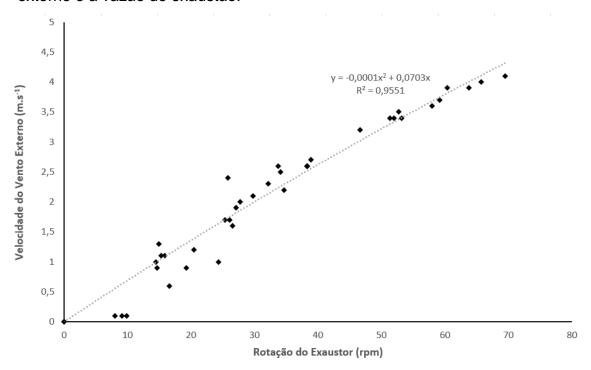


Figura 26 – Curva característica exaustor eólico – Rotação x Velocidade externa

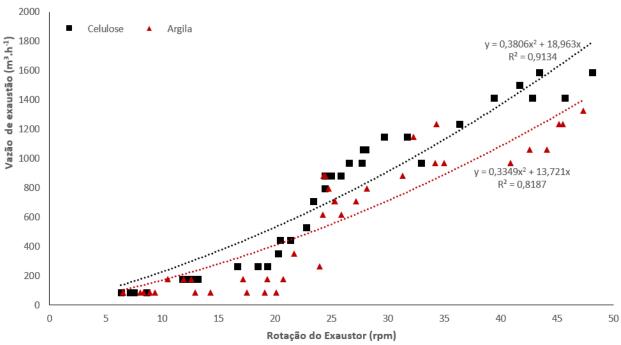


Figura 27 – Curva característica exaustor eólico – Rotação x Vazão de exaustão.

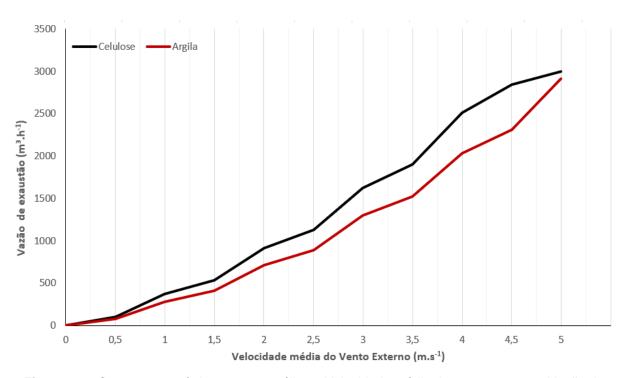


Figura 28 – Curva característica exaustor eólico – Velocidade média do vento externo x Vazão de exaustão.

Em razão do pequeno volume interno da casa de vegetação utilizada no experimento, somente foi instalado um exaustor em cada casa de vegetação.

Para se definir a vazão necessária para manter as condições favoráveis dentro da casa de vegetação, foi utilizado como parâmetro o estudo de Fuchs et al (2006)

que, em testes efetuados com roseiras, apontou como ideal o número de 60 trocas de ar por hora estufa. Tomando esse valor como base, e considerando que o volume da cada estufa é 9m³, a vazão necessária para a manutenção das condições favoráveis seria de 540 m³h⁻¹.

3.6. Eficiência

A eficiência do sistema pode ser obtida com base na máxima queda de temperatura possível para o sistema. A menor temperatura possível é encontrada na região de saturação onde se encontra a temperatura de bulbo seco, portanto, a eficiência é calculada por meio da razão entre a queda de temperatura real da corrente de ar e a queda de temperatura máxima possível, Equação 16.

$$\varepsilon = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - TBU} * 100 \tag{1}$$

Onde:

ε – Eficiência de resfriamento, em %

T₁ – Temperatura externa do ar na entrada do dispositivo, em °C

T₂ – Temperatura interna do ar na saída do dispositivo, em °C

TBU – Temperatura de bulbo úmido externa do ar na entrada do dispositivo, em °C

3.7. Análise de dados

Para a análise das variáveis de temperatura, umidade e eficiência, os tratamentos foram dispostos em um sistema fatorial, onde os fatores são os tipos de painéis e as horas específicas do dia (8, 10, 12, 14, 16) no delineamento de blocos casualizados com 6 repetições.

Os dados foram avaliados por meio da análise de variância e regressões, utilizando programa computacional "SISVAR". Para os fatores qualitativos foi utilizado o teste de F ao nível de 5% de probabilidade e para os fatores quantitativos foram selecionados os melhores coeficientes de regressão, por meio do teste de "F" ao nível de 5% de probabilidade visando os melhores valores de R².

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De modo a analisar a estrutura de forma geral, foram verificados a média da temperatura externa de acordo com cada dia do experimento nos níveis mais baixos em cada uma das 5 horas analisadas (8, 10, 12, 14 e 16 horas). Estes valores foram comparados com a média da temperatura externa às casas de vegetação.

4.1. Análise dos dias do experimento

As figuras a seguir demonstram o comportamento das casas de vegetação conforme o horário analisado em comparação com a variável externa.

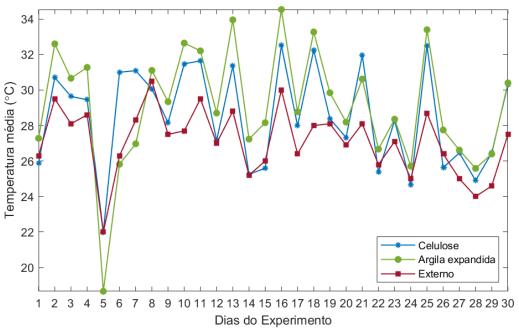


Figura 29 – Variação da temperatura média do ar interno das casas de vegetação, com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo nos dias do experimento às 8 horas.

