



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE BOM JESUS DA LAPA
ENGENHARIA MECÂNICA**

NIELZA DE AZEVEDO MATOS BRITO

**APLICAÇÃO DA BUCHA VEGETAL (*LUFFAAEGYPTIACA*) PARA COLMEIA DE
RESFRIAMENTO EVAPORATIVO NA CIDADE DE BOM JESUS DA LAPA - BA**

BOM JESUS DA LAPA

2022

NIELZA DE AZEVEDO MATOS BRITO

**APLICAÇÃO DA BUCHA VEGETAL (*LUFFAAEGYPTIACA*) PARA COLMEIA DE
RESFRIAMENTO EVAPORATIVO NA CIDADE DE BOM JESUS DA LAPA - BA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ ISSAO SATO

COORIENTADOR: PROF. ME. ANDERSON BRENO SOUZA

BOM JESUS DA LAPA

2022

NIELZA DE AZEVEDO MATOS BRITO

**APLICAÇÃO DA BUCHA VEGETAL (*LUFFAAEGYPTIACA*) PARA COLMEIA DE
RESFRIAMENTO EVAPORATIVO NA CIDADE DE BOM JESUS DA LAPA - BA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

Bom Jesus da Lapa, 07 de julho de 2022.

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou este Trabalho:

Prof. Dr. André Issao Sato, Presidente
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Prof. Me. Anderson Breno Souza
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Prof. Me. Lucas Aninger de Barros Rocha
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Prof. Dr. Tony Silva Almeida
Universidade Federal do Oeste da Bahia

FICHA CATALOGRÁFICA

B862

Brito, Nielza de Azevedo Matos

Aplicação da Bucha Vegetal (*LUFFA AEGYPTIACA*) para colmeia de resfriamento evaporativo na cidade de Bom Jesus da Lapa - BA. / Nielza de Azevedo Matos Brito. – 2022.

53f.: il.

Orientador: Prof. Dr. André Issao Sato

Coorientador: Prof. Me. Anderson Breno Souza

TCC - Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA, 2022.

1. Termodinâmica. I. Sato, André Issao. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 536.7

Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB

RESUMO

BRITO, Nielza de Azevedo Matos. **APLICAÇÃO DA BUCHA VEGETAL (*LUFFAAEGYPTIACA*) PARA COLMEIA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO NA CIDADE DE BOM JESUS DA LAPA - BA.** 2020. 52 p. TCC – Universidade Federal do Oeste da Bahia, Bom Jesus da Lapa, 07/07/2022.

O resfriamento ambiental possui grande relevância, na medida em que, locais com desconforto térmico podem gerar alterações físicas e psicológicas nos indivíduos, provocando inclusive situações prejudiciais à saúde. O resfriamento evaporativo, como possível aplicação nestes processos, é um método para climatização ambiental, de forma passiva, cujo processo físico se baseia na evaporação da água, retirando calor do ambiente ou do material sobre o qual a evaporação acontece. O material da matriz evaporativa, em sistemas de resfriamento evaporativo comerciais, consiste em uma importante área de interesse e seu estudo é essencial quando observado o alto custo das placas comerciais de celulose combinado aos possíveis danos ambientais. Com base no estudo de materiais alternativos, objetivou-se a aplicação e avaliação da bucha vegetal em um sistema de climatização comercial, através da observação e análise da temperatura, umidade relativa e vazão do fluxo de ar. Este trabalho destacou-se, primeiramente, pela aplicação regional – no oeste baiano - visto que a região é caracterizada pela alta temperatura ambiente e baixa umidade do ar ao longo do ano. Após a análise dos dados e gráficos gerados nesse trabalho foram obtidos resultados satisfatórios para a aplicação da bucha vegetal. Os resultados indicaram, variações de temperaturas do ar de 20% (para a bucha alinhada) e 40% (para a bucha cruzada) abaixo da variação obtida pela placa de celulose, com uma média de efetividade de aproximadamente 0,34, 0,32, 0,58 e com máximos de 0,54, 0,52 e 0,70, para placas de buchas alinhadas, cruzadas e celulose, respectivamente. Quanto à vazão de ar no sistema a redução foi de 7,3% da vazão nas buchas alinhadas e 5,1% nas buchas cruzadas quando comparadas com a celulose.

Palavras-chave: Colmeia evaporativa. Materiais alternativos. Resfriamento evaporativo.

ABSTRACT

Environmental cooling has great relevance, insofar as places with thermal discomfort can generate physical and psychological changes in individuals, even causing situations that are harmful to health. Evaporative cooling, as a possible application in these processes, is a passive method for air conditioning, whose physical process is based on the evaporation of water, removing heat from the environment or from the material on which evaporation takes place. Evaporative matrix material in commercial evaporative cooling systems is an important area of interest and its study is essential when considering the high cost of commercial cellulose boards combined with possible environmental damage. Based on the study of alternative materials, the objective was the application and evaluation of the vegetable loofah in a commercial air conditioning system, through the observation and analysis of temperature, relative humidity and airflow flow. This work stood out, firstly, for its regional application - in the west of Bahia - since the region is characterized by high ambient temperature and low air humidity throughout the year. After analyzing the data and graphs generated in this work, satisfactory results were obtained for the application of the vegetable loofah, mainly for the loofahs arranged in an aligned manner. The results indicated air temperature variations of 20% (for the aligned bushing) and 40% (for the cross bushing) below the variation obtained by the cellulose board, with an average effectiveness of approximately 0.34, 0.32, 0.58 and with maximums of 0.54, 0.52 and 0.70, for aligned, cross and cellulose bushing plates, respectively. As for the air flow in the system, the reduction was 7.3% of the flow in the aligned bushings and 5.1% in the crossed bushings when compared to the cellulose.

Keywords: Alternative materials. Evaporative cooling. Evaporative hive.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa Climático do Brasil.....	12
Figura 2 - Resfriado Evaporativo Direto.....	19
Figura 3 - Painel evaporativo de celulose tipo colmeia	20
Figura 4 - Bucha Vegetal	21
Figura 5 - Argila Expandida.....	21
Figura 6 – Disposição das buchas: a) buchas cruzadas; b) buchas alinhadas.	25
Figura 7 - Dimensões da estrutura para as buchas alinhadas.	26
Figura 8 - Vistas: a) lateral interna do sistema; b) lateral com vedação; c) suporte para colmeia.	26
Figura 9 - Esquema do circuito utilizado para obtenção dos dados.....	27
Figura 10 – Circuito real utilizado para obtenção dos dados	27
Figura 11 – Locais de fixação dos sensores de umidade e temperatura: Vista posterior.....	29
Figura 12 – Locais de fixação dos sensores de umidade e temperatura: Vista Frontal.	29
Figura 13 – Abordagem adotada para medição da vazão. a) Subdivisão de áreas e b) áreas desconsideradas.	30
Figura 14 – Vista frontal da saída de ar e seções para cálculo da vazão.	31
Figura 15– a) Gráfico da variação de temperatura do ar na saída e para diferentes materiais; b) Gráfico com barras de erro para medições de temperatura para cada material.....	34
Figura 16- a) Gráfico da variação da umidade relativa do ar na saída e para diferentes materiais; b) Gráfico com barras de erro para medições de umidade para cada material.....	36
Figura 17 – Temperatura ambiente e da água para a colmeia de celulose.....	37
Figura 18 – Temperatura ambiente e da água para a colmeia de bucha alinhada	37

Figura 19 - Temperatura ambiente e da água para a colmeia de bucha cruzada.....	38
Figura 20 – Valores médios de Efetividade	39
Figura 21 – Valores máximos de efetividade.....	39
Figura 22- Carta Psicrométrica.....	48
Figura 23 - Guia de Leitura da Carta Psicrométrica	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Especificações do Climatizados comercial utilizado.....	25
Tabela 2 – Especificações Modelo: DHT22 (Datasheet).....	27
Tabela 3 – Especificações Modelo: DS18B20 (Dallas).....	28
Tabela 4 – Especificações Termo-anemômetro digital (TAN 050).....	28
Tabela 5- Variação total da temperatura do ar	35
Tabela 6- Variação da umidade relativa do ar no final do experimento.	37
Tabela 7- Vazão total do sistema para os diferentes materiais.....	38
Tabela 8– Propriedades do ar úmido	47

LISTA DE SÍMBOLOS

$Q_{seção}$	Vazão da seção	[m ³ /s]
V_i	Velocidade de subdivisão	[m/s]
A_i	Área de subdivisão	[m ²]
$V_{média}$	Velocidade média	[m/s]
ε_d	Efetividade	-
TBS_e	Temperatura de bulbo seco na entrada do equipamento	°C
TBS_s	Temperatura de bulbo Seco na saída do equipamento	°C
TBU_e	Temperatura de bulbo úmido na entrada do equipamento	°C
UR%	Umidade relativa do ar na entrada do equipamento	%

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	Homeotermia e termorregulação	14
2.2	Conforto Térmico	15
2.3	Resfriamento Evaporativo.....	15
2.3.1	Princípios do resfriamento evaporativo	18
2.3.2	Técnicas de Resfriamento evaporativo	18
2.4	Materiais da Matriz evaporativa	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1	CLIMATIZADOR E COLMEIA EVAPORATIVA.....	25
3.2	COLETA DE DADOS COM ARDUINO®	26
3.3	MEDIÇÃO DE VAZÃO E ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO	29
3.4	ANÁLISE DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	42
	APÊNDICE A – ESTUDO BIBLIOMÉTRICO	46
	APÊNDICE B – ESTUDO PSICROMÉTRICO	47
	APÊNDICE C – CÓDIGO DO ARDUINO PARA COLETA DOS DADOS.....	49
	APÊNDICE D– DADOS DE TEMPERATURA, UMIDADE, EFETIVIDADE E ERROS RELATIVOS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Comumente em regiões de clima quente e seco, utilizam-se técnicas espontâneas de emprego de jarros cerâmicos com água ou toalhas molhadas nas janelas residenciais com a tentativa de se amenizar o calor em ambientes internos e segundo Oliveira (2011), essas técnicas utilizadas, são processos de resfriamento evaporativo que vem sendo observadas com frequência na natureza desde a antiguidade. Para essas regiões que apresentam aspectos climáticos e econômicos favoráveis, a utilização de sistemas de resfriamento evaporativo se justifica como uma solução possível e ecológica para o conforto térmico.

Segundo Ruas (1999), define-se como conforto térmico a sensação de bem-estar sentida por uma pessoa em um determinado espaço, tendo em vista parâmetros como temperatura média do ar, umidade relativa, bem como a velocidade do ar, combinados às atividades desenvolvidas naquele ambiente. Uma vez que a medida do conforto térmico se trata de uma análise subjetiva, as condições que propiciam a sensação de bem-estar para o maior número possível de pessoas devem ser consideradas.

A busca pelo conforto térmico por diversas vezes remete a soluções constantemente adotadas como o uso de condicionadores de ar por compressão, porém considerando-se o consumo energético exacerbado desse sistema bem como da grande dificuldade da gerência da qualidade do ar em ambientes, torna-se de grande relevância os estudos relacionados às técnicas alternativas de sistemas de resfriamento e ventilação de ambientes.

Cabe destacar que o processo de ventilação deve ser acompanhado da redução na temperatura ambiente a qual adentra o recinto estudado. Assim, a avaliação do processo de resfriamento evaporativo deve garantir que o sistema tenha capacidade de oferecer o conforto térmico adequado para o ambiente ventilado. Neste caso, é necessário avaliar questões associadas à temperatura do ar após o sistema de resfriamento evaporativo e a umidade relativa do ar, sendo estas variáveis suscetíveis aos efeitos ambientais e do material da matriz evaporativa.

A análise de temperatura e umidade fornecida pelo sistema de resfriamento evaporativo contribuem para minimizar os riscos da conhecida Síndrome do Edifício Doente (SED). Teixeira *et al.* (2005), trata da SED como a origem de problemas de saúde causada a trabalhadores em locais com sistemas de ar-condicionado central, uma vez que nesses ambientes existe menor renovação do ar em comparação aos sistemas de resfriamento evaporativo, no qual se torna desagradável devido ao acúmulo de poluentes que são gerados. Nesse quesito o sistema compreendido nesse estudo tem sua aplicação justificada devido ao

bem-estar relacionado a renovação de ar ambiente evitando assim a disseminação de doenças respiratórias em ambientes.

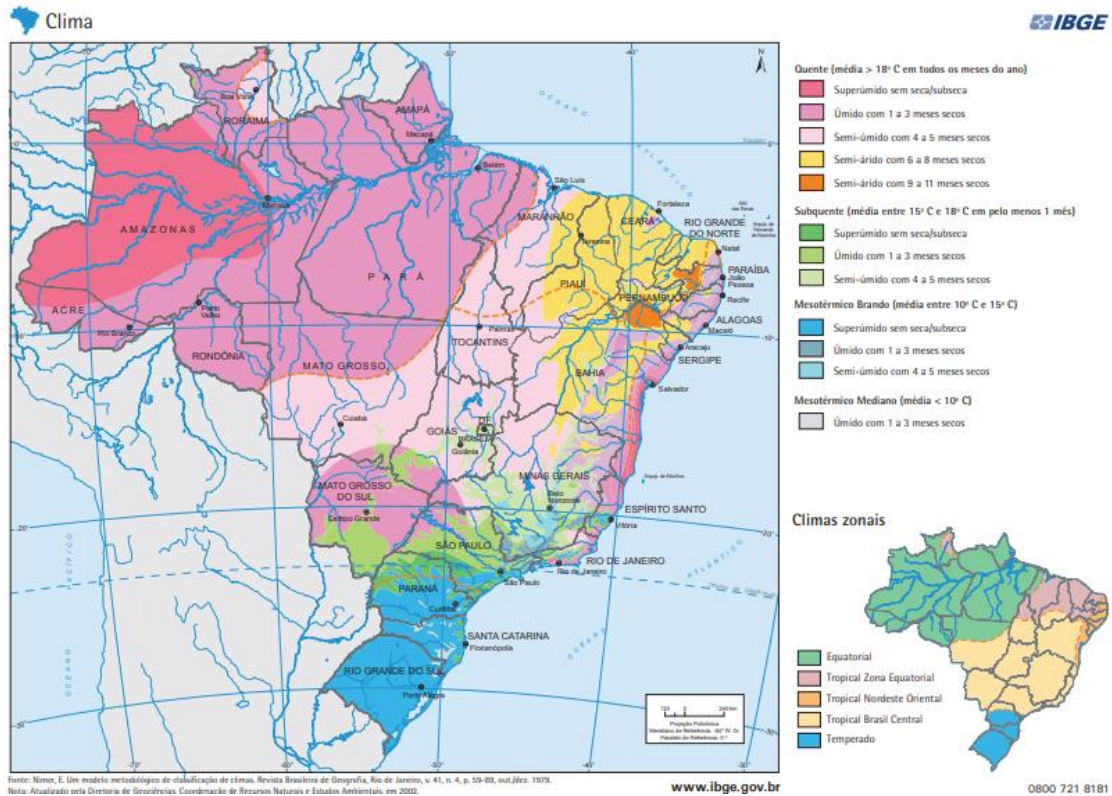
Oliveira (2011) apresenta que, além da sensação de bem-estar, existem benefícios como uma redução considerável de ruído com a utilização de climatizadores, uma vez que este não apresenta componentes com ruídos excessivos como compressores de vapor. Deve-se levar em conta também os aspectos de análise do impacto ambiental e florestal. Sabe-se que climatizadores evaporativos não utilizam gases refrigerantes orgânicos, como os encontrados em condicionadores de ar convencionais e podem apresentar sérios danos ao meio ambiente quando em contato com ele e mesmo aqueles que tem baixo poder de interferência na camada de ozônio, ainda são componentes que são temas relevantes e preocupantes em discussões mundiais por acarretarem contribuições ao efeito estufa. Do ponto de vista ambiental tem-se ainda a importância da utilização de materiais alternativos e biodegradáveis e o consumo de energia crescendo de maneira mais controlada, diminuindo os impactos ambientais de novas fontes de energia elétrica.

