



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE TEÓRICO/EXPERIMENTAL DE DESSECANTE EM UM SISTEMA
SOLAR TÉRMICO. ESTUDOS DE CASO: SÍLICA-GEL, CARVÃO ATIVADO E
BENTONITA**

NÓRTON LEONARDO TEODÓRIO RAFAEL

CAMPINA GRANDE - PB

2025

NÓRTON LEONARDO TEODÓRIO RAFAEL

DISSERTAÇÃO

**ANÁLISE TEÓRICO/EXPERIMENTAL DE DESSECANTE EM UM SISTEMA
SOLAR TÉRMICO. ESTUDOS DE CASO: SÍLICA-GEL, CARVÃO ATIVADO E
BENTONITA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador:

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande - PB, fevereiro de 2025

R136a Rafael, Nórton Leonardo Teodório.

Análise teórico/experimental de dessecante em um sistema solar térmico estudos de caso: sílica-gel, carvão ativado e bentonita / Nórton Leonardo Teodório Rafael. – Campina Grande, 2025.

123 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2025.

“Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima”.

Referências.

1. Energia Solar. 2. Dessecantes – Análise Teórico/Experimental. 3. Eficiência Térmica. 4. Simulação Experimental. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

UFMG/BC

CDU 620.97(043.3)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-15/225

**ANALISE TEÓRICO/EXPERIMENTAL DE DESSECANTE EM UM SISTEMA SOLAR TÉRMICO,
ESTUDOS DE CASO: SÍLICA-GEL, CARVÃO ATIVADO E DENTONITA**

NÓRTON LEONARDO TEODÓRIO RAFAEL

Dissertação Aprovada em 26/02/2025 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:



Prof. Dr. ANTONIO GILSON BARBOSA DE LIMA
(ORIENTADOR)



Prof. Dr. RICARDO SOARES GOMES
(EXAMINADOR EXTERNO)



Prof.ª. Dr.ª. IVONETE BATISTA DOS SANTOS
(EXAMINADORA EXTERNA)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada família, em especial a meu pai Antônio e minha mãe Lourdes, cuja amorosa presença, apoio incondicional e ensinamentos foram fundamentais para minha jornada e conquistas.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, sabedoria e resiliência ao longo desta jornada. Agradeço por ter me guiado nos momentos mais difíceis, por me abençoar com oportunidades e pela constante presença em minha vida, que me deu a coragem necessária para superar os desafios e seguir em frente com confiança e determinação. Sem Sua graça e proteção, este trabalho não seria possível.

Ao meu pai, Antônio Teodoro, e à minha mãe, Maria de Lourdes, por todo o amor, apoio incondicional e pelos ensinamentos. Agradeço por acreditarem em mim em todos os momentos e por serem exemplos de determinação e generosidade. Tudo o que sou hoje é fruto do cuidado e dos valores que me transmitiram ao longo da vida.

A minha irmã Vitória Eduarda, cuja presença e carinho me inspiram diariamente. Sua amizade, apoio e incentivo constantes são uma força imensurável em minha vida, e sou profundamente grato por tê-la ao meu lado em cada conquista e desafio.

A Amanda Ricela, minha companheira, por sua paciência, compreensão e incentivo em cada passo desta caminhada. Seu amor e apoio foram essenciais para que eu pudesse manter o foco e a motivação durante esse processo.

Aos amigos Marcos Abrantes, Rostand Barros e família, por me apoiarem desde o começo desta jornada, nas noites de estudos para buscar a aprovação nas disciplinas.

Ao professor Antonio Gilson B. Lima, meu orientador, por sua orientação e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua paciência e comprometimento foram essenciais para que eu pudesse alcançar os resultados esperados, e sou imensamente grato por todo o incentivo que me deu ao longo desta jornada.

Ao professor Marcelo Grilo, meu antigo orientador, por seu valioso conhecimento, conselhos e exemplo profissional, que deixaram uma marca indelével em minha trajetória acadêmica.

A Thiago Farias, Jonatas Kinas e Kleriton Barbosa, por me ajudar nos experimentos.

A banca examinadora, composta pelo professor Ricardo Soares Gomez e pela professora Ivonete Batista dos Santos, por suas contribuições valiosas para o aprimoramento deste trabalho.

A UFCG *campus* Campina Grande, pelo local disponibilizado para realização de estudos e experimentos, junto com seu corpo docente, em especial aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica pelos conhecimentos repassados.

A CAPES, pelo apoio financeiro dado durante estes anos de pós-graduação.

*Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito. Não
sou o que deveria ser, mas, Graças a Deus, não
sou o que era antes (Martin Luther King).*

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo realizar uma análise experimental de um coletor solar utilizando três tipos de materiais dessecantes do ar aquecido: sílica-gel, carvão ativado e bentonita, com a intenção de otimizar o processo de transferência de calor e melhorar o desempenho térmico do sistema. A metodologia adotada incluiu o reaproveitamento de um protótipo de secador solar, conectado a um sistema de medição e aquisição de dados (SMAD) com seis pontos de medição. As medições de temperatura e umidade relativa do ar de secagem foram realizadas utilizando um microcontrolador Arduino Mega 2560, acoplado a uma placa de distribuição desenvolvida para este projeto e sensores DHT22 intercambiáveis. Os resultados mostraram que embora as temperaturas dentro da unidade dessecante tenham se mostrado semelhantes e dentro do coletor solar tenham se mostrado diferentes, a umidade relativa do ar variou consideravelmente com o uso de dessecantes. No teste com sílica-gel, dentro do coletor solar, a umidade relativa mais baixa foi de aproximadamente 7,9 %, enquanto no sistema com carvão ativado foi cerca de 9,6 %, e com bentonita, 10,2%. Com base nos dados coletados, foram realizados cálculos termodinâmicos fundamentados na primeira lei da termodinâmica, resultando em um rendimento térmico médio de 46 % para sílica-gel, 34% para carvão ativado e 22% para bentonita. Conclui-se que a sílica-gel apresentou o maior rendimento térmico, sendo mais eficiente que os demais dessecantes testados, conforme demonstrado pelas medições do SMAD e pelas análises teóricas.

Palavras-chave: Energia Solar, Dessecantes, Eficiência Térmica; Simulação, Experimental.

ABSTRACT

The present study aims to conduct an experimental analysis of a solar collector using three types of desiccant materials for heated air: silica gel, activated carbon, and bentonite, with the intention of optimizing the heat transfer process and improving the system's thermal performance. The adopted methodology included the reuse of a solar dryer prototype, connected to a data acquisition and measurement system (SMAD) with six measurement points. Temperature and relative humidity measurements of the drying air were performed using an Arduino Mega 2560 microcontroller, coupled with a distribution board developed for this project and interchangeable DHT22 sensors. The results showed that, although the temperatures inside the desiccant unit were similar and those inside the solar collector differed, the relative humidity of the air varied considerably with the use of desiccants. In the test with silica gel inside the solar collector, the lowest relative humidity was approximately 7.9%, while in the system with activated carbon it was about 9.6%, and with bentonite, 10.2%. Based on the collected data, thermodynamic calculations were performed based on the first law of thermodynamics, resulting in an average thermal efficiency of 46% for silica gel, 34% for activated carbon, and 22% for bentonite. It is concluded that silica gel exhibited the highest thermal efficiency, being more effective than the other tested desiccants, as demonstrated by SMAD measurements and theoretical analyses.

Keywords: Solar Energy, Desiccants, Thermal Efficiency, Simulation, Experimental.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Aplicações de energia solar	18
Figura 2.2 – Radiação solar global diária – Média anual típica	19
Figura 2.3 – Matriz elétrica do Brasil em 2019	20
Figura 2.4 – Matriz elétrica do Brasil em 2018	20
Figura 2.5 – Espectro Eletromagnético	21
Figura 2.6 – Propriedades da Irradiação	22
Figura 2.7 – As estações do ano nos hemisférios	23
Figura 2.8 – Processos de radiação solar com alguns elementos da atmosfera	24
Figura 2.9 – Comparação entre coletores solares em usos diferentes	25
Figura 2.10 – Classificação dos secadores solares	25
Figura 2.11 – Termo-higrômetro residencial	27
Figura 2.12 – Linha do tempo Arduino	30
Figura 2.13 – Arduino MEGA 2560 e seus componentes	31
Figura 2.14 – Modelo psicrométrico de um processo de desumidificação usando dessecantes	34
Figura 2.15 – Etapas do processo de desumidificação com dessecantes	35
Figura 2.16 – Representação da cadeia molecular da sílica-gel x Sistema de secagem Térmica	36
Figura 2.17 – Leito de sílica-gel	37
Figura 2.18 – Informativo do uso de dessecante no Forte Orange	38
Figura 2.19 – Esquema de um secador que utiliza carvão vegetal	39
Figura 2.20 – Amostra de carvão ativado	39
Figura 2.21 – Amostra de bentonita	41
Figura 3.1 – Protótipo de coletor solar de exposição direta com cobertura convexa.	44
Figura 3.2 – Construção do coletor solar	45
Figura 3.3 – Limpeza e pintura do equipamento utilizado por Conceição (2022)	47
Figura 3.4 – Sistema de controle de rotação criado por Conceição (2022)	50
Figura 3.5 – Termo-anemômetro digital	48
Figura 3.6 – Plataforma AT MEGA 2560 (Arduino MEGA 2560)	48
Figura 3.7 – Módulos RTC DS3231 e leitor/gravador Micro SD Card	49
Figura 3.8 – Módulo DHT 22 e conexão com cabo manga	49