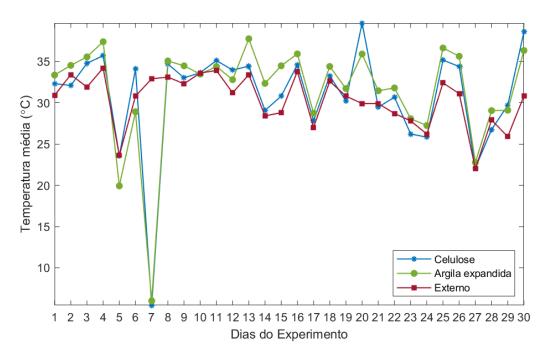


Figura 30 – Variação da temperatura média do ar interno das casas de vegetação, com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo nos dias do experimento às 10 horas.

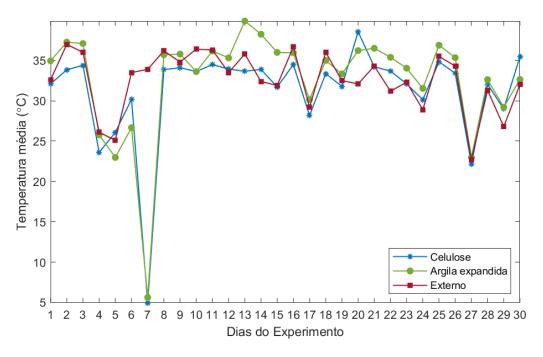


Figura 31 – Variação da temperatura média do ar interno das casas de vegetação, com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo nos dias do experimento às 12 horas.

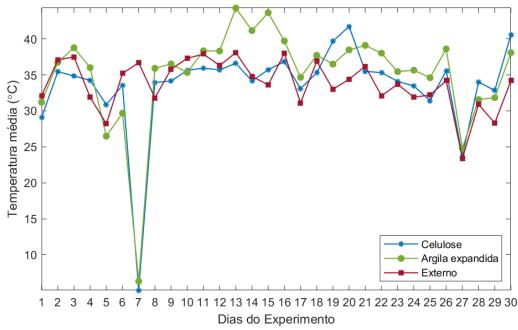


Figura 32 – Variação da temperatura média do ar interno das casas de vegetação, com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo nos dias do experimento às 14 horas.

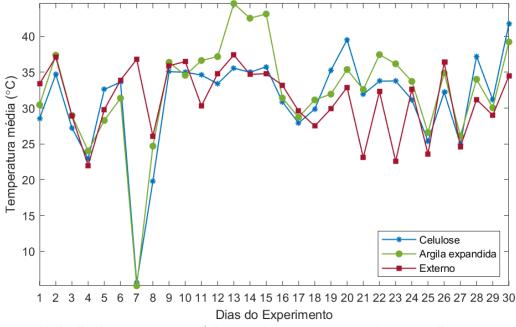


Figura 33 – Variação da temperatura média do ar interno das casas de vegetação, com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo nos dias do experimento às 16 horas.

Os dias 5, 6, 7, 8, 13, 14 e 15 (dias 22, 23, 24, 25, 30 e 31 de outubro e 1 de novembro, respectivamente) apresentam discrepâncias nos valores devido à problemas encontrados no sistema de aquisições e, por isso, devem ser desconsiderados.

Foram analisadas as médias de temperatura do nível mais baixo (Nível do solo), devido à maior eficiência do local com relação aos outros níveis (1 e 2 metros). Na Figura 29, é possível visualizar que, no horário das 8 horas, as casas de vegetação possuem temperatura mais elevada que a externa, isso ocorre porque a umidade externa ainda é alta e a radiação já é elevada, não possibilitando que o sistema de resfriamento funcione com eficiência. Para os outros horários é possível visualizar que as temperaturas internas se aproximam ou estão abaixo da temperatura externa, como observado para o painel de celulose nas Figuras 30 e 31.

4.2. Dias específicos avaliados

Para avaliar os resultados dos diferentes tratamentos aplicados, foram selecionados dias específicos, dentro de todos analisados, levando em conta variáveis meteorológicas externas às casas de vegetação. A análise foi realizada de forma a compreender a dinâmica do sistema de climatização e comparar os dois tipos de painéis em horas específicas do dia. Essa investigação se utiliza de gráficos, tabelas e isortermas que são capazes de caracterizar o funcionamento dos sistemas. As isotermas foram geradas por meio de interpolação dos valores dos pontos coletados, por meio do programa "Octave", possibilitando uma apresentação visual dos fatores analisados. Os planos de corte das isotermas, foram referenciados sempre pelo meio da estrutura em suas dimensões conforme Figura 34.

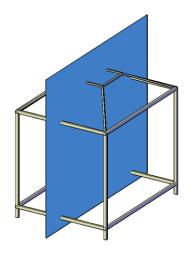


Figura 34 - Plano de localização das isotermas

Os dias selecionados para a avaliação foram: dia 27/10/2019 (dia com baixa umidade relativa externa média e alto saldo de radiação) e 13/11/2019 (dia com alta umidade relativa média externa e baixo saldo de radiação). Os dados meteorológicos foram registrados pela estação meteorológica automática do INMET A907, instalada a cerca de 100 m da área de estudo (Latitude 16°27'44.7"S. Longitude 54°34'48.5"W).

4.2.1. Avaliação dia 27/10/2019

A data de 27 de outubro de 2019 foi selecionada devido ao dia ter o menor valor de umidade relativa média externa do período, UR_{méd} = 55,75%, juntamente com um dos maiores valores de saldo de radiação diário, Rn = 25,540 MJm⁻²dia⁻¹. Estas condições foram as mais favoráveis à utilização do sistema evaporativo dentro do período estudado.

A Figura 35 apresenta a variação dos parâmetros externos no dia avaliado (27/11/2019). É possível observar que os valores de temperaturas mais altas e umidades mais baixas do dia ocorreram entre as 14 e 16 horas.