Aspectos econômicos também influenciam na utilização de sistemas de resfriamento evaporativo. Oliveira (2011) destaca custos de instalação e manutenção bem como fatores que levam a economia de energia elétrica. Esse último ponto deve ser considerado, uma vez que, o consumo de energia elétrica de um climatizador evaporativo é referente ao motor do ventilador e a bomba que realiza a recirculação da água. Tais componentes apresentam um consumo que chegam a 90% de economia quando comparados a um condicionador de ar convencional.

Com a análise no mapa formatado pelo IBGE (2020) e apresentado na Figura 1 a seguir, o Brasil apresenta condições favoráveis para a utilização de resfriamento evaporativo uma vez que constam em seu território regiões com média anual de temperatura maior que 18°C., com grande destaque para regiões como norte e nordeste.

Trata-se de regiões compreendidas pelo semiárido e semiúmido brasileiro. Regiões essas que oferecem aspectos favoráveis quanto a condições climáticas e socioeconômicas para o desenvolvimento e aplicação de tecnologias referentes ao uso de resfriamento evaporativo. Camargo (2003) enfatiza que a principal característica dos sistemas de resfriamento evaporativo é a sua capacidade de maior eficiência em temperaturas mais elevadas, exatamente quando há a necessidade de resfriamento visando o conforto térmico humano.

Figura 1 – Mapa Climático do Brasil



Fonte: IBGE, (2020).

As características estudadas no processo de resfriamento evaporativo são de interesse regional, ao observar a variação de temperaturas e umidade na região Oeste da Bahia, em especial em Bom Jesus da Lapa. Verifica-se uma média de altas temperaturas e baixa umidade ao longo do ano. Observa-se que as temperaturas máximas presentes em Bom Jesus da Lapa são superiores a 30 °C, enquanto a precipitação é concentrada em um curto espaço de dias do mês (menos de 11 dias na média mensal). (INMET, 2021)

Por sua vez, o material utilizado na construção da matriz evaporativa consiste em uma análise essencial nos estudos de resfriamento evaporativo, influenciando diretamente o processo de resfriamento evaporativo e, em alguns casos, aspectos construtivos do sistema. Possíveis materiais de interesse local consistem na argila expandida, na casca de árvore, nas espumas poliméricas e nas fibras vegetais (especificamente da bucha vegetal). Este último material tem interesse recente na utilização em diversas aplicações de engenharia, conforme apresentado por Motta *et al.* (2016), como o uso dessa fibra incorporada no concreto de construção civil e apontado como material de alta capacidade de absorção de líquido.

Para Pereira (2017), o valor ainda considerável para a aquisição de placas de celulose para sistemas de climatização justifica estudos de materiais alternativos que sejam capazes de

substituir os sistemas convencionais. Além disso, Oliveira (2011) destaca que a utilização de painéis de celulose pode acarretar sérios danos ambientais, quando os mesmos são fabricados de matéria proveniente de árvores que não sejam de reflorestamento ou que exijam a derrubada de áreas nativas para novos campos de cultivo.

Dessa forma, nota-se a necessidade de maior pesquisa quanto às aplicações de resfriamento evaporativo em climatização de ambientes, especialmente aplicado na região do oeste baiano, com o uso da bucha vegetal como material alternativo à placa de celulose. Sendo assim, a presente pesquisa teve como objetivo geral a análise comparativa de matérias para placa evaporativa em um sistema comercial de climatização, aplicado em Bom Jesus da Lapa – BA. Constituem objetivos específicos: construção de placas evaporativas de bucha vegetal (*luffa aegyptica*), coleta de dados de temperatura, umidade relativa e vazão do ar no sistema, e redução dos dados experimentais e análise de efetividade para comparação dos valores.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, serão apresentados conceitos de conforto térmico e seus fatores de influência, bem como o conceito de resfriamento evaporativo, suas aplicações e, por fim, sobre materiais alternativos para sistemas de climatização. Trabalho prévio de análise bibliométrica foi feito e pode ser visualizado no APÊNDICE A.

2.1 HOMEOTERMIA E TERMORREGULAÇÃO

Segundo Frota e Schiffer (2003), o ser humano é um animal homeotérmico, que mantém a sua temperatura interna constante através de mecanismos de termorregulação, que são mecanismos fisiológicos do corpo que produzem ou perdem calor para o meio externo. Essa temperatura se mantém em aproximadamente 36,7°C, com limites restritos que variam entre 36,1°C e 37,2°C.

A termorregulação é tratada por Ruas e Labaki (2002) como um sistema dinâmico capaz de interagir com o ambiente com o objetivo de se manter o balanço térmico. Existe constantemente uma troca de calor entre o corpo e o meio explicada por leis da física diferenciando-se por mecanismos de adaptação fisiológica, condições impostas pelo meio e fatores subjetivos de cada indivíduo. O objetivo de impedir que ocorram variações consideráveis na temperatura interna do corpo garante que os sistemas presentes no organismo operem de forma adequada, conforme afirmado por Pagnossin *et al.*, (2001), destacando que a ineficiência dos termorreguladores acarreta em danos à saúde do indivíduo.

Ruas e Labaki (2002) destacam as respostas iniciais do corpo humano a situações consideradas desfavoráveis no que se refere ao seu equilíbrio térmico. Em situações em que o indivíduo se encontra em ambientes quentes, a resposta imediata do organismo como meio de termorregulação é a sudorese. Este é um mecanismo fundamental para que seja intensificada a perda de calor para o meio externo. Em ambientes considerados frios, o tremor muscular como forma de resposta, é responsável pelo aumento da produção da temperatura corporal. Os dois processos são denominados por Frota e Schiffer (2003) como termogênese – processo metabólico onde o corpo queima calorias para produzir calor – e termólise – processo de perda de calor interno – ambos através do sistema glandular endócrino.

Fontanella (2009) complementa que a pele é o principal órgão termorregulador do organismo, afinal, através dela ocorrem as trocas de calor. Ao primeiro sinal de desequilíbrio, o primeiro mecanismo fisiológico ativado é a regulação vasomotora do fluxo sanguíneo da

camada subcutânea. Por meio da vasodilatação, reduz-se ou aumenta-se a resistência térmica dessa camada. Sem deixar de citar as trocas caloríficas apresentadas por Frota e Schiffer (2003), que são trocas por radiação entre a pele e um corpo qualquer. Essas trocas são essenciais uma vez que a pele humana apresenta boas características de absorção e emissão.

2.2 CONFORTO TÉRMICO

A norma ISO 7730 (1984) define o conforto térmico como uma condição da mente (subjetiva) que evidencia satisfação com o ambiente térmico, indicando a possibilidade de aquecimento ou resfriamento do ambiente para que tal condição seja atingida.

Relacionando aos conceitos anteriores, Ruas (1999) concluiu que conforto e equilíbrio térmico de um corpo relacionam-se mediante que, as condições de bem estar térmico tem dependência direta com o nível de resposta do sistema termorregulador para o estabelecimento do equilíbrio. Quanto maior o esforço desse sistema para a manutenção da temperatura interna do corpo, mais desconforto será sentido pelo indivíduo.

No início dos estudos quanto ao conforto térmico, autores como Fanger (1970) comumente indicavam que o bem-estar térmico era alcançado a partir de uma determinada faixa de temperatura média da pele, associada a evapotranspiração. Por outro lado, autores como Silva *et al.* (2019), Souza e Nery (2012), Fontanella (2009) e Roriz (2003) afirmam que o conforto térmico é dependente da combinação de diversos fatores e não limitada às variáveis físicas antes estudadas. Além dos fatores internos, dependeria também de fatores ambientais, parâmetros subjetivos como idade, sexo, estado de saúde e um fator apontado como de grande importância que é a adaptação fisiológica ao clima local.

2.3 RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

De acordo com Camargo (2009 apud Fonseca e Lambert, 2012), a procura pelo resfriamento ambiente e condições confortáveis de temperatura são datadas desde a pré-história da humanidade, e os efeitos do resfriamento evaporativo aplicados nestas situações acompanham este período. No antigo Egito, foram registrados por volta de 2500 a.C. desenhos de escravos fazendo uso de jarros para o resfriamento dos cômodos da realeza, bem como potes de barro porosos cheios de água com o objetivo de se alcançar temperaturas internas mais agradáveis.

Fonseca e Lambert (2012) também destacam o primeiro mecanismo de resfriamento evaporativo já registrado pela história, que foi construído por Leonardo da Vinci (1452-1519). Trata-se de um sistema composto por uma roda d'água oca, na qual localizava-se em meio a uma passagem de ar, que acabava direcionando o ar resfriado através do efeito da evaporação da água no ar em movimento. Nos séculos XVIII e XIX, o conhecimento científico associado ao resfriamento evaporativo foi construído por meio dos trabalhos de estudiosos como Bernoulli, Pitot, Euler, Chezy dentre outros, que desenvolveram a fluidodinâmica, e outros cientistas que colaboraram para o desenvolvimento da psicrometria, consolidada pelas cartas psicrométricas de William Carrier (1876-1950).

Watt (1963 apud Fonseca e Lambert, 2012) realizou a primeira análise feita rigorosamente em sistemas evaporativos direto e indireto, enumerando suas vantagens e desvantagens, bem como demonstrando suas aplicações e levantando considerações de projeto e pode-se dizer que, de certa forma, foi através de seus trabalhos que a refrigeração evaporativa começou a ser explorada cientificamente. Mais adiante, Watt e Brown (1997 apud Fonseca e Lambert, 2012) relacionaram as diversas aplicações dos sistemas evaporativos da indústria, comércio e residências, abordando seu desempenho descritos em cartas psicrométricas. Tendo como alvo sistemas de múltiplos estágios e a gama de materiais construtivos das colmeias evaporativas.

Camargo (2000) realizou estudos de caracterização do clima brasileiro, onde foram identificadas regiões que apresentam condições para uma maior eficiência de sistemas de climatização evaporativa visando o conforto humano. Nessa avaliação empregou o método denominado “Índice de Desempenho (ID) do resfriamento evaporativo” gerando uma tabela contendo diversas localidades onde o emprego desse tipo de sistema pode ser analisado por esse indicador.

Em um trabalho subsequente, Camargo (2003) desenvolveu um sistema de resfriamento evaporativo adsorptivo, no qual investiga o potencial de sua utilização, bem como suas possíveis restrições levando em conta o conforto térmico e conservação de energia. Através dele, pôde-se ensaiar um sistema de resfriamento evaporativo direto e com isso propôs um novo conjunto adsorptivo que viesse a suprir demandas onde o declínio do bulbo úmido não fosse significativo.

Masiero (2006) propõe uma comparação entre um sistema de resfriamento evaporativo e o sistema de ar-condicionado com relação ao índice de umidificação, redução da temperatura interna e do consumo energético. Que apresentou resultados satisfatórios favoráveis a utilização das técnicas de resfriamento evaporativo como uma alternativa para a melhoria das condições térmicas de espaços de permanência humana com consumo inferior de

energia. Nesse mesmo ano Lopes *et al.* (2006) reafirmaram a viabilidade econômica e aceitação popular da implantação de sistemas de climatizadores evaporativos, indicando as boas condições de conforto térmico e redução de impactos ambientais nocivos.

Carossi e Mendoza (2006) desenvolveram um estudo do potencial de aplicação desses sistemas no Brasil, isso devido a sua crescente utilização. Esse estudo foi realizado através de mapas climáticos e modelos matemáticos, sendo capazes de regionalizar cada estado do país e indicar os meses do ano mais suscetíveis a proporcionar condições climáticas dentro de parâmetros confortáveis através do uso de climatizadores evaporativos.

Bastos (2011) analisou o impacto no consumo energético de uma edificação climatizada utilizando um sistema de resfriamento evaporativo indireto anterior a um sistema de resfriamento evaporativo direto convencional. Fazendo uso de uma ferramenta de simulação foi realizada uma análise da utilização desse sistema em cinco cidades brasileiras. Foram constatadas reduções de quase 4% no consumo total do edifício para a cidade de São Paulo e valores semelhantes para as outras cidades, apresentando como ponto negativo o consumo adicional de água necessário para o resfriamento evaporativo indireto.

Fonseca e Lambert (2012) analisaram a utilização de conversores de frequência que acionam máquinas de indução acopladas à ventilação forçada de sistemas de resfriamento evaporativo do tipo direto. A utilização de conversores não apenas reduziu a potência ativa demandada pelo sistema, como também reduziu o consumo de água utilizado.

Zapattera (2016) apresentou a necessidade de criação ou de manutenção de sistemas de resfriamento evaporativo em ambientes industriais, de forma a se alcançar condições termicamente adequadas aos processos de produção de forma a minimizar as intervenções que as condições climáticas representam sobre os custos dos processos de produção bem como sobre o consumo energético.