Figura 3.9 – Display 4x20 com I2C	50
Figura 3.10 – Esquema de conexões com protoboard	51
Figura 3.11 – Placa “SHIELD” Datalogger do SMAD	52
Figura 3.12 – Componentes do SMAD	53
Figura 3.13 – Cabos manga e conectores das unidades sensoras DHT22	54
Figura 3.14 – SMAD instalado dentro do case	54
Figura 3.15 – Display do SMAD em configuração da hora e data de exibição	55
Figura 3.16 – Edifício Professor Júlio Goldfarb, sede do LEMT/UFCG	56
Figura 3.17 – Foto do Solarium do LEMT/UFCG em um dia de experimento	57
Figura 3.18 – Posicionamento do SMAD durante os testes e experimentos	57
Figura 3.19 – Posicionamento de sensores ao longo do sistema	58
Figura 3.20 – Termômetro laser digital infravermelho, ao lado do anemômetro e da balança de precisão	59
Figura 3.21 – Dia do Experimento com destaque para a tabela de monitoramento	60
Figura 3.22 – Estação meteorológica do LEIAM/UFCG	61
Figura 3.23 – Pirômetro do LEIAM/UFCG	61
Figura 3.24 – Trechos do sistema separados para calcular o rendimento térmico	62
Figura 3.25 – Vista superior da unidade dessecante, carregada com bentonita	63
Figura 3.26 – Processo de regeneração de leitos de sílica-gel transparente e colorida	63
Figura 3.27 – Anemômetro digital utilizado neste trabalho	64
Figura 3.28 – Exemplo da tabela do CATT3, após inserir os dados de temperatura e umidade relativa, na função psychrometrics.	65
Figura 3.29 – Volumes de controle utilizados para o cálculo termodinâmico	69
Figura 3.30 – Esquema da radiação incidente sobre o coletor solar	71
Figura 4.1 – Histórico transiente do ar em diferentes pontos do sistema para o experimento com sílica-gel	73
Figura 4.2 – Histórico transiente da umidade relativa do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com sílica-gel.	74
Figura 4.3 – Histórico transiente da umidade absoluta do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com sílica-gel	75
Figura 4.4 – Histórico transiente do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com sílica-gel	76
Figura 4.5 – Histórico transiente do fluxo de calor recebido pelo ar em diferentes trechos do sistema térmico para o experimento com sílica-gel	77

Figura 4.6 – Histórico transiente da radiação solar no coletor para o experimento com sílica-gel	78
Figura 4.7 – Histórico transiente do rendimento térmico do coletor pra o experimento com sílica-gel	79
Figura 4.8 – Histórico transiente da temperatura do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com carvão ativado	84
Figura 4.9 – Histórico transiente da umidade relativa do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com carvão ativado	82
Figura 4.10 – Histórico transiente da umidade absoluta do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com carvão ativado	83
Figura 4.11 – Histórico transiente da entalpia do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com carvão ativado	84
Figura 4.12 – Histórico transiente do fluxo de calor recebido pelo ar em diferentes trechos do sistema térmico para o experimento com carvão ativado	85
Figura 4.13 – Histórico transiente da radiação solar no coletor para o experimento com carvão ativado	86
Figura 4.14 – Histórico transiente do rendimento térmico do coletor para o experimento com carvão ativado	87
Figura 4.15 – Histórico transiente da temperatura do ar em diferentes pontos do sistema térmico para bentonita	96
Figura 4.16 – Histórico transiente da umidade relativa do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com bentonita	90
Figura 4.17 – Histórico transiente da umidade absoluta do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com bentonita	91
Figura 4.18 – Histórico transiente da entalpia do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com bentonita	92
Figura 4.19 – Histórico transiente do fluxo de calor recebido pelo ar em diferentes trechos do sistema térmico para o experimento com bentonita	93
Figura 4.20 – Histórico transiente da radiação solar no coletor para o experimento com bentonita	94
Figura 4.21 – Histórico transiente do rendimento térmico para o experimento com bentonita	103
Figura 4.22 – Gráfico comparativo do desempenho dos materiais dessecantes aplicados ao sistema térmico coletor solar e unidade dessecante	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Rendimento térmico dos diferentes sistemas de secagem	26
Tabela 3.1 – Dimensões e características do protótipo estudado	46
Tabela 3.2 – Monitoramento manual de dados experimentais	59
Tabela 3.3 – Registro dos experimentos com dessecantes aplicados ao coletor solar.	67
Tabela 4.1 – Médias resultantes do experimento com sílica-gel	80
Tabela 4.2 – Médias resultantes do experimento com carvão ativado	88
Tabela 4.3 – Médias resultantes do experimento com bentonita	96