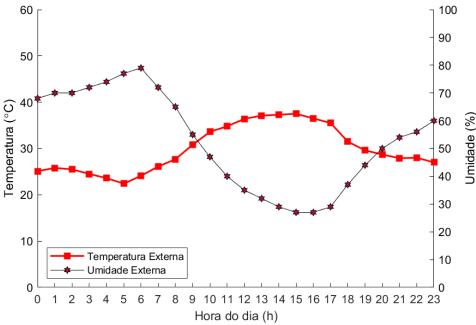


Figura 35 – Dados meteorológicos do dia 27/10/2019 Fonte: (INMET) 2019

Na Figura 36, é possível ver o comportamento térmico das duas casas de vegetação com os painéis diferentes em comparação à temperatura externa. Pode-se observar que durante o período em que o protótipo não está exposto a radiação solar, período noturno (das 18 às 6 horas), quase não há diferença entre as temperaturas médias internas dos ambientes protegidos, a maior diferença ocorre às 22 h e tem valor de 0,96 °C. Também nesse período é visível que as médias das temperaturas internas são, ligeiramente, menores que a externa.

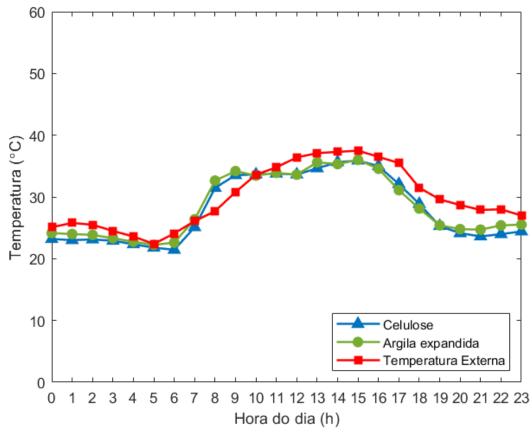


Figura 36 – Variação da temperatura média do ar interno das casas de vegetação, com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo no dia 27/10/2019

Observando o período diurno, considerando as temperaturas abaixo da temperatura externa, a maior diferença entre as médias de temperatura é de 4,4 °C para argila expandida e 3,42 °C para celulose, ambas às 17 horas. Para o mesmo período, considerando as temperaturas acima da temperatura externa, a maior diferença entre as médias de temperatura é de 4,94 °C para argila expandida e 3,77 °C para celulose, ambas às 8 horas.

Devido ao efeito convectivo, a tendência é que a temperatura do ar seja mais alta na região mais próxima ao teto. Conforme explicado na seção de material e métodos, o experimento foi dividido em três níveis de alturas onde foram instalados os sensores. Ao fazer a análise da variância das médias dos níveis, houve diferença significativa para 5% de probabilidade. Assim, a análise fatorial foi realizada separadamente em cada nível de altura (0,5 m, 1,0 m e 2,0 m).

Para o primeiro nível (0,5 m), não houve diferença significativa em nenhuma hora do dia entre os dois tratamentos (Tabela 1). As médias das temperaturas internas permaneceram próximas, independentemente do tipo de painel utilizado.

Tabela 1- Valores de médias das temperaturas para as horas do dia na data 27/10/2019 à 0,5 m do solo.

Motorial	Hora do dia (h)					
Material	8	10	12	14	16	
Celulose	31,47a	33,64a	33,62a	35,64a	35,00a	
Argila	32,64a	33,46a	33,63a	35,33a	34,57a	

Médias seguidas de mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente ao nível de 5%, pelo teste de F

Para o segundo nível (1,0 m), houve diferença significativa entre os painéis em todas as horas do dia (Tabela 2). A maior diferença ocorre às 14 horas, com gradiente de 6,08°C.

Tabela 2- Valores de médias das temperaturas para as horas do dia na data 27/10/2019 à 1,0 m do solo.

Material	Hora do dia (h)					
	8	10	12	14	16	
Celulose	33,26a	33,90a	34,03a	34,74a	36,42a	
Argila	36,63b	38,10b	38,61b	40,82b	38,02b	

Médias seguidas de mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente ao nível de 5%, pelo teste de F

Para o último nível (2,0 m), houve diferença significativa entre os painéis em algumas horas do dia (10, 12 e 14 horas). A maior diferença ocorreu às 12 horas, onde o gradiente foi de 4,48 °C.

Tabela 3- Valores de médias das temperaturas para as horas do dia na data 27/10/2019 à 2,0 m do solo.

Material	Hora do dia (h)				
Material	8	10	12	14	16
Celulose	34,74a	38,05a	37,85a	39,90a	40,94a
Argila	35,55a	40,72b	42,33b	42,78b	39,50a

Médias seguidas de mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente ao nível de 5%, pelo teste de Tukey.

Para gerar os gráficos de isotermas foi realizado uma interpolação polinomial cúbica entre os 18 pontos medidos nos níveis distribuídos (0,5 m, 1,0 m e 2,0 m), sendo possível estimar o comportamento da distribuição de temperatura.

As Figura 37, 38, 39, 40 e 41 demonstram as isotermas para o dia 27/10 e as respectivas horas analisadas (8, 10, 12, 14, 16 horas).

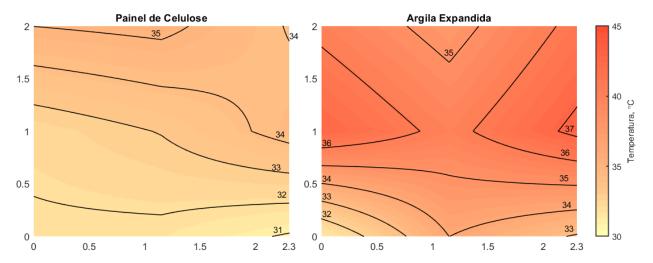


Figura 37 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 27/10/2019. Corte longitudinal às 8 horas.

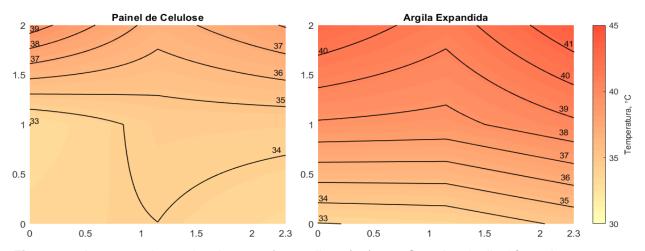


Figura 38 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 27/10/2019. Corte longitudinal às 10 horas.