Barros (2020) desenvolveu um experimento quantitativo onde avaliou o desempenho de um refrigerador de vaso cerâmico que atuou com o princípio do resfriamento evaporativo, e comparou resultados experimentais com valores previstos em modelo de transferência de calor e massa. O experimento permitiu a identificação dos mecanismos de transferência que estão envolvidos em processos de um sistema físico real.

Masiero *et al.* (2020) em seus estudos recentes, buscaram identificar o comportamento de variáveis como temperatura e umidade do ar, bem como consumo de água para uma célula-teste a partir da utilização de um equipamento eletromecânico de Resfriamento Evaporativo Direto. Constataram que o período mais quente e mais seco do ar externo é o mesmo em que o sistema de resfriamento atinge seu ápice de desempenho, com diferença de temperatura de 6,69

°C entre o ambiente interno e o externo. Por outro lado, a diferença em clima quente e úmido a diferença foi de apenas 1,74 °C. Seu estudo é relevante na medida em que oferece informações importantes para a melhoria do sistema e seu uso em edificações.

2.3.1 Princípios do resfriamento evaporativo

Conforme Yanagi Junior *et al.* (2017), o resfriamento evaporativo ocorre quando o ar passando por uma matriz aletada ou porosa cede energia na forma de calor para um filme de água que evapora com a transferência de calor do ar para o líquido, provocando a queda de temperatura do ar e o aumento da umidade relativa do mesmo.

O processo citado, segundo Sánchez *et al.* (2012), depende significativamente da umidade inicial do ar ambiente, pois acrescido do fato da evaporação exigir acréscimo de energia, o gradiente de umidade presente entre ar e filme de água também favorece a transferência de massa na forma de vapor para o fluxo de ar.

Na análise e no estudo de resfriamento evaporativo e utilização de climatizadores, os conhecimentos sobre processos psicrométricos são de grande importância. Sabe-se que resfriamento evaporativo se remete a interação de átomos e moléculas que estão em estado líquido recebendo calor para passar para o estado de vapor. Durante esse processo, a substância absorve calor do meio em que se encontra, acarretando o resfriamento do meio.

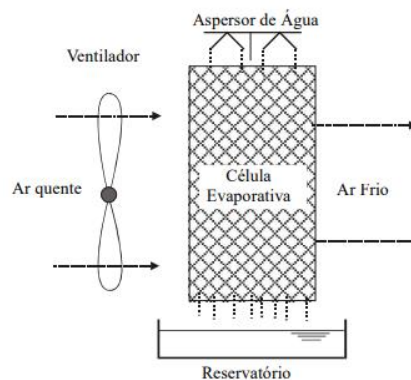
Martinelli (2002) tratou a psicrometria como o ramo da física que está relacionado com a determinação das condições do ar atmosférico, mais especificamente com respeito à mistura de ar seco e vapor de água. Esse estudo é um dos pilares que sustentam a análise e o entendimento de processos de manipulação do ar úmido. Breve estudo acerca da psicrometria para um maior entendimento das características do ar úmido é apresentado no APÊNDICE B.

2.3.2 Técnicas de Resfriamento evaporativo

No sistema de resfriamento evaporativo do tipo direto, um gás é resfriado por contato direto com uma superfície líquida ou ainda por uma superfície sólida molhada. Aqui, ocorre a vaporização da água na corrente de ar e através da transferência de calor do ar para a água vaporizada, verifica-se a redução da temperatura ambiente (temperatura de bulbo seco). Além da redução de temperatura, há o aumento da umidade relativa do ar, mantendo-se constante a entalpia, tratando-se assim um resfriamento adiabático (SANTAMOURIS, 2007).

Nesse tipo de sistema, mínima temperatura que o ambiente é capaz de atingir é igual a temperatura de bulbo úmido do ar que adentra no ambiente. Para que se obtenha menores temperaturas na saída, é necessário que a água utilizada no sistema seja resfriada anteriormente. A Figura 2 apresenta esquematicamente o funcionamento do sistema de resfriamento evaporativo do tipo direto.

Figura 2 - Resfriado Evaporativo Direto



Fonte: Camargo (2003).

E. Masiero et al., (2020) apresentam que elevados gastos da saúde pública, principalmente com relação aos problemas respiratórios na estação mais seca do ano, atrelados ao consumo exacerbado de eletricidade de sistemas convencionais de condicionamento de ar, necessitam de tecnologias auxiliares que apresentem vantagens, e nesse cenário, surgem os aparelhos de resfriamento evaporativo direto.

Um avanço na tecnologia de resfriadores evaporativos se deu através da introdução de sistemas do tipo indireto, vale ressaltar que o mesmo não faz parte do escopo desse trabalho. Se trata de um sistema onde o ar que terá como fim condicionar o ambiente, transfere calor para uma corrente de ar secundária, ou até mesmo para um líquido que tenham sido resfriados pela evaporação. Aqui é importante frisar a redução da entalpia do lado seco do sistema. É um sistema onde o ar e a água circulam em canais adjacentes (Oliveira, 2011). O sistema do tipo indireto pode ser analisado através da Figura 3:

Figura 3 – Resfriado Evaporativo Indireto

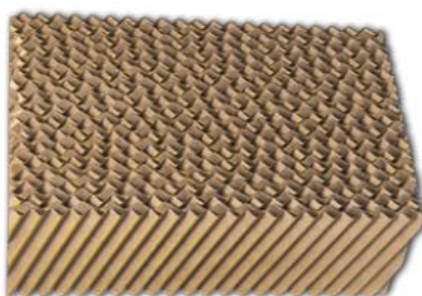


Fonte: Pereira (2017)

2.4 MATERIAIS DA MATRIZ EVAPORATIVA

O material mais disseminado para aplicação em painéis evaporativos é a placa de celulose (Figura 4), constituída pela junção de diversas folhas de papel *kraft* corrugada e resinada de forma a obter maior resistência. Possui a configuração de uma colmeia onde junções de sua camada resultam em dutos que permitem a passagem do ar e o escoamento da água de circulação do sistema (PEREIRA, 2017).

Figura 4 - Painel evaporativo de celulose tipo colmeia



Fonte: Pereira (2017).

Através da fabricação de painéis por meio de materiais alternativos, surge uma gama de opções de diferentes materiais de fácil aquisição e baixo custo. Pode-se citar a bucha vegetal (Figura 5) que quando produzida em grande quantidade, acarreta uma redução de custo e rápido retorno. Trata-se de uma planta herbácea trepadeira, originária da Ásia, África e América e vastamente encontrada no Brasil. A bucha vegetal é dotada de fibras finas, resistentes, com características elásticas e macias. Sua constituição se dá, principalmente, com cerca de 54% de celulose e 15% de lignina (Navarro *et al.*, 1991 apud Almeida, 2007).

Figura 5 - Bucha Vegetal



Fonte: Pereira (2017)

Outro material empregado para construção de painéis é a argila expandida (Figura 6), um agregado de forma aproximadamente esférica de cerâmicas leves, com estrutura interna formada de uma espuma cerâmica composta de pequenos poros, e uma casca rígida e resistente. Sua produção se dá em grandes fornos rotativos, onde argilas especiais se expandem quando expostas a altas temperaturas (aproximadamente 1100°C), resultando assim em um produto leve e com alta resistência mecânica. Possui importantes características além de leveza, como resistência, inércia química, estabilidade dimensional, dentre outros (SILVA, 2002).

Figura 6 - Argila Expandida



Fonte: Pereira (2017).

Com a finalidade de se conhecer melhor todo o processo de aplicação de materiais alternativos em sistemas de resfriamento evaporativo de forma a se alcançar melhores eficiências no processo de resfriamento, diversos estudos foram desenvolvidos.

Araújo (2006) investigou a aplicação da fibra de coco, bucha vegetal e o sisal para aplicação em painéis evaporativos. O desempenho desses materiais como enchimento para um sistema evaporativo foi analisado em um túnel de vento. Neste estudo também se utilizou um painel evaporativo comercial, à base de papel *kraft* e resina, como material referencial para análise. Foi possível o indicativo de que o sisal apresentou resultados tão eficientes quanto a

bucha vegetal e com um maior destaque a fibra de coco, no qual a autora descreve como um material promissor.

Os mesmos materiais (com exceção do sisal) foram analisados por Oliveira *et al.* (2012), que apresentaram um estudo sobre o potencial do resfriamento evaporativo com a utilização de duas estruturas constituídas por materiais vegetais. Para efeito comparativo também se utilizou a placa de celulose comercial avaliando-se parâmetros como perda de carga, velocidade do fluxo de ar e vazão de água para a caracterização das dimensões ideais para cada painel. O estudo apontou resultados promissores para as fibras vegetais aplicadas.

Anteriormente, Ahmed *et al.* (2011) desenvolveram um estudo do desempenho de três enchimentos de painéis evaporativos, avaliando os materiais celdek (tipo de placa de celulose), palha e madeira fatiada para a aplicação em uma estufa. Foram observados parâmetros ambientais como temperatura e umidade relativa em 3 diferentes horários do dia, bem como os parâmetros de cultura dos materiais, como dados do caule, dimensões e quantidade das folhas, peso da matéria, dentre outras características. O comparativo foi feito entre as condições dentro da estufa, onde foi aplicado o sistema de resfriamento, e fora da estufa. Os parâmetros ambientais demonstraram diferenças significativas para dois horários observados. Todos os parâmetros de cultura indicaram forte influência. Ao final da pesquisa constatou-se que os painéis de madeira fatiada apresentaram melhor desempenho.

Durante esse tempo, a argila expandida também vinha sendo objeto de estudos em sistemas evaporativos. Vigoderis *et al.* (2007) verificaram a eficiência de um túnel de vento reduzido para aplicação de resfriamento evaporativo através da realização da análise comparativa entre uma placa de celulose comercial e a argila expandida como material poroso evaporativo. Além da constatação da eficácia do túnel de vento para obtenção de dados, foi possível demonstrar a eficiência da placa de argila expandida no arrefecimento de instalações, bem como foram indicadas as melhores espessuras da placa que proporcione um maior resfriamento e uma menor perda de carga.

O material também foi tema de estudo na pesquisa de Rosa *et al.* (2011) na qual faz o comparativo de sua eficiência com a placa de celulose para várias condições de temperatura e de velocidades da corrente do ar, utilizando-se três diferentes espessuras para as placas e duas granulometrias em um túnel de vento. Através da análise dos dados de temperatura e umidade relativa do ar foi possível a realização do comparativo de cada granulometria combinadas a cada espessura de placa.

Damasceno *et al.* (2019) reforçaram a aplicabilidade da argila expandida em sua pesquisa, na qual empregou o material em um sistema de resfriamento evaporativo em uma

estufa e coletou dados de temperatura e umidade relativa do ar para análise. Sua aplicação se mostrou apropriada para o cultivo de plantas uma vez que apresentou uma boa eficiência em horários mais quentes do dia.

Pereira (2017) aplicou garrafas PET como material de matriz evaporativa. O material foi lixado em três diferentes granulações, a fim de verificar qual delas representa uma maior quantidade de água retida. Também foram avaliados painéis de material PET em filetes e de celulose. Foram avaliadas a eficiência do resfriamento ambiente, com relação a redução de temperatura e perda de carga. Os painéis feitos de material PET indicaram maior coeficiente de transferência de calor e massa do que o painel de celulose.

Sudprasert & Sankaewthong, (2018), utilizaram em sua pesquisa subprodutos do processamento do arroz, como a casca de arroz, farelo de arroz grosso e polidor de arroz, a fim de se desenvolver experimentalmente um material permeável à água para resfriamento evaporativo. Misturas com diferentes proporções de laterita, areia fina, cimento Portland, água e subprodutos do arroz. Foi possível a obtenção de reduções de temperatura que variaram entre 0,5°C e 2,7 °C.

Sonawan *et al.* (2020) apresentaram um método de análise dimensional para a avaliação do desempenho de um sistema de resfriamento evaporativo direto fazendo uso de uma estrutura composta de fibra de banana e a fibra de rami. Parâmetros como capacidade absorviva do material, bem como velocidade do ar, temperatura e área da seção transversal foram utilizados como base de análise. Foi verificado que os resfriadores operaram de forma mais satisfatória para um alto número de Reynolds e demonstraram que a absorção de água foi maior na estrutura de fibra de banana do que na composta por fibra de rami. Também foi possível prever a eficiência máxima de saturação para ambos os materiais.

Yan *et al.* (2020) implementaram os estudos de materiais para enchimento de sistemas de resfriamento evaporativo com foco na membrana de fibra oca, justificando sua aplicação como solução para o crescimento de bactérias e mofo na superfície do material normalmente empregado, no qual pode afetar a qualidade do ar. A aplicação dessa membrana permite que o módulo de membrana isole o ar da água, permitindo que apenas o vapor de água passe seletivamente, evitando que as gotículas arrastem as bactérias para o ar. Foi utilizado um modelo numérico para estudar a influência da temperatura, umidade relativa, velocidade do ar de admissão e parâmetros geométricos. A avaliação indicou que a temperatura do ar foi afetada pela umidade relativa do ar de entrada. Para a aplicação dessa membrana, também se verificou que a velocidade ideal do ar de admissão fosse menor a 1,5 m/s garantindo a eficiência de resfriamento.

Moraes e Prado (2020), utilizaram um protótipo de hidrocerâmica com o objetivo de provocar conforto térmico em ambientes contribuindo para a redução do uso de ar-condicionados. O protótipo foi desenvolvido com o contato entre partículas de hidrogel e placas cerâmicas feitas de argila comum, que funcionou como um dispositivo de resfriamento evaporativo, reduzindo a temperatura e elevando a umidade. Os resultados da pesquisa apontaram que o protótipo apresentou uma excelente funcionalidade, sendo de grande potencial para uma inovação sustentável, possibilitando ainda uma aquisição de baixo custo.

Barros (2021), desenvolveu um modelo matemático simplificado baseado nas transferências de calor e massa entre o ambiente e um refrigerador evaporativo cerâmico, para a predição da temperatura no interior do refrigerador. Os resultados apresentaram uma comparação entre as temperaturas previstas com valores de temperaturas obtidos experimentalmente. O modelo matemático foi validado demonstrando que o refrigerador evaporativo cerâmico pode ser aplicado em locais que apresentem condições climáticas com altas temperaturas e baixas umidades relativas do ar.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho consiste em uma pesquisa experimental, com a análise quantitativa e qualitativa das variáveis estabelecidas como essenciais para o funcionamento do sistema. Para isto, foi realizada uma coleta de dados referentes à temperatura, umidade e vazão do fluxo de ar variando-se o material das colmeias. As construções foram realizadas conforme apresentado em Brito *et al.* (2020).