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	13
1 INTRODUÇÃO.....	14
CAPÍTULO II.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Energia solar	17
2.1.1 Fundamentos.....	17
2.1.2 Radiação térmica	21
2.2 Coletor solar	24
2.3 Secador solar	25
2.3.1 Secador solar de exposição direta.....	27
2.4 Sistemas eletrônicos de medição de temperatura e umidade.....	27
2.4.1 O Arduino: características gerais.....	28
2.4.2 Arduino: linha do tempo.....	30
2.5 Desumidificação do ar	34
2.5.1 Sílica-gel	36
2.5.2 Carvão ativado	38
2.5.3 Bentonita	41
CAPÍTULO III.....	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1 Materiais e equipamentos.....	45
3.2 Equipamentos.....	45
3.2.1 O coletor solar.....	45
3.2.2 O SMAD e suas características.....	50
3.3 Metodologia experimental.....	58
3.3.1 Localização	58
3.3.2 Medição e tratamento de dados.....	60
3.3.3 Medição da energia solar	63
3.3.4 Procedimentos experimentais	64
3.4 Análise energética do sistema térmico.....	68

3.4.1 Conservação da massa	68
3.4.2 Conservação de energia	69
3.4.3 Fluxo mássico	70
3.4.4 Determinação das propriedades termodinâmicas do ar.....	73
CAPÍTULO IV	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
4.1 Análise dos resultados experimentais.....	75
4.1.1 Experimento utilizando sílica-gel como material dessecante.....	75
4.1.2 Experimento utilizando carvão ativado como material dessecante.....	84
4.1.3 Experimento utilizando bentonita como material dessecante.....	92
CAPÍTULO V.....	101
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
REFERÊNCIAS.....	104
APÊNDICE A	108
APÊNDICE B.....	117

CAPÍTULO I
INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos pré-históricos, o uso de fontes de energia tem sido fundamental para a humanidade. Ao longo da história, o ser humano tem buscado maneiras de sobreviver com longevidade e qualidade. Por isso, a importância da busca do conhecimento científico, a fim de ter impacto significativo no progresso humano tem uma finalidade. Atualmente, priorizar o uso eficiente dos recursos naturais, a eficiência energética e a sustentabilidade são fundamentais, especialmente para aqueles que buscam melhorar sistemas energéticos, como os sistemas termodinâmicos. Assim, há diversas formas de contribuir com esses objetivos, além de explorar novas tecnologias que possam tornar os sistemas termodinâmicos mais eficientes.

Após a Revolução Industrial, que ocorreu na segunda metade do século XVIII, houve uma grande demanda por carvão mineral e outros recursos energéticos para impulsionar a produção. Com o surgimento das máquinas à vapor e do motor de combustão interna, a necessidade de combustíveis fósseis aumentou significativamente. No entanto, à medida que os estudos avançavam, ficou claro que as reservas de combustíveis fósseis são limitadas e que, com o aumento do consumo, especialmente a partir do final do século XX, as reservas conhecidas não seriam capazes de suprir essa demanda. Como resultado, os preços desses combustíveis derivados do petróleo dispararam. Dessa forma, surgiu uma busca por novas formas de substituir as fontes de energia fósseis por fontes renováveis, como a energia solar e eólica, que apresentam um baixo impacto ambiental (Conceição, 2022).

A melhoria das tecnologias relacionadas às fontes renováveis de energia é fundamental para fortalecer o conceito de sustentabilidade e beneficiar tanto as áreas urbanas quanto as rurais. Esses avanços têm sido observados em muitos países, incluindo o Brasil, que se destaca nesse aspecto (Grilo, 2007). O Brasil possui uma localização geográfica privilegiada, com uma abundância excepcional de energia solar. Para que o progresso do país ocorra de maneira sustentável e o insira em um mercado cada vez mais competitivo, é fundamental incentivar o desenvolvimento tecnológico (Costa, 2022).

O Brasil é o terceiro maior produtor de frutas do mundo, com uma produção que ultrapassa 44 milhões de toneladas (FAO, 2020). No entanto, a produção voltada para a agroindústria ainda é limitada, pois os produtores estão mais focados no mercado de frutas frescas. Nesse contexto, destaca-se o mercado de frutas desidratadas, pois mantém as características do produto natural, tem custos de transporte reduzidos e são menos suscetíveis à proliferação de microrganismos que reduziriam sua vida útil (Conceição, 2022).

Os secadores solares são amplamente utilizados para desidratação de produtos, como frutas e grãos, proporcionando diversas vantagens, como a prolongação da vida útil dos alimentos. O processo de secagem reduz a atividade bacteriana, retardando a degradação dos produtos agrícolas, possibilitando ao produtor rural um produto com boa qualidade e maior valor agregado. Além disso, os secadores solares podem ser aplicados no beneficiamento de minérios, contribuindo para a eficiência energética, redução do impacto ambiental e a diminuição dos custos de processo (Gomes, 2015; Fernandes, 2021).