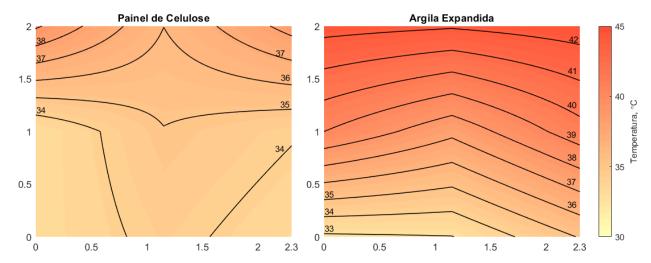


Figura 39 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 27/10/2019. Corte longitudinal às 12 horas.

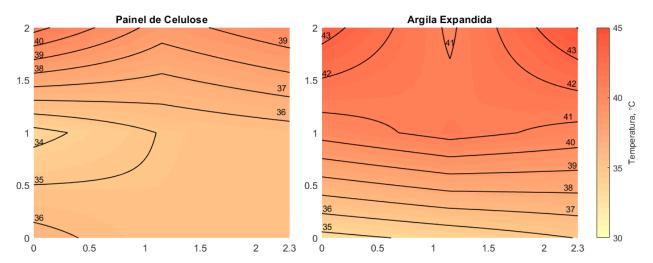


Figura 40 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 27/10/2019. Corte longitudinal às 14 horas.

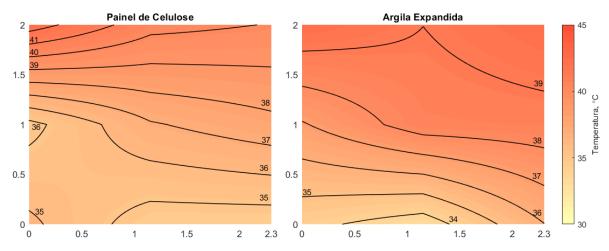


Figura 41 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 27/10/2019. Corte longitudinal às 16 horas.

Conforme a análise estatística, as maiores médias foram encontradas no período entre as 14 e 16 horas, nestes mesmos horários também foi encontrado os maiores valores de temperatura externa. Em todos os casos, é possível visualizar que os valores de temperaturas permaneceram mais altos na estufa com painel de argila expandida.

Os painéis estavam localizados entre a faixa de altura de 0,3 m e 0,9m. Podese observar que os pontos mais desfavoráveis com relação às temperaturas elevadas estão acima da região dos painéis. Acredita-se que o fluxo de ar promovido pelo exaustor eólico não foi suficiente para promover a sucção do ar quente presente nessas regiões da estufa, gerando assim, um aumento da temperatura.

Analisando as isotermas, também é possível visualizar que elas se distribuem em espaços menores e de forma mais uniforme na estufa com argila expandida do que o painel evaporativo de celulose. Isso ocorre devido ao fluxo de ar menor gerado na estufa com painel de argila expandida. No trabalho de Brasil (2004), é verificado que um ambiente de casa de vegetação onde o sistema de ventilação é prejudicado, as isotermas se comportam de forma similar.

A diferença do fluxo de ar é causada pela perda de carga na entrada da ventilação (painéis). Segundo o estudo de Vigoderis *et al* (2007) uma placa de celulose com as mesmas medidas utilizadas neste trabalho possui perda de carga de 4,9 Pa, já um painel com argila expandida pode ter valores de 74,18 à 169,30 Pa dependendo da espessura utilizada. O aumento dessa perda de carga é causado devido a heterogeneidade do material e sua distribuição dentro do suporte, ocasionando maior resistência ao fluxo do ar.

A Figura 42 expressa uma comparação entre a média de umidade interna nas duas estufas e a umidade externa nas diversas horas do dia. A umidade relativa interna permanece maior que a externa durante o dia inteiro como consequência do resfriamento evaporativo que se utiliza da evaporação de água para diminuir as temperaturas internas. Os maiores valores de umidade se encontram no período noturno. Isso ocorre porque a temperatura diminui ante a ausência de radiação solar e a atuação do fluxo de ar. Como o fornecimento de água ao sistema não é

retirado, o resfriamento faz com que a temperatura de bulbo seco interna fique próxima à de bulbo úmido interna, aumentando a umidade relativa interna.

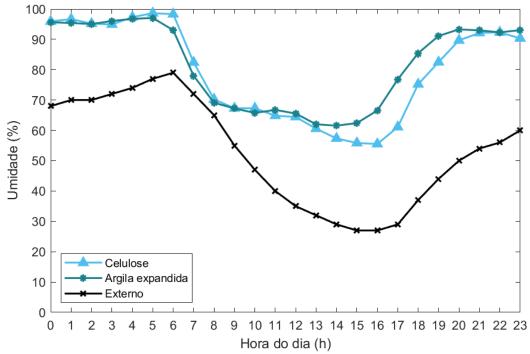


Figura 42 – Variação da umidade relativa média do ar interno das estufas com os dois tipos de painéis em relação à umidade do ar externa no dia 27/10/2019.

Os valores encontrados de umidade para o dia 27/10 são aceitáveis para alguns tipos de culturas, como o tomateiro, que, no período diurno, deve ser cultivado com umidade relativa do ar entre 50% e 70% (MAKISHIMA, CARRIJO e REIS, 1998). Entretanto, a faixa de umidade encontrada pode ser desvantajosa para outras culturas como a alface. Durante sua fase de desenvolvimento a alface pode ser cultivado entre 60 a 80% de UR, porém em algumas fases de seu ciclo há necessidade de valores de umidade do ar abaixo de 60%. (RADIN, *et al.*, 2004)

4.2.2. Avaliação dia 13/11/2019

Com um dos menores valores de saldo de radiação diário, Rn = 4,687 MJm⁻²dia⁻¹ esse dia foi caracterizado como dia nublado com pequenas pancadas de chuva. Estas condições foram as mais desfavoráveis à utilização do sistema evaporativo dentro do período estudado. Essa desvantagem ocorre devido à alta umidade relativa do ar, as temperaturas de bulbo úmido e de bulbo seco ficam

próximas, fazendo com que o déficit de pressão de vapor seja pequeno, ou seja, diminuindo a capacidade do ar de absorção de água.