3.1 CLIMATIZADOR E COLMEIA EVAPORATIVA

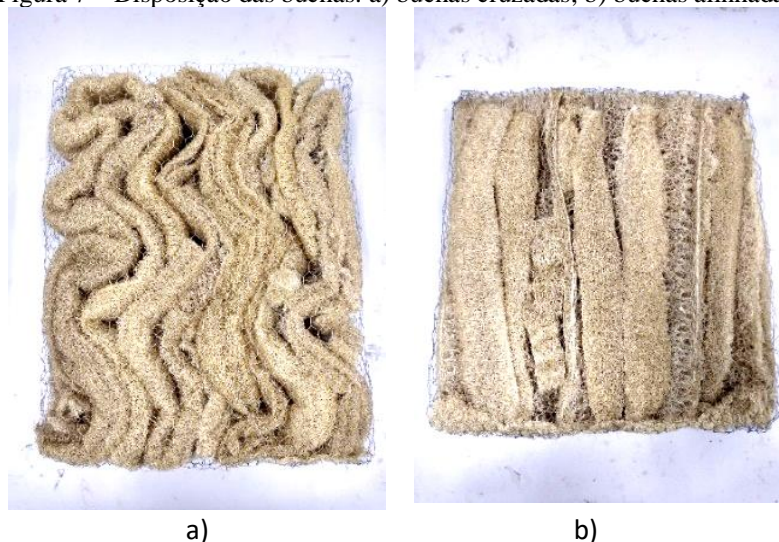
Foi utilizado um equipamento comercial, com especificações na Tabela 1, para o teste das colmeias. As buchas foram testadas em pelo menos duas disposições físicas (alinhadas e cruzadas), conforme estudos preliminares apresentados na Figura 7a e b, sendo construídas com uma gaiola de retenção de tela metálica e dimensões de 68 cm x 62 cm x 6 cm, como indicado na Figura 8. As buchas foram dispostas na estrutura de forma que o volume ocupado fosse semelhante ao da placa comercial de celulose.

Tabela 1 - Especificações do Climatizador comercial utilizado

Marca	Ventisol®
Capacidade de armazenamento de água	45 litros
Potência do Ventilador	5000 W (220 V)
Modelo	CLI 45 PRO

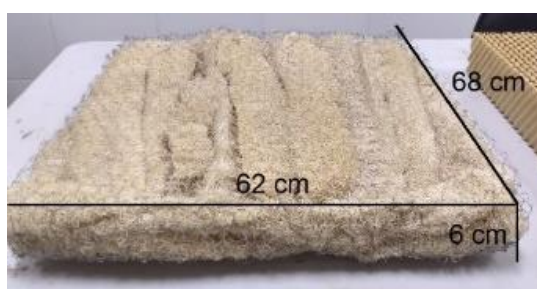
Fonte: Ventisol (2020).

Figura 7 – Disposição das buchas: a) buchas cruzadas; b) buchas alinhadas.



Fonte: Brito *et al.* (2020).

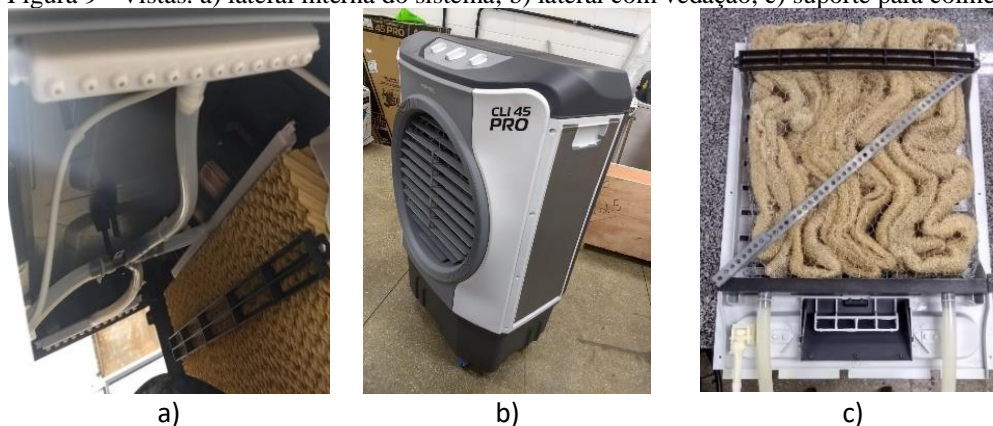
Figura 8 - Dimensões da estrutura para as buchas alinhadas.



Fonte: Brito *et al.* (2020).

A Figura 9a apresenta a parte interna do climatizador vista pela lateral, observa-se que há uma linha de alimentação de água e uma colmeia de pequenas dimensões. Para garantir que o ar percorresse somente pelas colmeias que foram utilizadas, o sistema funcionou com as laterais vedadas e, para evitar alterações na vazão de água no sistema e respingos no ventilador, a colmeia lateral foi mantida juntamente com o sistema de alimentação desta. A vedação lateral pode ser vista na Figura 9b. Para a fixação das estruturas na parte traseira do climatizador, foi utilizada uma fita metálica e mantida a estrutura de plástico do próprio equipamento, conforme Figura 9c.

Figura 9 - Vistas: a) lateral interna do sistema; b) lateral com vedação; c) suporte para colmeia.

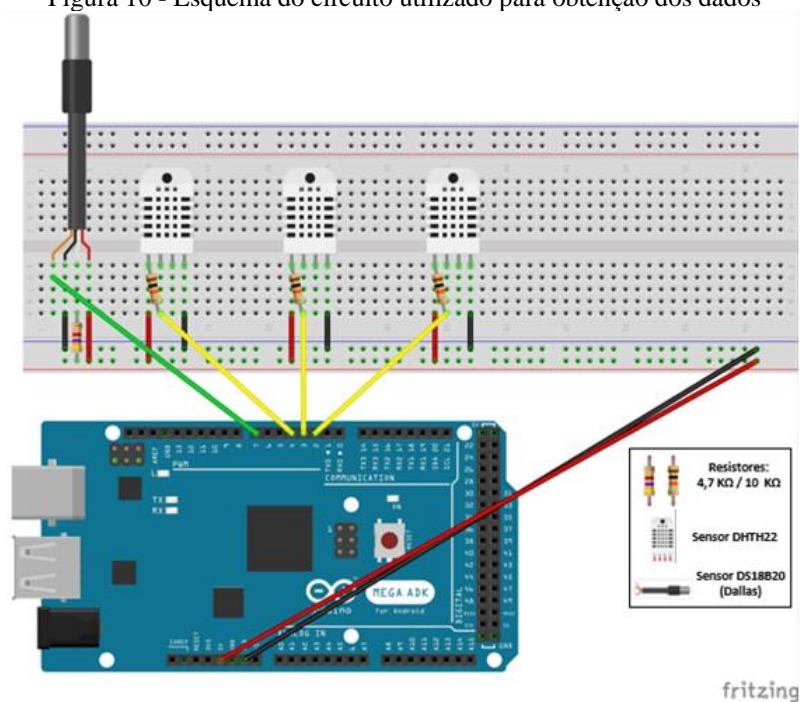


Fonte: Autor (2020).

3.2 COLETA DE DADOS COM ARDUINO®

A coleta de dados foi feita por meio de: 1 placa de microcontrolador Arduino® Mega; 3 sensores DHT11 para medição de umidade e temperatura, com especificações conforme Tabela 2; 1 sensor blindado DS18B20 para medição de temperatura no reservatório de água, com especificações conforme Tabela 3 e 1 anemômetro de hélice para medição de velocidade, com especificações conforme Tabela 4. O circuito que foi utilizado na obtenção dos dados está representado na Figura 10 e a montagem é apresentada na Figura 11.

Figura 10 - Esquema do circuito utilizado para obtenção dos dados



Fonte: Autor (2020).

Figura 11 – Circuito real utilizado para obtenção dos dados

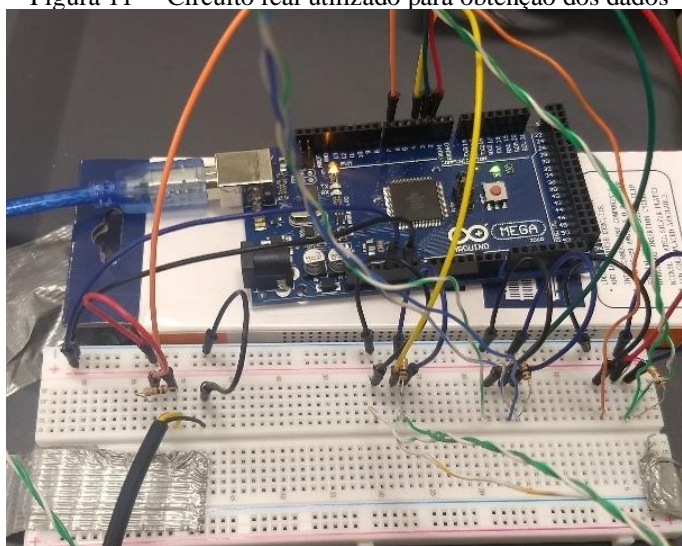
Fonte: Brito *et al.* (2020).

Tabela 2 – Especificações Modelo: DHT11 (Datasheet)

Dados	Valores
Faixa de medição de umidade	20 a 90% UR
Faixa de medição de temperatura	0° a 50°C
Precisão de umidade de medição	± 5,0% UR
Precisão de medição de temperatura	± 2 °C
Tempo de resposta	< 5s

Fonte: Alldatasheet (2020).

Tabela 3 – Especificações Modelo: DS18B20 (Dallas)

Dados	Valores
Leitura de temperatura	-55°C a +125°C
Tempo de atualização	<750ms
Precisão	±0.5°C
Resolução	9 ou 12 bits
Interface	1 fio (1 Wire)

Fonte: Alldatasheet (2020).

Tabela 4 – Especificações Termo-anemômetro digital (TAN 050)

Dados	Valores
Faixa de velocidade do ar	0 a 30m/s
Resolução	0,1
Exatidão Anemômetro	± 5%
Faixa de Temperatura	-10°C a 45°C
Exatidão Termômetro	±2°C
Peso	52g
Alimentação	1 pilha CR2032
Dimensões	40x18x105mm

Fonte: Incoterm (2020).

Para a programação interna do microcontrolador, foi utilizada a interface padrão do sistema Arduino® e cujo código empregado pode ser verificado no APÊNDICE C.

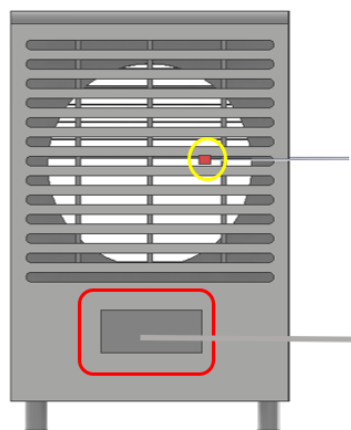
Os sensores de umidade e temperatura foram posicionados na entrada e saída do escoamento, e no ambiente do experimento. O primeiro sensor foi fixado na parte anterior do climatizador, para a obtenção dos dados referentes ao ar de entrada do sistema e conforme apresentado na Figura 12. O modelo Dallas foi utilizado para a medição da água do reservatório do climatizador (indicado pela marcação em vermelho).

O segundo sensor foi posicionado na saída do fluxo de ar do sistema e o terceiro sensor, por sua vez, disposto no ambiente a uma distância mínima de 1 metro do climatizador de forma a medir as condições próximas ao climatizador uma vez que não existe controle das condições climáticas dentro do laboratório, conforme apresentados na Figura 13.

Para cada matriz analisada foram realizados no mínimo 5 experimentos. Os primeiros valores de temperatura e umidade foram registrados com o sistema desligado para que fossem registradas as condições iniciais e, após o sistema ser ligado, foram observados os dados a cada 15 minutos. Ao se obter variações inferiores a 0,1 °C para os dados de temperatura e 5% de umidade, o equipamento foi considerado como em regime estacionário e os valores obtidos nesta última etapa utilizados nas análises posteriores. Após serem colhidos dados suficientes a bomba foi desligada e aguardado um período entre 15 e 20 minutos para que o painel

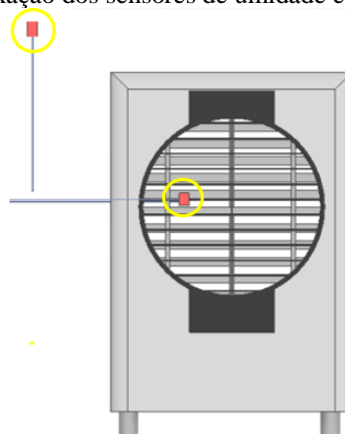
evaporativo estivesse seco e um novo experimento era iniciado. Valores constantes de vazão de água foram utilizadas nos experimentos.

Figura 12 – Locais de fixação dos sensores de umidade e temperatura: Vista posterior.



Fonte: Brito *et al.* (2020).

Figura 13 – Locais de fixação dos sensores de umidade e temperatura: Vista Frontal.



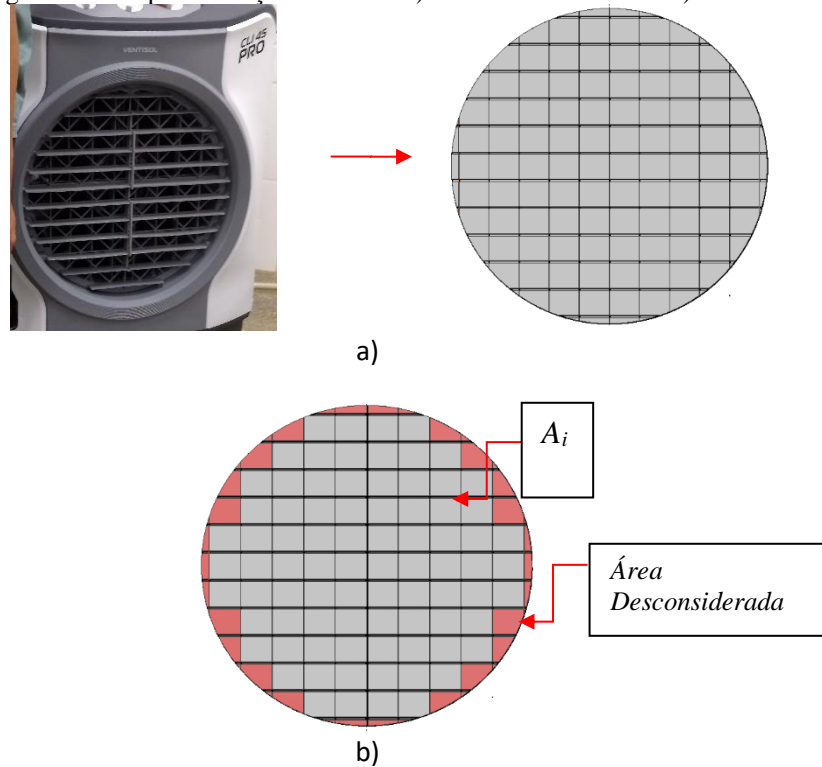
Fonte: Brito *et al.* (2020).