Os sistemas de secagem solar atualmente em uso utilizam ar quente oriundo do aquecedor solar, garantindo o fornecimento de calor útil para o sistema e contribuindo para a eficiência do processo, ao manter uma fonte contínua de energia térmica sustentável.

Contudo, uma das variáveis mais importantes no processo de secagem, além da temperatura, é a umidade relativa do ar, pois ela influencia diretamente a taxa de evaporação da água, a eficiência do processo e a qualidade final do material.

Neste sentido, estudos relacionados com a diminuição da umidade relativa do ar e o aumento da temperatura tornam-se cruciais, pois permitem otimizar o processo térmico, reduzir o tempo necessário para a remoção da umidade e melhorar a eficiência energética do sistema.

Diante disto, estudos utilizando dessecantes do ar de secagem têm sido reportados na literatura (Gomes, 2015; Nunes, 2016), contudo sem avaliar o processo com diferentes tipos de dessecantes e a performance energética do sistema térmico, justificando novos estudos neste tema.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo geral estudar o efeito do uso de materiais dessecantes do ar de secagem no desempenho de um coletor solar para secagem de ar, contribuindo para o avanço nessa área do conhecimento.

Como objetivos específicos podemos citar:

- Desenvolver um sistema de secagem solar.
- Desenvolver um sistema de medição automática de temperatura e umidade relativa baseado em Arduino.
- Realizar experimentos de aquecimento do ar de secagem com diferentes materiais dessecantes (sílica-gel, carvão ativado e bentonita).
- Desenvolver uma modelagem matemática baseando-se na 1ª Lei da termodinâmica para avaliar a eficiência térmica do sistema térmico em estudo.

CAPÍTULO II
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão abordados tópicos relacionados a coletores solares e aos sistemas de medição de temperatura e umidade, com foco nos sistemas eletrônicos que envolvem microcontroladores. Além disso, enfatiza-se, a energia solar, destacando estudos recentes sobre o desenvolvimento de secadores solares e a utilização de dessecantes do ar no processo de secagem solar.

2.1 Energia solar

2.1.1 Fundamentos

Segundo Grilo (2007), o Sol é a principal fonte em relação a todas as outras fontes de energia. É a partir da energia solar que as plantas e os animais se desenvolvem, e seus resíduos são responsáveis pela geração de fontes não renováveis, como petróleo, carvão e gás natural. Além disso, a radiação solar induz a movimentação do ar, gerando ventos que são aproveitados pela energia eólica, e causa a evaporação da água, possibilitando a energia hidrelétrica. Portanto, a energia solar é a origem quase exclusiva de todas as outras formas de energia.

A energia solar, além de ser uma fonte de energia limpa em termos de impacto ambiental, é totalmente gratuita e não se sujeita às variações de preço de outras formas de energia. Ela pode ser transformada e empregada de várias formas, como na geração de eletricidade, aquecimento, refrigeração, transporte, iluminação e energia mecânica. Ademais, a maior parte das técnicas empregadas para utilizar a energia solar gera poucos impactos ambientais (Gomes, 2021).

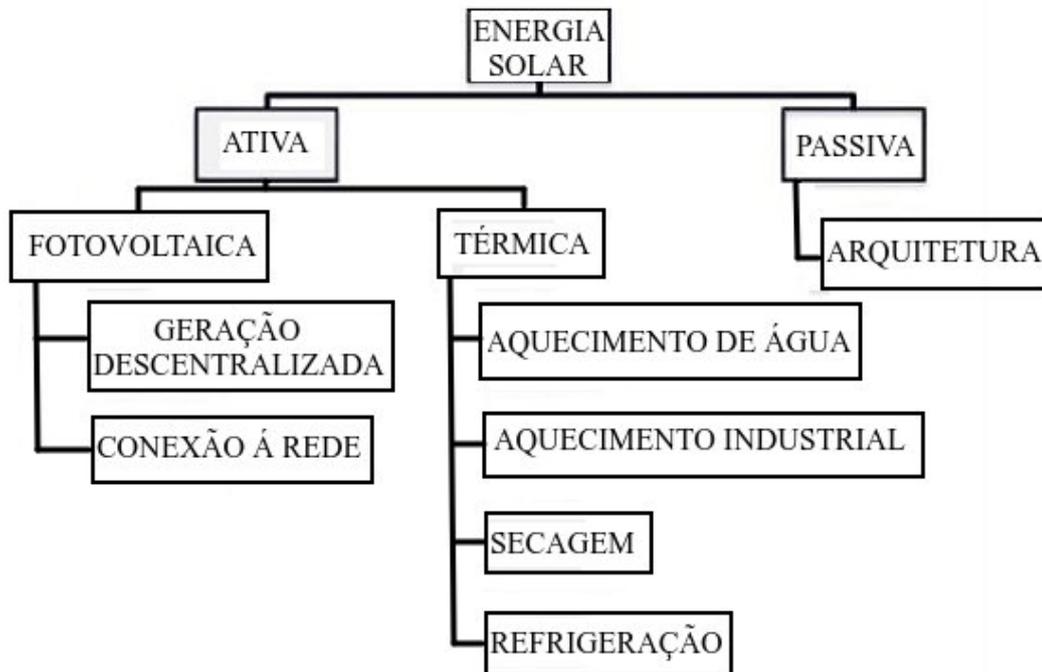
Segundo Fernandes (2021), a energia solar oferece diversas vantagens para uma nação, pois gera uma matriz energética mais limpa, diminuindo assim as emissões de gases que intensificam o efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis.