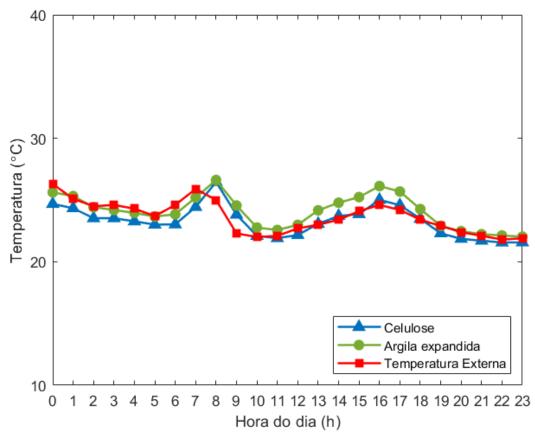


Figura 43 – Variação da temperatura média do ar interno às estufas com os dois tipos de painéis em relação à temperatura do ar externo no dia 13/11/2019

Conforme observa-se na Figura 43, quase não houve variação entre a temperatura externa e as médias de temperaturas internas em razão da baixa radiação solar incidente no dia,e que não promoveu gradiente térmico elevado.

Observando o período diurno, considerando as temperaturas abaixo da temperatura externa, a maior diferença entre as médias de temperatura foi de 0,5 °C para celulose, às 12 horas. Para o mesmo período, considerando as temperaturas acima da temperatura externa, a maior diferença entre as médias de temperatura foi de 1,62 °C para argila expandida e 1,46 °C para celulose, ambas às 8 horas.

Nesse dia (13/11/19), mesmo com o efeito convectivo, a variação de temperatura não foi tão elevada entre os níveis dos sensores, e ao realizar a análise da variância das médias dos níveis, não houve diferença significativa para

5% de probabilidade, portanto para a comparação foram utilizadas as médias de cada horário em todos os níveis.

Conforme apresentado na tabela 4, houve diferença significativa entre os painéis em algumas horas do dia (12 e 14). A maior diferença entre as médias ocorre às 12 horas, onde o gradiente apresentou 1,75 °C.

Tabela 4- Valores de médias das temperaturas para as horas do dia na data 13/11/2019.

Material	Hora do dia (h)					
Materiai	8	10	12	14	16	
Celulose	27,13b	22,01a	22,52a	24,49a	26,23a	
Argila	26,38a	22,61a	24,27b	26,15b	27,51b	

Médias seguidas de mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente ao nível de 5%, pelo teste de Tukey.

Observa-se nas Figuras 44, 45, 46, 47 e 48 as isotermas para o dia 13/11 e as respectivas horas analisadas (8, 10, 12, 14, 16 horas).

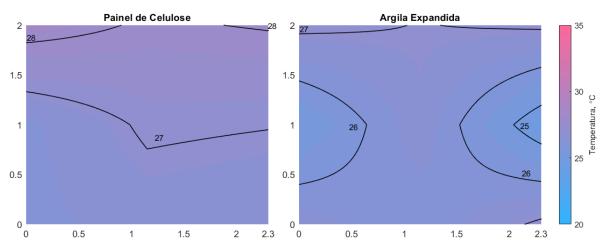


Figura 44 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 13/11/2019. Corte longitudinal às 8 horas.

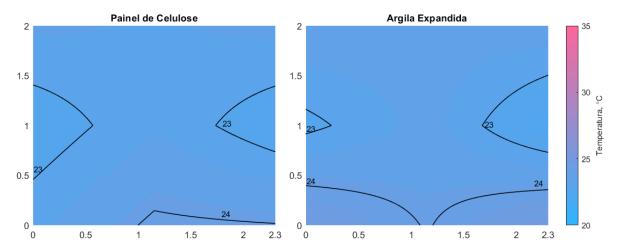


Figura 45 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 13/11/2019. Corte longitudinal às 10 horas.

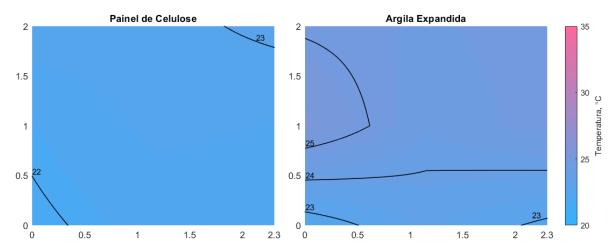


Figura 46 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 13/11/2019. Corte longitudinal às 12 horas.

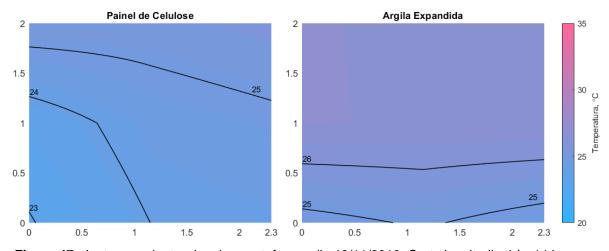


Figura 47 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 13/11/2019. Corte longitudinal às 14 horas.

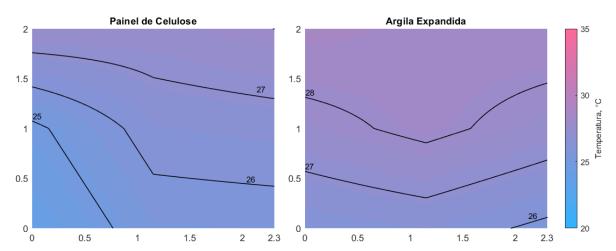


Figura 48 - Isotermas dentro das duas estufas no dia 13/11/2019. Corte longitudinal às 16 horas.