3.3 MEDIÇÃO DE VAZÃO E ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO

O método utilizado para a obtenção da vazão de ar proveniente do ventilador do sistema foi baseado em método apresentado por Pereira (2014). A saída de ar do climatizador foi subdividida em 82 elementos de área de dimensões 33mm x 40mm (Figura 14a), nas quais tiveram seus respectivos valores de velocidade medidos com o auxílio de um anemômetro. Por se tratar de uma saída de ar circular, algumas áreas posicionadas nas extremidades não foram

consideradas devido a dificuldades de medição com o modelo de anemômetro utilizado (Figura 14b).

Figura 14 – Abordagem adotada para medição da vazão. a) Subdivisão de áreas e b) áreas desconsideradas.



Fonte: Autor (2020).

As áreas foram reorganizadas em 11 seções de escoamento, de acordo com a

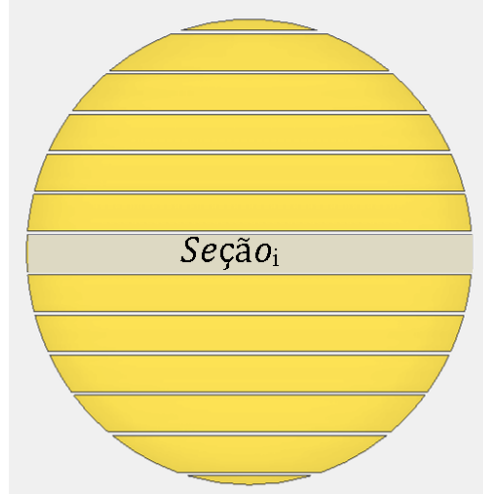
Figura 15. Após a medição de cada valor de velocidade, as velocidades médias em cada seção ($V_{média}$) foram calculadas pela Equação (1). Sendo V_i a velocidade na subdivisão e n_i a quantidade de subdivisões.

$$V_{média} = \frac{\sum V_i}{n_i} \quad (1)$$

A vazão em cada uma dessas seções ($Q_{seção}$) foi obtida por meio da Equação (2) onde A_i é a área da subdivisão. O somatório das vazões das seções resultou na vazão total do sistema.

$$Q_{seção} = V_{média} \times A_i \quad (2)$$

Figura 15 – Vista frontal da saída de ar e seções para cálculo da vazão.



Fonte: Autor (2020).

Em um resfriador evaporativo tem-se definida como efetividade a relação entre a queda real de temperatura de bulbo seco e a máxima queda teórica possível de se obter caso o resfriador fosse 100% eficiente onde o ar saísse saturado do sistema, para isso a temperatura de bulbo seco na saída deve ser igual à temperatura de bulbo úmido na entrada do resfriador. (Trane, 1918 apud Camargo, 2003) Dessa forma, quanto mais próximo a temperatura de bulbo seco de saída estiver da temperatura de bulbo úmido na entrada, um maior valor de efetividade será obtido para o resfriador evaporativo. A efetividade é definida pela equação 3, onde TBS_e e TBS_s representam as temperaturas de bulbo seco na entrada e saída do equipamento, respectivamente e TBU_e representa a temperatura de bulbo úmido na entrada.

$$\varepsilon_d = \frac{TBS_e - TBS_s}{TBS_e - TBU_e} \quad (3)$$

Uma vez que não se conhece o valor da temperatura de bulbo úmido na entrada do equipamento (TBU_e), seu cálculo é apresentado na equação 4 em uma solução empírica segundo Stull (2011). Essa equação produz a temperatura de bulbo úmido (TBU_e) em função da temperatura de bulbo seco de entrada (TBS_e) e Umidade relativa do ar na entrada do equipamento ($UR\%$).

$$\begin{aligned}
TBU_e = TBS_e \operatorname{atan} \left[0,151977 (UR\% + 8,313659)^{\frac{1}{2}} \right] \\
+ \operatorname{atan} (TBS_e + UR\%) \\
- \operatorname{atan}(UR\% - 1,676331) \\
+ 0,00391838 (UR\%)^{3/2} \operatorname{atan}(0,023101 UR\%) \\
- 4,686035
\end{aligned} \tag{4}$$

3.4 ANÁLISE DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Nessa etapa é importante destacar que cada parâmetro utilizado apresenta um erro associado ao seu processo de medição ou solução, acarretando um erro propagado no resultado obtido para a efetividade dos painéis evaporativos. A equação 5 apresenta a fórmula geral de propagação de incertezas.

$$[u(y)]^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial a} \right)^2 u(a)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \right)^2 u(b)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 u(z)^2 \tag{5}$$

Onde a , b e c são as medidas de cada parâmetro utilizado, $\frac{\partial f}{\partial a}$ é a derivada parcial de f com respeito a a , analogamente para $\frac{\partial f}{\partial b}$, ..., $\frac{\partial f}{\partial z}$, $u(y)$ representa a incerteza de f a ser determinada e $u(a)$, $u(b)$ e $u(z)$ representam as incertezas das medições dos parâmetros.

Inicialmente utilizando a equação 5 para a obtenção do erro associado a 4 e sabendo que $TBU_e = f(TBS_e, UR\%)$, tem-se:

$$[u(TBU_e)]^2 = \left(\frac{\partial TBU_e}{\partial TBS_e} \right)^2 u(TBS_e)^2 + \left(\frac{\partial TBU_e}{\partial UR\%} \right)^2 u(UR\%)^2 \tag{6}$$

Onde $u(TBS_e)$ e $u(UR\%)$ são fornecidos pelo fabricante e

$$\frac{\partial TBU_e}{\partial TBS_e} = \operatorname{atan}(0,151977 * (UR\% + 8,313659)^{\frac{1}{2}}) + \frac{1}{(TBS_e + UR\%)^2 + 1}$$

$$\frac{\partial TBUE}{\partial UR\%} = \frac{0,0759885 * TBSe}{(0,02309 * UR\% + 1,19202) * (UR\% + 8,313659)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{(TBSe + UR\%)^2 + 1}} - \frac{1}{UR\%^2 - 3,352662 * UR\% + 3,81008} + 0,00391838$$

$$* \left(1,5 * UR\%^{\frac{1}{2}} * \text{atan}(0,023101 * UR\%) + \frac{0,023101 * UR\%^{3/2}}{0,00053 * UR\%^2 + 1} \right)$$

Com o erro associado a TBUE obtido foi possível o cálculo de propagação de erro para a equação de efetividade. Para isso aplicando a equação 5, onde $\varepsilon_d = f(TBSe, TBSs, TBUE)$, tem-se:

$$[u(\varepsilon_d)]^2 = \left(\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial TBSe} \right)^2 u(TBSe)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial TBSs} \right)^2 u(TBSs)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial TBUE} \right)^2 u(TBUE)^2 \quad (7)$$

Onde,

$$\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial TBSe} = \frac{TBSs - TBUE}{(TBSe - TBUE)^2}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial TBSs} = - \frac{1}{TBSe - TBUE}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial TBUE} = \frac{TBSe - TBSs}{(TBSe - TBUE)^2}$$

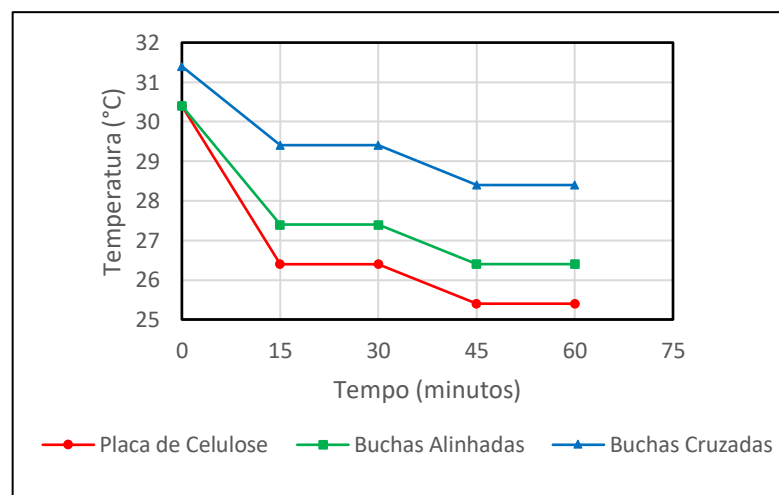
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados prévios foram obtidos e expressos em Brito *et al.* (2020). A Figura 16 apresenta o comportamento das temperaturas na saída do climatizador para cada colmeia. A análise para cada material foi realizada em dados dos experimentos que apresentaram a maior similaridade nas condições iniciais, como não existiu controle das condições ambientais do laboratório, as condições iniciais ambientais divergiam ao longo dos experimentos

O gráfico em (a) apresenta o comportamento da temperatura do ar ambiente, para as três placas e por um período de 1 hora. A colmeia de celulose apresentou variação de temperatura entre a entrada e saída do climatizador em 5°C. As buchas alinhadas apresentaram a variação mais próxima da celulose e, ainda assim, com uma diferença de 1°C abaixo. Em (b) são apresentadas as barras do intervalo de erro para as medições de temperatura obtidas para cada painel evaporativo aplicado de acordo com informações do fabricante dos sensores DHT11, sendo de $\pm 2^\circ\text{C}$ para a medições de temperatura. A Tabela 5 indica as variações entre entrada e saída do ar no equipamento e para cada colmeia utilizada nos experimentos apresentados.

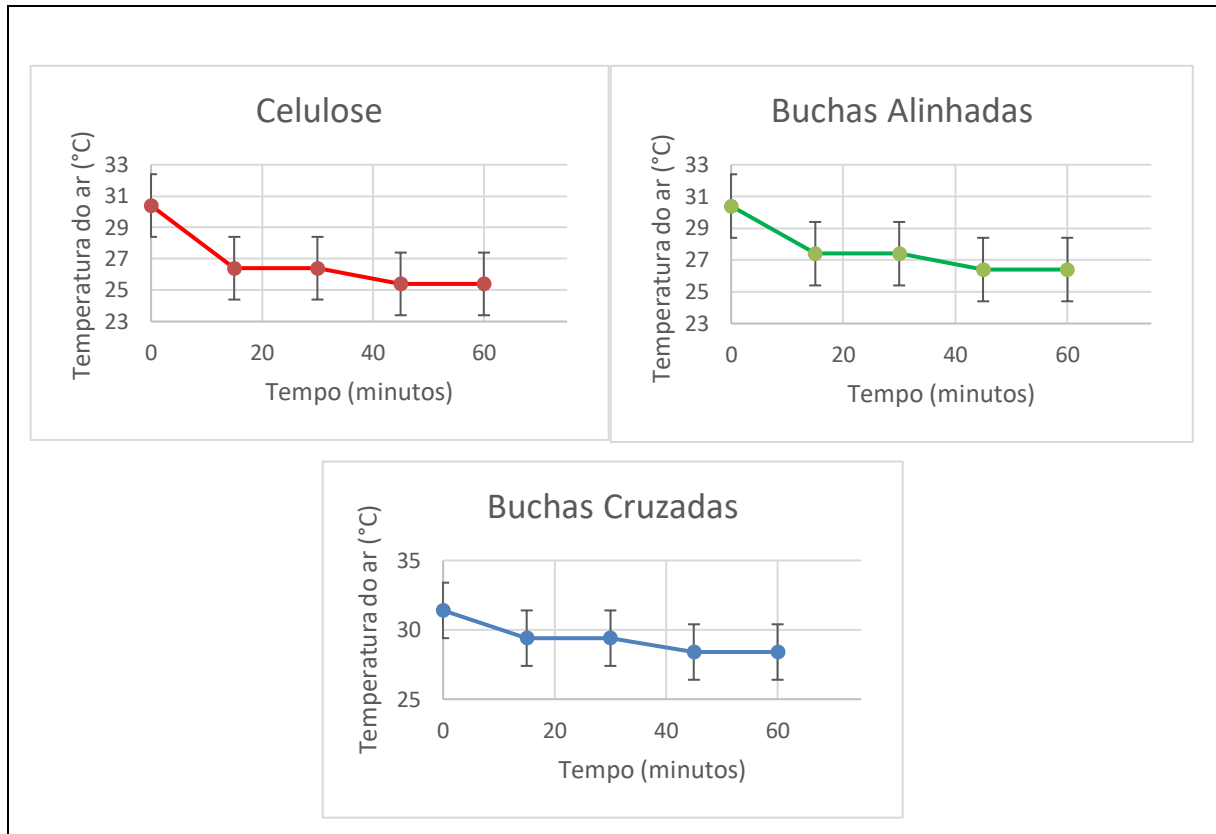
As colmeias evaporativas de bucha vegetal, quando comparadas à placa de celulose comercial, produziram menores variações de temperaturas do ar – 20% (para a bucha alinhada) e 40% (para a bucha cruzada) abaixo da placa de celulose.

Figura 16– a) Gráfico da variação de temperatura do ar na saída e para diferentes materiais; b) Gráfico com barras de erro para medições de temperatura para cada material



a)

Fonte: Brito *et al.* (2020)



b)

Fonte: Autor (2022).