Em meio ao contexto atual de aquecimento global, aumento dos preços dos combustíveis fósseis e escassez de recursos naturais, a energia solar está ganhando destaque e se tornando uma das melhores alternativas para a geração de energia, devido à sua natureza limpa, renovável e abundante.

Conforme Melo (2016), durante um ano, a Terra recebe cerca de $1,74 \times 10^{11}$ GWh de energia solar, enquanto o consumo energético anual da população global é de aproximadamente $1,5 \times 10^8$ GWh. Isso significa que a energia solar que atinge o planeta Terra é cerca de mil vezes superior ao consumo energético humano. Dentre as áreas com maior exposição à radiação solar, a América do Sul, a África e a Austrália se sobressaem, apresentando uma média anual de radiação solar que varia de 1.826 kWh/m^2 a 2.264 kWh/m^2 . Os sistemas modernos de captação solar convertem a energia solar em eletricidade, como nos sistemas fotovoltaicos, ou em energia térmica, utilizada para aquecer líquidos.

A utilização da energia solar térmica não se limita ao aquecimento de água, podendo ser empregada também em processos de dessalinização, secagem de grãos, produção de vapor e até mesmo na produção de eletricidade, expandindo suas utilizações no setor industrial. Conforme Pereira *et al.* (2003), a utilização da energia solar pode ser categorizada em duas categorias principais: energia solar ativa e energia solar passiva, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Aplicações da Energia Solar.



Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2003).

A energia solar fotovoltaica converte a energia solar diretamente em eletricidade através da radiação que incide em painéis com diversas células conversoras. Esta é uma maneira nobre de utilizar a energia solar, porém ainda exige um investimento inicial significativo.

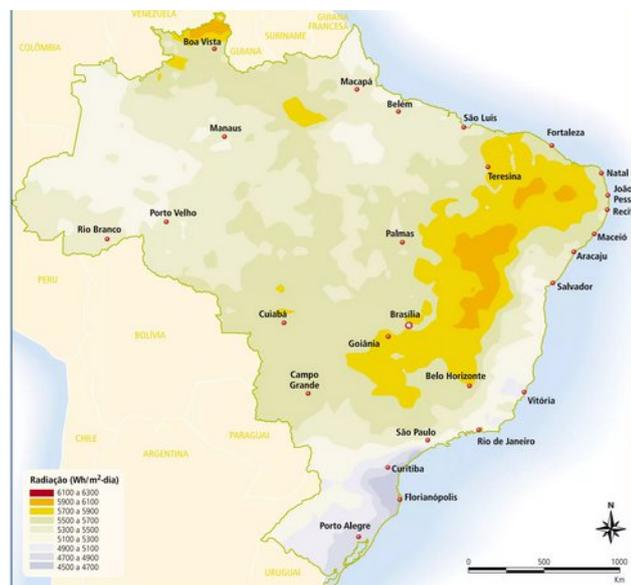
Tanto a energia solar térmica quanto a fotovoltaica, podem ser empregadas em projetos de arquitetura focados na melhoria das condições ambientais locais, com o objetivo de reduzir o consumo de energia e água, enfatizando a ventilação, a iluminação natural e a coleta de água pluvial. Esta estratégia, conhecida como "arquitetura verde", está sendo cada vez mais implementada por especialistas em arquitetura e engenharia (Fernandes, 2021).

Em contrapartida, a energia solar térmica, também conhecida como fototérmica, transforma diretamente a energia solar em calor, através de coletores e concentradores, sendo utilizada para aquecer fluidos em geral, especialmente a água para substituir o chuveiro elétrico e para aquecer o ar ambiente utilizado em processos de secagem. Conforme Prado *et al.* (2007), a energia solar térmica representa uma alternativa técnica e economicamente viável, que permite:

- a) diminuição do consumo de energia elétrica nas residências brasileiras;
- b) ajuste da curva de carga das empresas concessionárias de energia;
- c) implementação de medidas através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Devido à sua localização intertropical, o Brasil desfruta de uma distribuição uniforme de irradiação solar incidente, com uma média geralmente alta, como demonstrado na Figura 2.2. Além disso, os níveis mais elevados de radiação solar são encontrados na região Nordeste, destacando-se especialmente no Vale do São Francisco (Pereira *et al.*, 2003).