Diferentemente do comportamento observado no dia 27/11, as variações nas isotermas, em cada horário, foram pequenas. Não houve nenhum instante do dia 13/11/19 em que a diferença das temperaturas internas das estufas ultrapassasse de 3 graus.

Essa baixa variação de temperatura ocorreu como consequência da alta umidade externa e a baixa radiação durante o período. Com essas características externas, o ar já se encontra quase saturado, não sendo possível provocar o rebaixamento das temperaturas internas (BACA, TUR, *et al.*, 2011), conforme pode-se verificar na Figura 49.

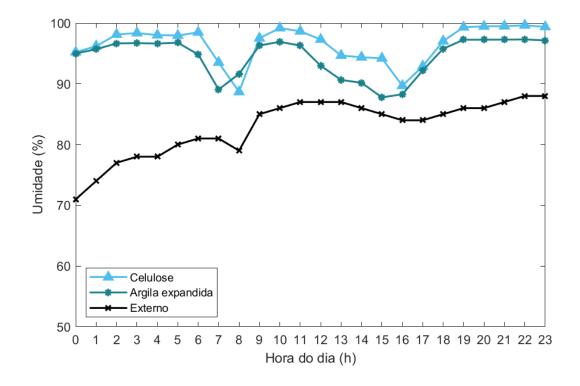


Figura 49 – Variação da umidade relativa média do ar interno das estufas com os dois tipos de painéis em relação à umidade do ar externa no dia 13/11/2019.

4.3. Eficiência evaporativa

Os painéis estavam localizados entre a faixa de altura de 0,3 m e 0,9m. Os pontos selecionados para o cálculo das eficiências foram os mais baixos e mais próximos aos painéis, desconsiderando os outros pontos mais afastados. Com esses dados foi possível estimar a eficiência do resfriamento dos painéis analisados em relação à capacidade máxima de rebaixamento de temperatura para as condições externas. Foi realizado teste de F a 5% de probabilidade para a comparação dos sistemas no dia 27/10 e 13/11/2019 (Tabela 5).

Tabela 5- Valores de médias das eficiências evaporativa.

Eficiência evaporativa (%)	27/10/19	13/11/19	
Argila	26,26b	6,59b	
Celulose	32,83a	23,32a	

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de 5%, pelo teste de Tukey.

Para condições de temperatura externa entre 22 a 39°C, conforme Silva (2002), a eficiência de um sistema evaporativo, quando bem dimensionado, deve estar em torno de 75%. Como os dois sistemas tiveram um rendimento médio diário abaixo do valor citado por Silva (2002) interpreta-se que os sistemas não foram totalmente explorados, ou seja, os exaustores eólicos deveriam ter operado com vazões mais altas para o correto funcionamento do sistema e isto está diretamente relacionado com a velocidade externa do vento local.

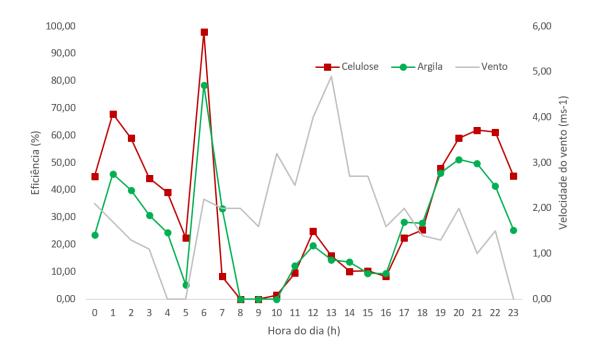


Figura 50 – Comparação eficiência evaporativa versus velocidade do vento no dia 27/10/2019.

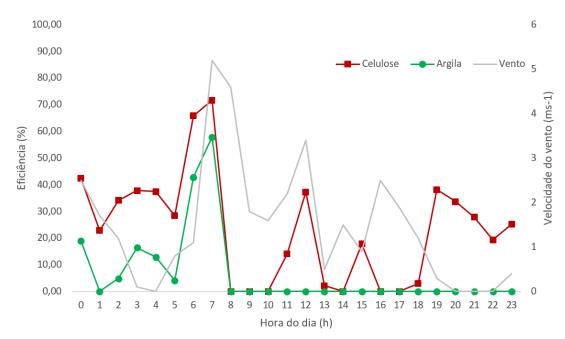


Figura 51 – Comparação eficiência evaporativa versus velocidade do vento no dia 13/11/2019.

Observa-se nas Figuras 50 e 51 que a velocidade do vento foi um fator determinante no resultado das eficiências. Na maioria dos horários observados, a eficiência evaporativa varia com a alteração da velocidade do vento, isso pode ser relacionado com o aumento da vazão mássica de entrada das estufas. Os trabalhos de Vigoderis *et al* (2007) e Rosa *et al* (2011) demonstram ensaios onde é possível observar o aumento da eficiência evaporativa relacionada com o

aumento da vazão mássica de ar de passagem pelos painéis. Os pontos onde a eficiência se aproxima de zero ocorrem, pois, as temperaturas internas se apresentaram maiores que a externas, gerando assim uma "eficiência negativa".

5. CONCLUSÕES

Os protótipos foram construídos conforme a metodologia demonstrada com o objetivo de inspecionar as condições internas das casas de vegetação, que utilizavam o resfriamento evaporativo em conjunto com o exaustor eólico como sistema de refrigeração.

Embora em alguns momentos as temperaturas internas medidas apontaram valores abaixo das externas, para as circunstâncias ensaiadas os protótipos se mostraram ineficientes sob as condições externas analisadas.

Foi identificado que as baixas eficiências de resfriamento apresentadas estavam relacionadas com a ausência de ventos no local e e período em em que o experimento foi conduzido, consequentemente proporcionando menor vazão dos exaustores eólicos.