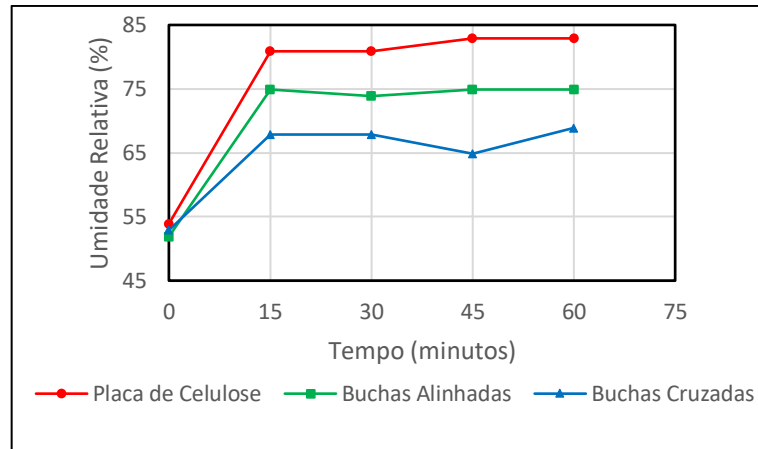
Tabela 5– Variação total da temperatura do ar

Material	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Varição total (°C)
Celulose	30,4	25,4	5
Buchas Alinhadas	30,4	26,4	4
Buchas Cruzadas	31,4	28,4	3

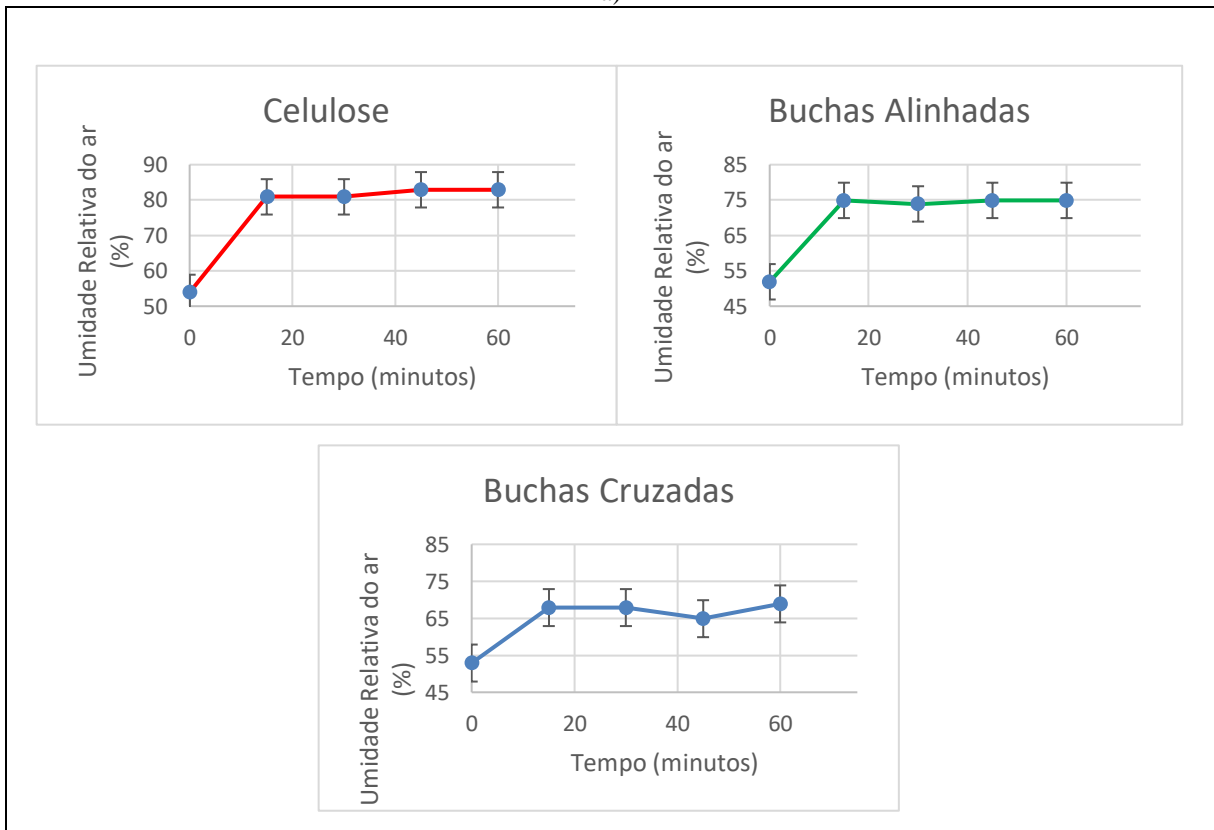
Fonte: Brito *et al.* (2020).

A mesma análise foi realizada para a umidade relativa entre entrada e saída (Figura 17). Em a) foram analisados dados dos experimentos os quais as temperaturas foram também avaliadas. Comportamento semelhante foi observado com a variação da umidade relativa do ar – 20,7% para bucha alinhada e 44,8% para bucha cruzada abaixo da placa comercial – indicando a relação direta de redução de temperatura do ar com a elevação da umidade relativo do mesmo. Os valores das variações são apresentados na Tabela 6. Em b) é possível observar a barra de erro para as medições de umidade realizadas com os sensores DHT11, para esse parâmetro analisado o fabricante indica o intervalo de erro de $\pm 5\%$.

Figura 17- a) Gráfico da variação da umidade relativa do ar na saída e para diferentes materiais; b) Gráfico com barras de erro para medições de umidade para cada material



a)



b)

Fonte: Autor (2022)

Cabe destacar que a vazão de água no sistema foi mantida constante em todos os experimentos e, assim, as novas placas apresentam uma transferência evaporativa de massa inferior à placa de celulose.

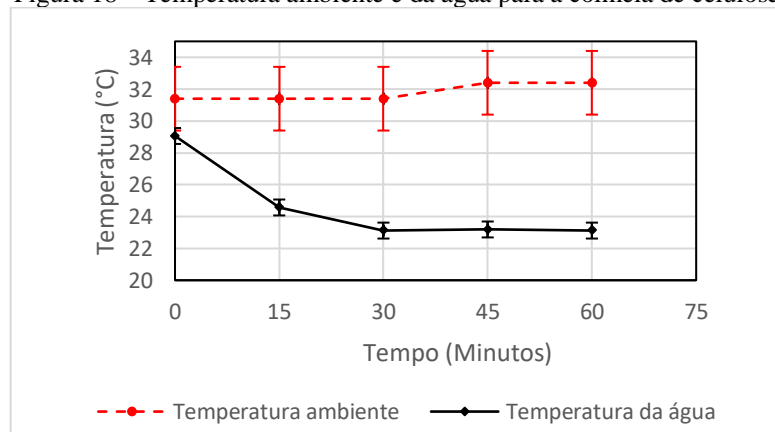
Tabela 6– Variação da umidade relativa do ar no final do experimento.

Material	Umidade Relativa Entrada (%)	Umidade Relativa Saída (%)	Varição total (%)
Celulose	53,9	82,9	29
Buchas Alinhadas	51,9	74,9	23
Buchas Cruzadas	52,9	68,9	16

Fonte: Brito *et al.* (2020)

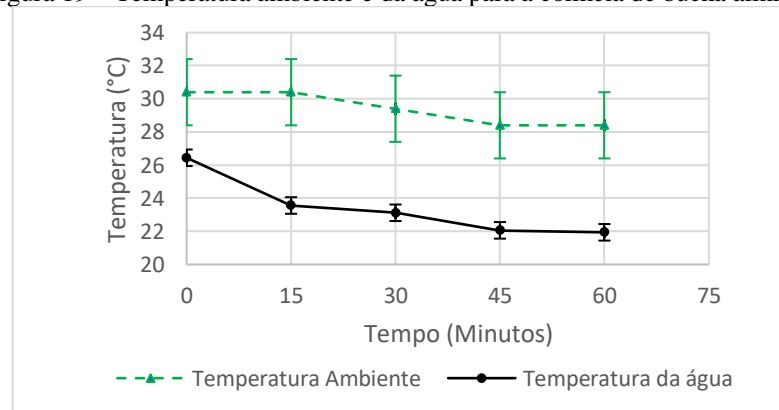
As Figuras 18, 19 e 20 apresentam o comportamento da temperatura ambiente durante a realização dos experimentos, bem como a curva do comportamento da temperatura da água presente dentro do reservatório do sistema de climatização e suas respectivas barras de erros, levando em consideração os erros dos sensores DHT11 e DALLAS que são de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

Figura 18 – Temperatura ambiente e da água para a colmeia de celulose.



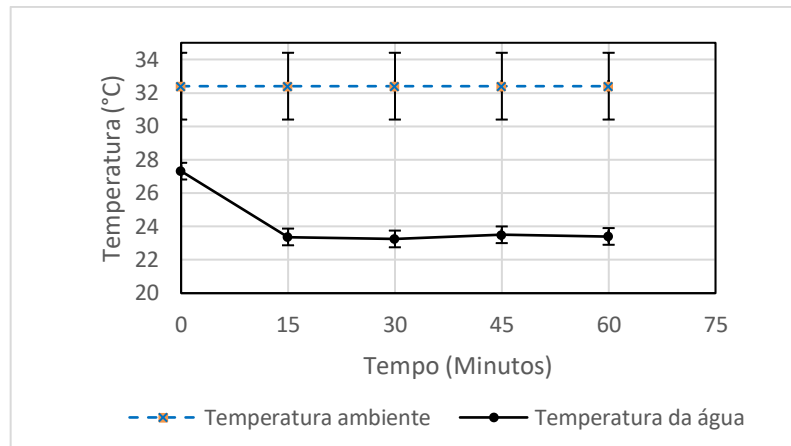
Fonte: Autor (2022)

Figura 19 – Temperatura ambiente e da água para a colmeia de bucha alinhada



Fonte: Autor (2022)

Figura 20 - Temperatura ambiente e da água para a colmeia de bucha cruzada



Fonte: Autor (2022)

Quanto à vazão medida nos experimentos, a Tabela 7 apresenta os valores obtidos, indicando pouca influência das placas na vazão total do climatizador, com redução de 7,3% da vazão nas buchas alinhadas e 5,1% nas buchas cruzadas quando comparadas com a celulose.

Tabela 7 - Vazão total do sistema para os diferentes materiais.

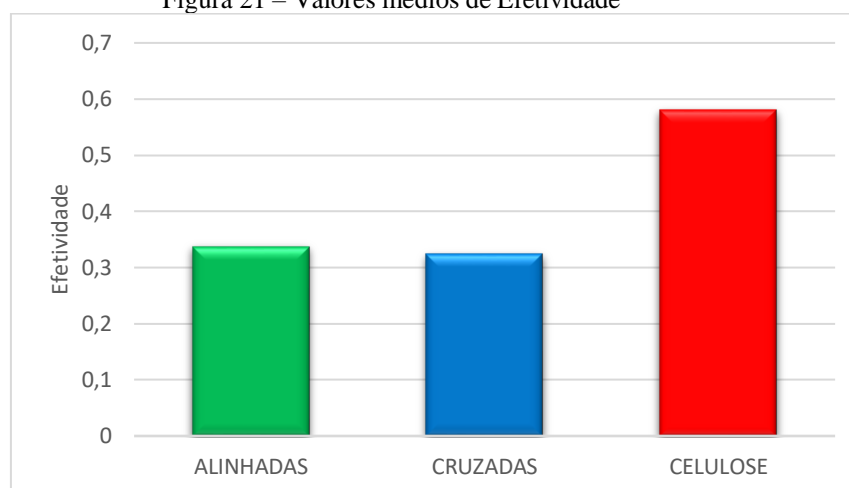
Vazão volumétrica Q (m ³ /s)		
Celulose	Buchas Alinhadas	Buchas Cruzadas
0,318	0,295	0,302

Fonte: Brito *et al.* (2020)

Devido à falta de controle das condições climáticas do laboratório no período experimental, o cálculo de efetividade foi aplicado, através das equações (3) e (4) apresentadas, como forma de realizar uma análise do equipamento a cada medição, sem a necessidade do comparativo entre os experimentos em que apresentaram maior similaridade nas condições iniciais. Foram obtidos valores de efetividade para cada instante de medição, a média de efetividade obtida para cada material são apresentadas no gráfico da Figura 21 a seguir.

As buchas dispostas de forma alinhada apresentaram uma média de efetividade de aproximadamente 0,34, apresentando um desvio padrão máximo de aproximadamente 0,10. As buchas dispostas de forma cruzada, apresentaram uma média de 0,32 aproximadamente, valor próximo da média apresentada pelas buchas alinhadas, com um desvio padrão máximo de aproximadamente 0,11. Como esperado, a celulose apresentou os maiores valores de efetividade com uma média de aproximadamente 0,58, com um desvio padrão máximo nos resultados próximos a 0,27.

Figura 21 – Valores médios de Efetividade

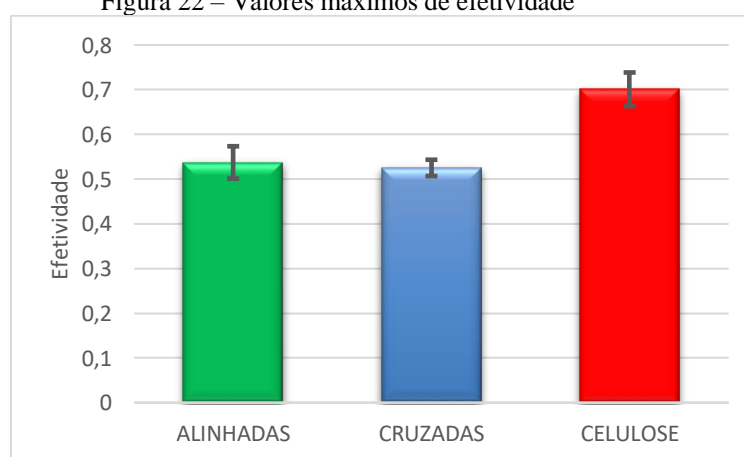


Fonte: Autor (2022)

Importante salientar que, todos os valores de efetividade obtidos, apresentam um erro associado, uma vez que a equação de efetividade necessita da obtenção de valores de TBUe, onde os mesmos são obtidos através da aplicação da expressão empírica apresentada na equação 4 e que necessita da aplicação de valores obtidos pelos sensores dos quais apresentam erros associados. Dessa forma, para a obtenção dos erros associados aos dados de efetividade, foi utilizado o método de propagação de erros aplicando-se as equações (6) e (7).

O Gráfico da Figura 22 a seguir apresenta os valores máximos de efetividade para cada uma das placas testadas, bem como o erro associado.

Figura 22 – Valores máximos de efetividade



Fonte: Autor (2022)

Os valores obtidos são de aproximadamente 0,54, 0,52 e 0,70 para as placas de bucha alinhadas, cruzadas e a placa de celulose, respectivamente. As barras de erros referentes a efetividade para cada material também podem ser verificadas, nas quais apresentaram valores

de 0,03 para o máximo de efetividade obtido com a aplicação das buchas alinhadas, 0,01 para a aplicação das buchas cruzadas e 0,03 para a placa comercial de celulose.