O painel de celulose apresentou melhor eficiência de resfriamento em relação ao de argila expandida.

Necessita-se de outros trabalhos em cima dos protótipos a fim de avaliar se outras condições externas provocariam um aumento da eficiência do sistema. Os protótipos podem apresentar um melhor rendimento em estações de seca, onde a umidade relativa do ar externo atinge valores mais baixos e mais propícios ao resfriamento evaporativo.

Um sistema motor auxiliar instalado no eixo de rotação da exaustão juntamente com um sistema de controle de temperatura, podem ser proporcionar o aumento da vazão dos exaustores em momentos críticos do sistema, melhorando a eficiência de resfriamento e abaixando as temperaturas dos protótipos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 16032 - Estrutura de estufa e viveiro agrícola - Requisitos de projeto, construção, manutenção e restauração. 1ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASHRAE. **ASHRAE Handbook - Fundamentals**. [S.I.]: American Soceity of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, 2001.

BACA, I. M. et al. Evaporative cooling efficiency according to climate conditions. **Procedia Engineering**, v. 21, p. 283-290, 2011.

BELTRÃO, N. E. D. M.; FIDELES FILHO, J.; FIGUEIRÊDO, I. C. D. M. Uso adequado de casa-de-vegetação e de telados na experimentação agrícola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 547-552, 2002.

BLISKA JR, ; HONÓRIO, S. L. Cartilha Tecnológica de Plasticultura e Estufa. Campinas: Unicamp, 2000.

BOM, et al. Evaporative Air-Conditioning, Applications for Environmentally Friendly Cooling. **WORLD BANK TECHNICAL PAPER NO. 421 - Energy Series**, Washington, 421, Março 1999.

BRASIL, R. P. C. D. **UTILIZAÇÃO DE EXAUSTORES EÓLICOS NO CONTROLE DA TEMPERATURA E DA VENTILAÇÃO EM AMBIENTE PROTEGIDO**. Piracicaba: Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Esalq - USP, 2004.

BURIOL, G. A. et al. Transmissividade a radiação solar do polietileno de baixa densidade utilizado em estufas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, p. 1-4, 1995.

CASTILLA, N. **Invernaderos de plástico:** Tecnología y manejo. Madrid: Mundi-Prensa Libros, 2005.

CHANG, J. et al. Does growing vegetables in plasticgreenhouses enhance regional ecosystemservices beyond the food supply? **Frontiers in ecology and the environment**, Washington, v. 11, p. 43-49, Fevereiro 2013.

FARIAS, R. B. et al. EFEITO DA COBERTURA PLÁSTICA DE ESTUFA SOBRE A RADIAÇÃO SOLAR. **Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 31-36, 1993.

FINCH, D. A. et al. Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 122, p. 229-238, 2004.

FRANCO, A.; VALERA, D. L.; PEÑA, A. Energy Efficiency in Greenhouse Evaporative Cooling Techniques: Cooling Boxes versus Cellulose Pads. **energies**, v. 7, p. 1427-1447, Fevereiro 2014.

FUCHS, M.; DAYAN, E.; PRESNOV,. Evaporative cooling of a ventilated greenhouse rose crop. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 138, p. 203-215, 2006.

ICV. Estufas aumentam a produção e a renda de agricultores familiares em MT. **Instituto Centro de Vida**, 2019. Disponivel em: https://www.icv.org.br/2019/03/18/estufas-aumentam-a-producao-e-a-renda-de-agricultores-familiares-em-mt/. Acesso em: 25 Novembro 2019.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1990.

MAKISHIMA, N.; CARRIJO, O. A.; REIS, N. V. B. D. ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO. Circular Técnica da Embrapa Hortaliças, Brasília, v. 13, p. 20, Dezembro 1998.

MARIVENT. Exaustores Eólicos Marivent. **marivent**, 2019. Disponivel em: https://www.marivent.com.br/exaustores/exaustores-eolicos-marivent.html. Acesso em: 16 Novembro 2019.

MAULER JÚNIOR,. **SECAGEM UTILIZANDO EXAUSTOR EÓLICO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) UFFRRJ - Seropédica: [s.n.], 2004.

MAZOYER, ; ROUDART,. **História das agricultura no Mundo:** do neolítico à crise contemporânea. São Paulo: Ed. UNESP, 2010.

MIRANDA, et al. **Apostila - LCE-200 Física do Ambiente Agrícola**. Piracicaba: [s.n.], 2015.

MITCHELL, J. W.; BRAUN, J. E. Princípios de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar em edificações. 1ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

MORAN, M. J. et al. **Introdução Á Engenharia de Sistemas Térmicos:** Termodinâmica, Mecânica dos Fluídos e Transferência de Calor. 1ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

OLIVEIRA, M. R. V. D. O emprego de casas de vegetação no Brasil: Vantagens e desvantagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 8, p. 1049-1060, Agosto 1995.

PEREIRA, R.; ANGELOCCI, ; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. Piracicaba: Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2007.

RADIN, B. et al. Crescimento de cultivares de alface conduzidas em estufa e a campo. **Horticultura Brasileira**, BrasÌlia, v. 22, n. 2, p. 178-181, abril-junho 2004.

REIS, N. V. B. D. Construção de estufas para produção de hortaliças nas Regiões Note, Nordeste e Centro-Oeste. **Circular Técnica - Embrapa Hortaliças**, Brasília, v. 38, p. 1-16, Dezembro 2005.

ROSA, F. V. et al. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE RESFRIAMENTO DE PAINÉIS POROSOS PREENCHIDOS COM ARGILA EXPANDIDA EM COMPARAÇÃO AOS DE CELULOSE USANDO TÚNEL DE VENTO. **Engenharia na agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 6, p. 516-523, Nov/Dez 2011.

SILVA, C. E. D. Comparação de painéis evaporativos de argila expandida e celulose para sistema de resfriamento adiabático do ar em galpões avícolas com pressão negativa em modo túnel. Viçosa: (Dissertação de Mestrado), 2002.

SILVA, J. D. S. E. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2ª. ed. Viçosa: [s.n.], 2008.

STEIDLE NETO, A. J.; ZOLNIER, S. Desempenho de um sistema de resfriamento evaporativo do ar em casa-de-vegetação. **IRRIGA (UNESP. CD-ROM)**, Botucatu, v. 15, n. 2, p. p140-150, abril-junho 2010.

STROBEL, ; STOWELL, R.; SHORT,. Evaporative Cooling Pads: Use in Lowering Indoor Air Temperature. **Food, Agricultural and Biological Engineering**, Columbus, p. 99-127, 1999.

TETENS, O. Über einige meteorologische Begriffe. **Zeitschrift Geophysic**, Würzburg, v. 6, p. 297-309, 1930.

TINÔCO, I. F. F. et al. Avaliação de materiais alternativos utilizados na confecção de placas porosas para sistemas de resfriamento adiabático evaporativo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 147-150, 2002.

VECCHIA, P. T. D.; KOCH, P. S. História e perspectivas da produção de hortaliças em ambiente protegido no Brasil. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 20, n. 200/201, p. 5-10, set/dez 1999.

VIGODERIS, R. B. et al. CONSTRUÇÃO DE TÚNEL DE VENTO REDUZIDO, VISANDO A AVALIAÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO ADIABÁTICO EVAPORATIVO PARA ARREFECIMENTO TÉRMICO EM GALPÕES DE PRODUÇÃO ANIMAL. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 15, n. 3, p. 191-199, Jul/Set 2007.

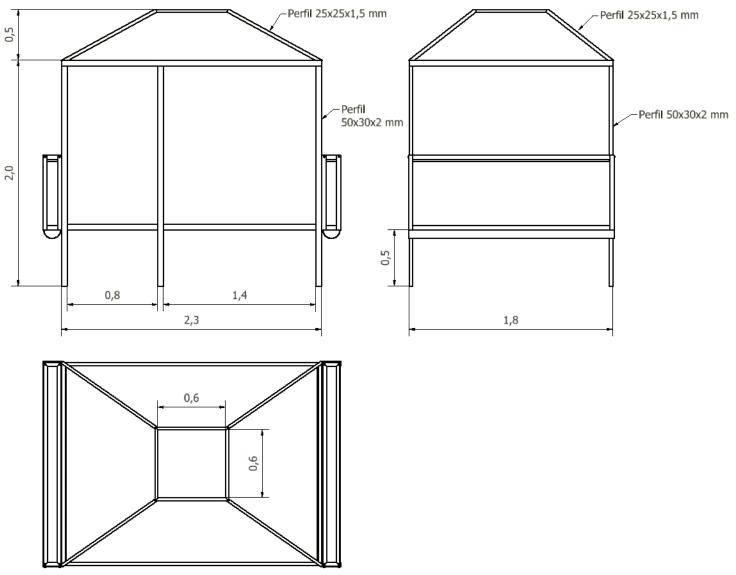


Figura 52 – Vistas ortogonais da estrutura das estufas. Medidas em m.

Tabela 6- Gastos com a confecção das estufas.

l abela 6- Gastos com a confecção das estufas.						
Descrição	Unidade	Qtd	Preço Unitário	Preço Total		
Estrutura						
Tubo Retangular Metalon 50X30x2 mm	Barra	11	R\$ 85,30	R\$ 938,30		
Tubo Quadrado 25x25x1,5 mm	Barra	9	R\$ 40,35	R\$ 363,15		
Filme Plástico Para Estufa - Agrícola - 4m X 20m -						
150 Micra	Rolo	1	R\$ 340,00	R\$ 340,00		
Tinta Fundo 3,6 L - Zarcão	Unidade	1	R\$ 55,80	R\$ 55,80		
Tinta Branco Brilhoso 3,6 L	Unidade	1	R\$ 82,90	R\$ 82,90		
Exaustor Eólico	Unidade	2	R\$ 250,00	R\$ 500,00		
Cantoneira 19,05 x 3,17 mm	Barra	6	R\$ 45,00	R\$ 270,00		
Tela artística 25,4 mm	Unidade	1	R\$ 1.300,00	R\$ 1.300,00		
Materiais diversos (parafusos)	Diversos	1	R\$ 100,00	R\$ 100,00		
Materiais diversos (solda)	Diversos	1	R\$ 100,00	R\$ 100,00		
Materiais diversos de pintura	Diversos	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00		
Sistema de Circulação de água						
Tubos PVC - Água fria - 25 mm	Barra	6	R\$ 12,45	R\$ 74,70		
Tubos PVC - Água fria - 250 mm	Barra	1	R\$ 299,00	R\$ 299,00		
Conexões e materiais diversos	Diversos	1	R\$ 80,00	R\$ 80,00		
Eletrobomba de drenagem	Unidade	2	R\$ 45,00	R\$ 90,00		
Caixa d'água 300 L	Unidade	2	R\$ 137,00	R\$ 274,00		
Caixa d'água 5000 L	Unidade	1	R\$ 1.700,00	R\$ 1.700,00		
Sistema de Aquisição de dados						
Arduino Uno R3	Unidade	2	R\$ 39,00	R\$ 78,00		
Fonte 19V - 1A	Unidade	2	R\$ 25,50	R\$ 51,00		
Materiais diversos (componentes eletrônicos)	Diversos	1	R\$ 50,00	R\$ 50,00		
Sensor ds18b20 encapsulado com resistência à			, ,			
água - 1m	Unidade	36	R\$ 12,00	R\$ 432,00		
Régua de alumínio 50x25x3000 mm - c/ divisão	Unidade	3	R\$ 38,00	R\$ 114,00		
Tubete de acrílico 13cm	Unidade	80	R\$ 0,50	R\$ 40,00		
Cadarço de algodão	metro	2	R\$ 1,20	R\$ 2,40		
Total (sem sistema de dados)						
Total	Total					