Apesar dos valores próximos entre si quando comparadas as placas de bucha vegetal alinhadas e cruzadas e também quando as comparamos com a placa de celulose, percebe-se através da Figura 21 que a ocorrência de valores próximos aos valores máximos é menor para as placas evaporativas de bucha vegetal, uma vez que apresentam uma média próxima a 0,34 e 0,32 (alinhadas e cruzadas, respectivamente) enquanto a placa de celulose apresenta uma maior ocorrência de valores próximos ao valor máximo uma vez que apresentou a média de aproximadamente 0,58.

Os demais dados experimentais, bem como das medições de temperatura e umidade realizadas, dos valores de TBUe e de efetividade (ϵ_d) calculados e dos erros associados a cada um dos parâmetros avaliados, estão disponíveis para análise em anexo no APÊNDICE D. Ao analisá-los percebe-se que em alguns resultados a efetividade decorrente da aplicação das placas de bucha vegetal se mostraram insatisfatórios quando comparados a celulose, porém, deve-se levar em consideração as diversas variações climáticas durante os experimentos.

CONCLUSÕES

Como produto desse trabalho foram apresentados os resultados obtidos através da utilização de duas colmeias de bucha vegetal para aplicação em processos de resfriamento evaporativo, comparando valores de temperatura e umidade com uma placa de celulose comercial, bem como a reafirmação de que a redução da temperatura de um ambiente, resultante desse processo, depende significativamente da umidade relativa do ar e da possibilidade de inseri-lo em quantidade no ambiente. Apesar da região não oferecer à pesquisa no período experimental as condições climáticas mais favoráveis de forma a se obter os maiores níveis de eficiência que esse sistema oferece – épocas do ano em que a região oferece um clima quente e seco - foi possível o indicativo de resultados satisfatórios através da análise dos dados e gráficos gerados. Esse resultado se mostrou mais evidente quando feita a análise do comparativo dos experimentos realizados em condições climáticas com maior similaridade e o cálculo de efetividade foi capaz de fornecer valores mais precisos para análises pontuais. Com relação às disposições da bucha vegetal e tratando-se de valores médios, as buchas alinhadas apresentaram melhores resultados em redução de temperatura e valores de efetividade, porém, as margens de erro dos resultados de uma disposição estão compreendidas dentro da margem de erro da outra, sendo assim não é possível afirmar, com certeza, qual disposição apresenta melhores resultados para a aplicação.

Apesar dos valores inferiores à placa de celulose apresentados pelas placas de bucha vegetal, deve-se levar em consideração que um dos principais focos da pesquisa foi a utilização da bucha em sua forma mais natural, para que pudesse facilmente ser aplicada sem a necessidade de processamentos ou grandes reajustes. Sendo utilizada dessa maneira acabou gerando irregularidades no preenchimento do painel, conseqüentemente houve uma distribuição desigual do fluxo de água na placa evaporativa que resultou em uma maior dificuldade do contato ar-água e, conseqüentemente, uma menor eficiência do sistema. Se tratando de um material promissor em sistemas evaporativos, espera-se que futuros trabalhos sejam realizados mais detalhadamente nessa área a respeito da otimização dos arranjos da bucha vegetal de forma a se obter uma maior eficiência do sistema devido ao alcance da máxima área de contato entre o ar e a água, minimizando ainda a obstrução do fluxo no sistema.

REFERÊNCIAS

- AHMED, E. M.; ABAAS, O.; AHMED, M.; ISMAIL, M. R. **Performance evaluation of three different types of local evaporative cooling pads in greenhouses in Sudan.** Saudi Journal of Biological Sciences, 18(1), 45–51, 2011
- ALLDATASHEET **DS18B20 Datasheet** - Dallas. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/227472/DALLAS/DS18B20.html>> Acesso em 16 de Dezembro de 2020.
- ALLDATASHEET. **DHT22 Datasheet.** Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132459/ETC2/DHT22.html>> Acesso em 16 de Dezembro de 2020.
- ALMEIDA A. L. F. S. . **Influência de Tratamentos Superficiais no Comportamento Mecânico de Compósitos Poliméricos Reforçados por Fibras Lignocelulósicas,** 2007.
- ARAÚJO, S. D. O. **Análise do Desempenho Térmico de Fibras Vegetais em Sistemas de Resfriamento Evaporativo.** Universidade Federal De Pernambuco Curso De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica Recife, 2006.
- BASTOS, A. I. U. **Avaliação Do Uso De Resfriamento Evaporativo Indireto Em Sistemas De Climatização De Edificações Comerciais,** p.10, 2011.
- BRITO, N. A. M.; SATO, A. I.; SOUZA, A. B.; SILVA JUNIOR, L. J. S. **Aplicação da bucha vegetal (Luffaegyptiaca) para colmeia de resfriamento evaporativo no Oeste da Bahia.** Brazilian Journal of Development, V. 6. P. 16., 2020.
- CAMARGO, J. R. **Análise de métodos para avaliar a viabilidade técnica de sistemas de resfriamento evaporativo aplicados ao condicionamento de ar para conforto.** Departamento de Engenharia Mecânica Universidade de Taubaté, 2000.
- CAMARGO, J. R. **Resfriamento evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente.** Revista Ciências Exatas, 9/10(1–2), 69–75, 2003.
- CAMARGO, J. R. **Sistemas de resfriamento evaporativo-adsortivo aplicados ao condicionamento de ar.** Aleph, p. 140, 2003.
- CAROSI, G. A. B., MENDOZA, O. S. H. **Resfriamento Evaporativo : Estudo Do Potencial De Sua Aplicação No Brasil.** p.59, 2006.
- DAMASCENO, F. A.; SILVA E.; BALIEIRO, J. I. D.; NASCIMENTO, J. A. C.; FERREIRA, M. R. **Eficiência de resfriamento de uma placa porosa umedecida construída com argila expandida,** 2019.
- FANGER, P. O. **Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.** Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering, 1970.

FONSECA, A. L. A.; LAMBERT, J. A. **Análise do uso de conversor de frequência na ventilação forçada de sistemas de resfriamento evaporativo visando à eficiência energética**, 2012.

FONTANELLA, M. **Percepção do ambiente térmico: preferências subjetivas e conforto térmico**. Dissertação de Mestrado Em Ciências Da Engenharia Civil Da Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. T. R. **Manual de conforto térmico : arquitetura, urbanismo** (7. ed.). São Paulo: Nobel, 2003.

IBGE. **Mapa Climático**. Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística, 2020. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/> > Acesso em: 6 de Outubro de 2020.

INCOTERM. (2020). **Manual-Termo-Anemômetro Digital Incoterm TAN 050**. 4(1), 64–75, 2020. Disponível em: <from <https://www.incoterm.com.br/media/2018/02/tan050-manual-site.pdf>> Acesso em 16 de dezembro de 2020.

ISO 7730:1984 - **Moderate thermal environments — Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort**, 1984.

LOPES, O. A.; GABARRA, G. R., C.; LIMA, B. W. F. **Ar Condicionado Versus Climatizadores Por Evaporação**. *Revista Ciências do Ambiente On-Line* Agosto, Volume 2, Número 2, 2006.

MARTINELLI, L. **Apostila De Refrigeração E Ar Condicionado**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, UNIJUÍ – Pinambi – Rio Grande do Sul. p. 145, 2002.

MASIERO, E. **Resfriamento Evaporativo E Condicionamento De Ar Convencional: Estudo Experimental Comparativo**. Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental- Universidade de São Paulo, 2006.

MASIERO, E.; OLIVEIRA, D. K.; COSTA, O. P.; VECCHIA, F. A. S. **Estudo experimental de condicionamento ambiental com resfriamento evaporativo direto**. *Revista Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 151-173, 2020.

MOTTA, L. A. C.; GONÇALVES, L. K. S.; SILVA, M. R.; CUNHA, J., DANTAS, M. E. **Painéis sanduíches de poliéster reforçado com fibras de rami para aplicação na Construção Civil**. *Revista Matéria*, 21(3), p.796–806. 2016.

OLIVEIRA, R. S. **Análise experimental e numérica da eficiência de resfriamento da painéis de fibras vegetais utilizados em sistemas de resfriamento evaporativo**. Tese de Doutorado. Recife: O Autor, 2011.

OLIVEIRA, R. S.; GUERRERO, H. J. R.; Mendes, A. R. P. **Eficiência de painéis de fibras vegetais utilizados para sistemas de resfriamento evaporativo direto: um estudo experimental**. *Revista Tecnologia Fortaleza*, Vol. 33, 2012.

PAGNOSSIN, E. M.; BURIOL, A. G.; GRACIOLLI, M. A. **Influência Dos Elementos Meteorológicos No Conforto Térmico Humano: Bases Biofísicas.** Revista Disciplinarum Scientia. Série: Ciên. Biol. e da Saúde Santa Maria, v.2, n.1, p.149-161, 2001.

PEREIRA, J. M. **Avaliação De Desempenho Do Painel De Plástico Pet Para Resfriamento Evaporativo.** Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica- Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas. Dissertação de Mestrado. p. 192, 2017.

RORIZ, M. **Flutuações horarias dos limites de conforto térmico: uma hipótese de modelo adaptativo.** p. 338-345. Curitiba: ANTAC, 2003.

ROSA, J. F.; TINOCO, I. F.; FERNANDES, C. M.; ZOLNIER, S.; BUENO, M. M. **Análise Da Eficiência De Resfriamento De Painéis Porosos Preenchidos Com Argila Expandida Em Comparação Aos De Celulose Usando Túnel De Vento.** Revista Engenharia Na Agricultura – p.516–523, 2011.

RUAS, A. C. **Avaliação de conforto térmico: contribuição à aplicação prática das normas internacionais.** Dissertação de Mestrado. -Campinas, SP: [s.n.], 1999.

RUAS, Á. C.; LABAKI, L. C. P. **Sistematização da avaliação de conforto térmico em ambientes edificados e sua aplicação num software,** 2002.

SÁNCHEZ, J.; SALMERÓN, J., MOLINA, J., SÁNCHEZ, F.; ÁLVAREZ, S. PHDC: **Sistemas de esfriamento evaporativo passivos e híbridos para edifícios - Software de prediseño.** Revista de La Construcción, 11(2), 73–91, 2012.

SANTAMOURIS, M. **Advances in Passive Cooling,** Edited by Mat Santamouris. 1. ed. London – UK, 2007.

SILVA, C. E. **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 Minas Gerais - Brasil. p. 78, 2002.

SILVA, I. M.; GONZALEZ, L. R.; FILHO D. F. S. **Recursos Naturais De Conforto Térmico: Um Enfoque Urbano.** Revista Da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana, 6(4), 35, 2019.

SONAWAN, H.; SOFIA, E.; RAMADHAN, A. **Assessment of direct evaporative cooler performance with a cooling pad made from banana midrib and ramie fiber.** Journal Smart and Sustainable Built Environment, 2020.

SOUZA, D. M.; NERY, J. T. **O Conforto térmico na perspectiva da Climatologia Geográfica Thermal comfort in view of the Geography Climatology.** Revista Geografia (Londrina), v. 21, n.2. p.65-83, maio/ago, 2012

TEIXEIRA, D. B., DUTRA B., PEREIRA, J. R., L., MAINIER, F. B. **Síndrome dos Edifícios Doentes em Recintos com Ventilação e Climatização Artificiais: Revisão de Literatura.,** 2005.

VIGODERIS, R. B.; TINOCO, I. F. F.; FILHO, A. F. L.; SILVA, J. N.; GATES, R. S.; PAULI, D. G.; SILVA, C.E. GUIMARÃES, M. C. C. **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.** Revista Engenharia na Agricultura, v. 15(3), 191–199., 2007.

YAN, W.; CUI, X.; YANG, X.; JIN, L.; MENG, X. **Performance evaluation of a direct evaporative cooling system with hollow fiber-based heat exchanger.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 463(1), 2020.

YANAGI J. T.; DAMASCENO, F. A.; MENDES, L.B.; JUNIOR, T. Y.; OLIVEIRA, J.L.; SARAZ, J.A.O. **Assessment of evaporative cooling efficiency in greenhouses equipped with wetted porous plates.** Journal DYNA (Colombia), 84(203), 118–125, 2017.

ZAPATERRA, C. L. I. **Estudo da melhoria do desempenho de sistemas de resfriamento evaporativo por micro aspersão de água.** Tese de Mestrado. p. 144, 2016. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo - Disponível em: < <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-30032017-164846/pt-br.php> > Acesso em: 13 de Novembro de 2020.

APÊNDICE A – ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

O presente trabalho foi fundamentado em autores selecionados através do estudo bibliométrico baseado na lei de Zipf, que permite estimar a frequência da ocorrência de palavras de um determinado texto científico e tecnológico bem como a região de concentração de termos de indexação, ou palavras-chave, que uma pequena quantidade de palavras ocorre muitas vezes e um grande número de palavras apresentam baixa frequência de ocorrência. A Tabela 8 a seguir apresenta os resultados obtidos para as pesquisas realizadas em diferentes plataformas de periódicos.

Tabela 8 - Resultados de pesquisa bibliométrica

Palavras - chave	RESULTADOS			
	Bdtd	Scielo	Periódicos	Google acadêmico
Evaporative cooling	89	62	45 768	249 000
Evaporative cooling + materials	9	4	20 815	131 000
Evaporative cooling + materials + Brazil	7	1	771	26 700
Resfriamento evaporativo	126	34	95	4 070
Resfriamento evaporativo + materiais	17	2	26	3 700
Resfriamento evaporativo + materiais + Brasil	8	1	20	3 290

Fonte: Autor (2020)

Observa-se que com a inserção da combinação de diferentes termos na pesquisa, há um refinamento nos resultados obtidos. A plataforma de periódicos Google Acadêmico foi a plataforma que apresentou maior número de resultados para essa pesquisa, uma vez que esta, representa uma das maiores e mais disseminadas plataformas de pesquisas de artigos acadêmicos. Outra importante observação feita, se diz respeito às repetidas citações de autores em diferentes trabalhos relacionados ao estudo do resfriamento evaporativo, nos quais tiveram suas obras consideradas relevantes para a fundamentação dessa pesquisa.

APÊNDICE B – ESTUDO PSICROMÉTRICO

O estudo do ar úmido divide-se na análise de propriedades relacionadas à temperatura (Temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido e de orvalho), propriedades relacionadas à umidade (Pressão de vapor, razão de umidade, umidade absoluta, umidade relativa e grau de saturação) e propriedades relacionadas ao volume ocupado e energia (Volume Específico e entalpia total da mistura). A Tabela 9 apresenta a descrição de cada uma dessas propriedades.

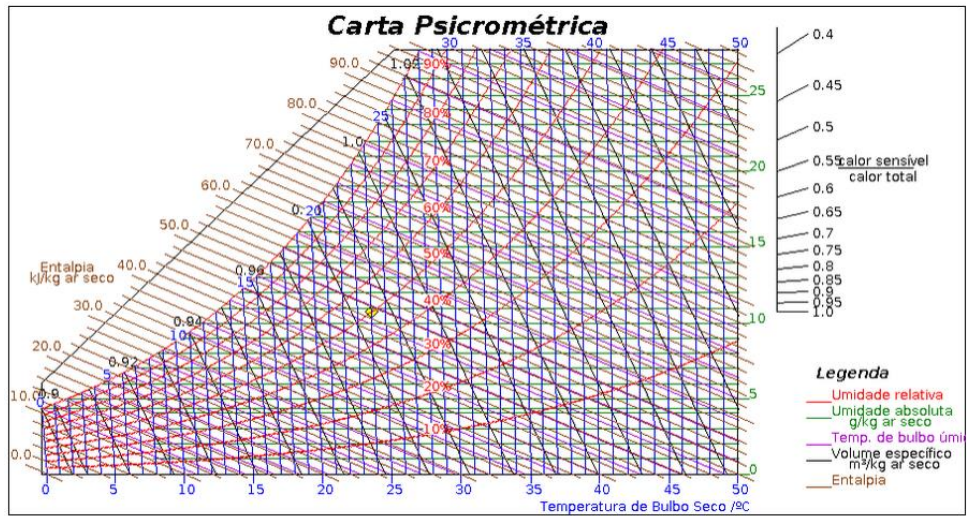
Tabela 9- Propriedades do ar úmido

PROPRIEDADE	DESCRIÇÃO
Temperatura de bulbo seco (T_{bs})	É a temperatura medida por um termômetro que pode ser de bulbo de mercúrio ou similar cujo bulbo se encontra seco.
Temperatura de bulbo úmido (T_{bu})	A temperatura de bulbo úmido resulta de um processo de equilíbrio dinâmico de transferência de calor e massa e depende de vários fatores como a velocidade do ar e a geometria do bulbo, entre outros, mas, em termos práticos, elas estão muito próximas para uma mistura de ar seco e vapor d'água .
Temperatura de orvalho (T_o)	Temperatura em que o ar úmido se torna saturado, ou seja, é a temperatura correspondente ao ponto de início da condensação do vapor d'água presente no ar úmido quando seu resfriamento ocorre a pressão constante
Pressão de vapor (P_v)	Para a mistura de ar seco e vapor d'água temos que a pressão P é definida como a soma da pressão parcial do ar seco e da pressão parcial do vapor d'água P _v na mistura
Razão de umidade (x)	É definida como a razão entre a massa de vapor de água m _v e a massa de ar seco mas em dado volume da mistura.
Umidade absoluta (w)	É a razão entre a massa de vapor de água m _v e a massa de ar seco mas de uma amostra de ar.
Umidade relativa (φ)	É a razão entre a parte molar de vapor x _v de água contido no ar e a parte molar de vapor em uma amostra de ar saturado x _{vs} à mesma temperatura e pressão.
Grau de saturação (μ)	É a relação percentual entre a umidade absoluta (w) e a umidade absoluta do ar saturado (w _{as}) na mesma temperatura.
Volume Específico (ve)	Razão entre o volume ocupado pela mistura de ar seco e vapor de água e a massa de ar seco na mesma temperatura.
Entalpia total da mistura (H)	A entalpia total da mistura é dada pela contribuição isolada da entalpia do ar seco (H _{as}) e do vapor d'água (H _{av}), dada a hipótese do gás perfeito.

Fonte: (Pereira, 2017)

O diagrama psicrométrico ou carta psicrométrica (Figura 23) é uma ferramenta de grande valia uma vez que nele são relacionados os diversos parâmetros que caracterizam as propriedades do ar úmido. Nele pode-se identificar as curvas características seguindo as indicações presentes na legenda, onde tem-se a temperatura de bulbo úmido, bulbo seco, volume específico, umidade relativa, umidade absoluta e entalpia.

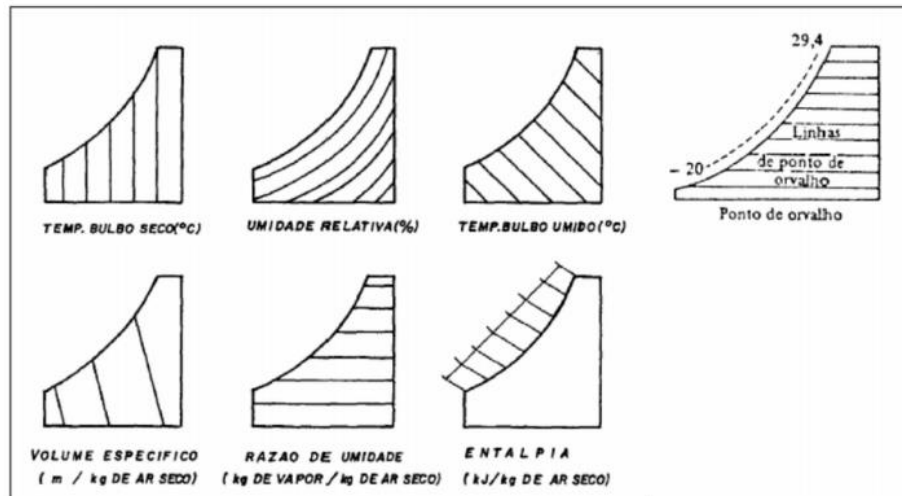
Figura 23- Carta Psicrométrica



Fonte: Pereira (2017)

O diagrama pode ser mais bem compreendido com a observação independente de suas curvas características conforme é ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Guia de Leitura da Carta Psicrométrica



Fonte: Pereira (2017)

APÊNDICE C – CÓDIGO DO ARDUINO PARA COLETA DOS DADOS

```

#include "DHT.h"
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define DHTPIN2 2      // what pin we're connected to
#define DHTPIN3 3
#define DHTPIN4 4
#define DHTPIN5 5
OneWire pino(7);
DallasTemperature barramento(&pino);
DeviceAddress sensor;

#define DHTTYPE DHT11 // DHT 11

// Initialize DHT sensor for normal 16mhz Arduino
DHT dht2(DHTPIN2, DHTTYPE);
DHT dht3(DHTPIN3, DHTTYPE);
DHT dht4(DHTPIN4, DHTTYPE);
DHT dht5(DHTPIN5, DHTTYPE);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Medicao de Variaveis!");
  dht2.begin();
  dht3.begin();
  dht4.begin();
  dht5.begin();
  barramento.begin();
  barramento.getAddress(sensor,7);
}

void loop() {
  barramento.requestTemperatures();
  // Reading temperature or humidity takes about 250 milliseconds!
  float h2 = dht2.readHumidity();
  float h3 = dht3.readHumidity();
  float h4 = dht4.readHumidity();
  float h5 = dht5.readHumidity();

  // Read temperature as Celsius
  float t2 = dht2.readTemperature();
  float t3 = dht3.readTemperature();
  float t4 = dht4.readTemperature();
  float t5 = dht5.readTemperature();
  float temperatura = barramento.getTempC(sensor);

  // Check if any reads failed and exit early (to try again).
  if (isnan(h2) || isnan(t2) ||
      isnan(h3) || isnan(t3) ||
      isnan(h4) || isnan(t4) ||
      isnan(h5) || isnan(t5)) {
    Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
    return;
  }

  // Sensor 1
  Serial.print("Umidade 1: ");

```

```
Serial.print(h2);
Serial.print(" %\t");
Serial.print("Temperatura 1: ");
Serial.print(t2);
Serial.println(" *C\t      ");

//Sensor 2
Serial.print("Umidade 2: ");
Serial.print(h3);
Serial.print(" %\t");
Serial.print("Temperatura 2: ");
Serial.print(t3);
Serial.println(" *C\t      ");

//Sensor 3
Serial.print("Umidade 3: ");
Serial.print(h4);
Serial.print(" %\t");
Serial.print("Temperatura 3: ");
Serial.print(t4);
Serial.println(" *C\t ");

//Sensor 4
Serial.print("Umidade 4: ");
Serial.print(h5);
Serial.print(" %\t");
Serial.print("Temperatura 4: ");
Serial.print(t5);
Serial.println(" *C\t ");

//Sensor água
Serial.print("Temperatura água: ");
Serial.print(temperatura);
Serial.println(" *C ");
    Serial.println(" ");
// Wait a few seconds between measurements.
delay(5000);
}
```

APÊNDICE D– DADOS DE TEMPERATURA, UMIDADE, EFETIVIDADE E ERROS RELATIVOS

Tabela 10 – Parâmetros avaliados para a placa de buchas alinhadas.

	TBSE	TBSS	TAMB	URE%	TBUE	ED	ERR TBUE	ERR ED
0:00	30	30	30	49	22,11982	0	1,92816386	0,12883
0:15	29	27	30	63	23,57517	0,368675	1,9826802	1,206256
0:30	29	27	29	60	23,09696	0,338808	1,96878372	0,012769
0:45	29	26	28	62	23,41662	0,537309	1,97805674	0,036235
1:00	29	26	28	61	23,25723	0,522396	1,97342376	0,032225
0:00	28	26	28	60	22,19839	0,344732	1,96157874	0,014929
0:15	28	26	28	60	22,19839	0,344732	1,96157874	0,014649
0:30	28	27	28	64	22,82055	0,193071	1,98073216	0,007043
0:45	28	26	28	62	22,51104	0,364368	1,97118712	0,018301
1:00	28	26	28	60	22,19839	0,344732	1,96157874	0,014671
0:00	28	28	28	57	21,7229	0	1,94708811	0,001255
0:15	28	26	28	59	22,0408	0,335616	1,95675629	0,013148
0:30	28	26	28	62	22,51104	0,364368	1,97118712	0,018229
0:45	28	26	28	60	22,19839	0,344732	1,96157874	0,014614
0:00	31	31	32	55	24,04108	0	1,96240706	0,001057
0:15	31	29	31	55	24,04108	0,287401	1,96240706	0,007347
0:30	32	29	32	54	24,74297	0,413392	1,96712869	0,013175
0:45	31	29	32	54	23,8669	0,280383	1,95824935	0,006662
1:00	31	29	32	54	23,8669	0,280383	1,95824935	0,005925
0:00	32	31	32	53	24,56351	0,134472	1,9632568	0,002214
0:15	31	29	32	54	23,8669	0,280383	1,95824935	0,006824
0:30	31	29	32	55	24,04108	0,287401	1,96240706	0,007564

Fonte: Autor (2022)

Tabela 11 - Parâmetros avaliados para a placa de buchas cruzadas

	TBSE	TBSS	TAMB	URE%	TBUE	ED	ERR TBUE	ERR ED
0:00	31	31	32	48	22,79238	0	1,93439983	0,118756
0:15	31	28	32	52	23,51457	0,400779	1,95006013	0,617284
0:30	31	28	32	49	22,97527	0,373845	1,93820322	0,008153
0:45	32	28	32	51	24,20022	0,512835	1,95569409	0,016535
1:00	32	28	32	52	24,38261	0,525114	1,95944258	0,018246
0:00	31	30	32	53	23,69142	0,136825	1,95413146	0,002442
0:15	31	29	32	53	23,69142	0,273651	1,95413146	0,006256

0:30	31	29	31	56	24,214	0,294724	1,96659847	0,008374
0:45	31	29	31	58	24,55627	0,310379	1,97506055	0,010244
0:00	31	31	31	59	24,72571	0	1,9793215	0,001578
0:15	30	28	31	58	23,66495	0,315704	1,96720614	0,010747
0:30	30	28	31	59	23,83074	0,324188	1,97166165	0,011872
0:45	30	28	30	59	23,83074	0,324188	1,97166165	0,011842
1:00	30	28	30	59	23,83074	0,324188	1,97166165	0,010735
0:00	29	29	29	57	22,61051	0	1,95485023	0,001399
0:15	29	28	29	58	22,77364	0,160607	1,95949376	0,003772
0:30	28	26	29	61	22,35513	0,354304	1,96638981	0,016449
0:45	28	26	29	60	22,19839	0,344732	1,96157874	0,014747
0:00	29	29	29	61	23,25723	0	1,97342376	0,001625
0:15	28	26	29	62	22,51104	0,364368	1,97118712	0,018356
0:30	28	26	29	62	22,51104	0,364368	1,97118712	0,018262

Fonte: Autor (2022)

Tabela 12 - Parâmetros avaliados para a placa de celulose

	TBSE	TBSS	TAMB	URE%	TBUE	ED	ERR TBUE	ERR ED
0:00	30	30	31	53	22,8193215	0	1,945170849	0,155152585
0:15	30	26	31	59	23,8307413	0,648376	1,971661645	0,781014917
0:30	30	26	31	57	23,4981117	0,615206	1,96276079	0,034490279
0:45	30	26	32	55	23,1610958	0,584889	1,95391764	0,027924564
1:00	30	26	32	53	22,8193215	0,55705	1,945170849	0,022770551
0:00	32	32	32	51	24,2002222	0	1,955694092	0,000975056
0:15	31	27	32	55	24,0410762	0,574802	1,962407062	0,026940937
0:30	31	27	32	56	24,213997	0,589449	1,966598473	0,029892291
0:45	31	26	32	54	23,8668996	0,700957	1,958249347	0,037647678
1:00	30	26	31	55	23,1610958	0,584889	1,95391764	0,028667987
0:00	32	31	33	52	24,3826099	0,131279	1,959442584	0,002155613
0:15	31	27	32	55	24,0410762	0,574802	1,962407062	0,027009218
0:30	31	27	32	55	24,0410762	0,574802	1,962407062	0,026998842
0:00	31	30	32	54	23,8668996	0,140191	1,958249347	0,002609878
0:15	31	27	32	57	24,3857113	0,604751	1,970817996	0,033266515
0:30	31	27	32	57	24,3857113	0,604751	1,970817996	0,033266515
0:00	32	31	32	54	24,7429678	0,137797	1,967128688	0,002407817
0:15	31	27	32	55	24,0410762	0,574802	1,962407062	0,026988943
0:30	31	27	31	55	24,0410762	0,574802	1,962407062	0,026988943
0:45	30	26	31	55	23,1610958	0,584889	1,95391764	0,027924564

Fonte: Autor (2022)