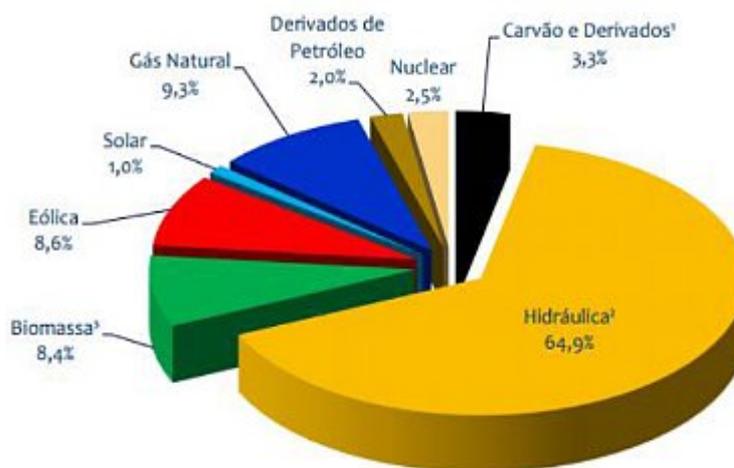
Figura 2.2 – Radiação Solar Global Diária – Média Anual Típica.



Fonte: Pereira *et al.* (2003).

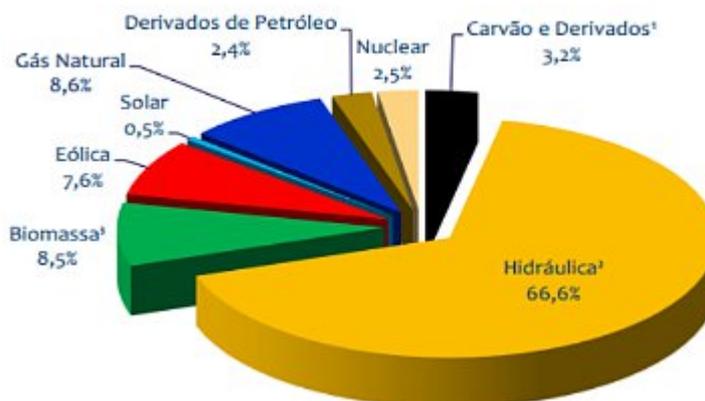
Apesar da abundância de energia solar no Brasil, sua contribuição para a matriz energética nacional ainda é modesta. Segundo um relatório da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia e com dados de 2019, a energia solar representou apenas 1% do total de energia consumida no país, como evidenciado na Figura 2.3. Entretanto, esse percentual tem aumentado progressivamente ao longo do tempo. Em 2018, por exemplo, a participação da energia solar na matriz elétrica brasileira era de apenas 0,5%, conforme ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.3 – Matriz elétrica do Brasil em 2019.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2020).

Figura 2.4 – Matriz elétrica do Brasil em 2018.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2020).

2.1.2 Radiação térmica

De acordo com Incropera *et al.* (2019), todos os corpos que possuem temperatura não nula, diferente de 0, emitem radiação, e seu transporte não requer a presença de um meio material. Quanto à natureza desse transporte, ele pode ser entendido como um conjunto de partículas conhecidas como fótons ou quanta, ou por meio da propagação de ondas eletromagnéticas. Independentemente da forma e do meio de transporte, a radiação é atribuída às propriedades das ondas, caracterizadas por frequências (ν) e comprimentos de onda (λ). A relação entre frequência e comprimento de onda é expressa pela Equação 1:

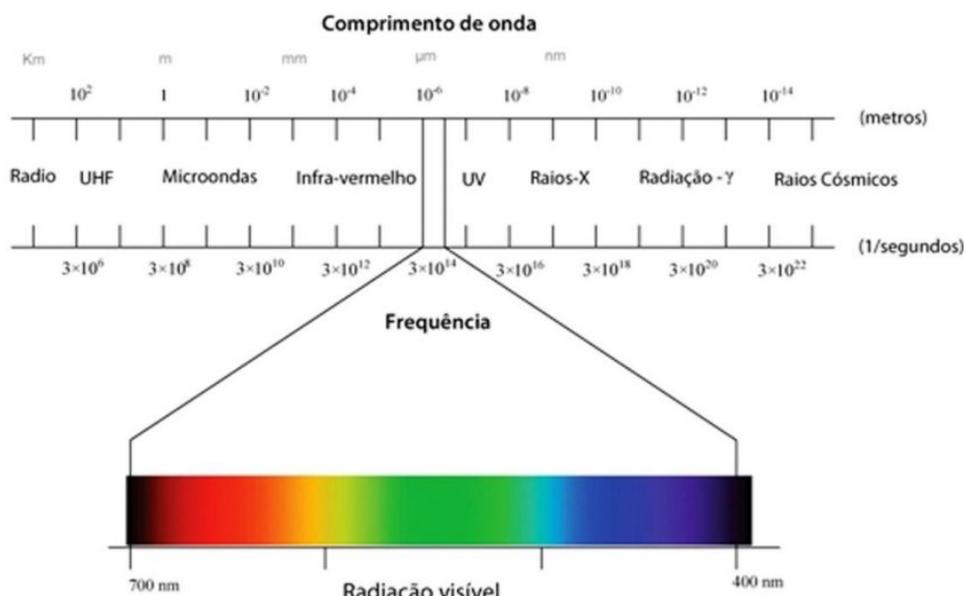
$$c = \lambda\nu \quad (1)$$

onde:

- c é a velocidade de propagação da luz, igual a 3×10^8 m/s.
- λ é o comprimento de onda em μm (micrômetros).
- ν é a frequência em Hz (Hertz).

As possíveis frequências de radiação são visualizadas no espectro eletromagnético retratado na Figura 2.5. É possível notar a distinção entre as diferentes regiões, denominadas como bandas, no qual a diferença está exclusivamente no comprimento de onda.

Figura 2.5 – Espectro Eletromagnético.



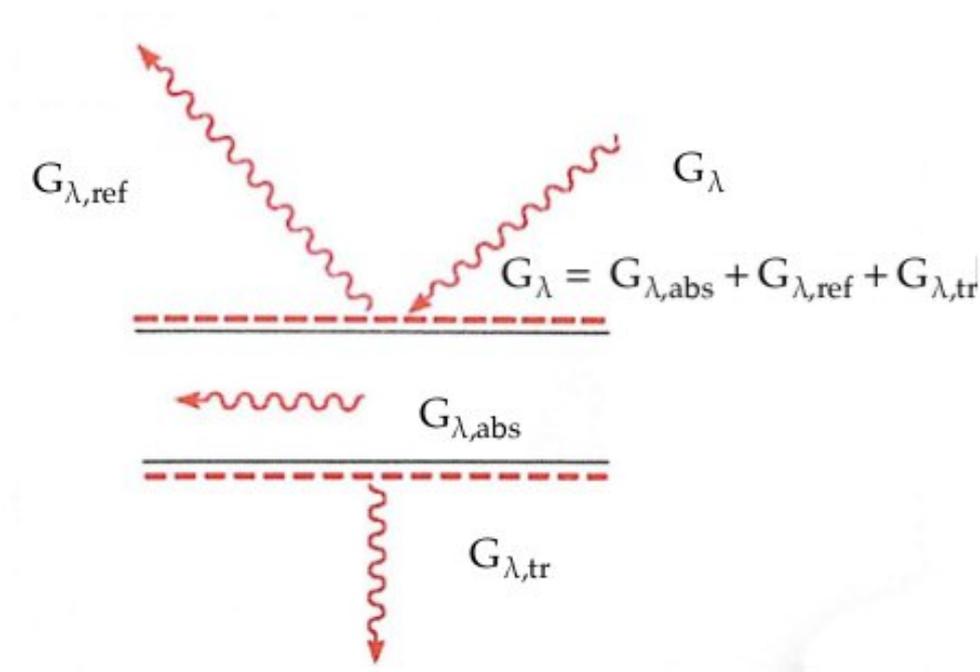
Fonte: Grilo (2007).

Quando emitida pelo Sol, a radiação solar se propaga na forma de radiação eletromagnética, abrangendo diversas faixas de comprimento de onda. A radiação solar que alcança a superfície da Terra, ao nível do solo, possui comprimentos de onda na faixa de 0,10 a 2,50 micrômetros, predominantemente composta por radiação ultravioleta, visível e infravermelha (Grilo, 2007).

A disponibilidade e a viabilidade do recurso energético solar estão diretamente ligadas a conceitos astronômicos, como a posição relativa entre o Sol e a Terra, bem como ao movimento aparente da Terra. Além disso, estão associadas a processos físicos, como o comportamento diferenciado dos vários comprimentos de onda da radiação solar ao interagir de maneira distinta com os componentes atmosféricos, incluindo processos de absorção e espalhamento.

Conforme Incropera *et al.* (2019), a taxa na qual a radiação de comprimento de onda λ atinge uma superfície por unidade de área da superfície e por unidade de intervalo de comprimento de onda ao redor de λ é denominada irradiação espectral G_λ ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$). Ao interagir com um meio semitransparente, como água ou policarbonato, parte da irradiação pode ser refletida, absorvida e transmitida, conforme ilustrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Propriedades da Irradiação.

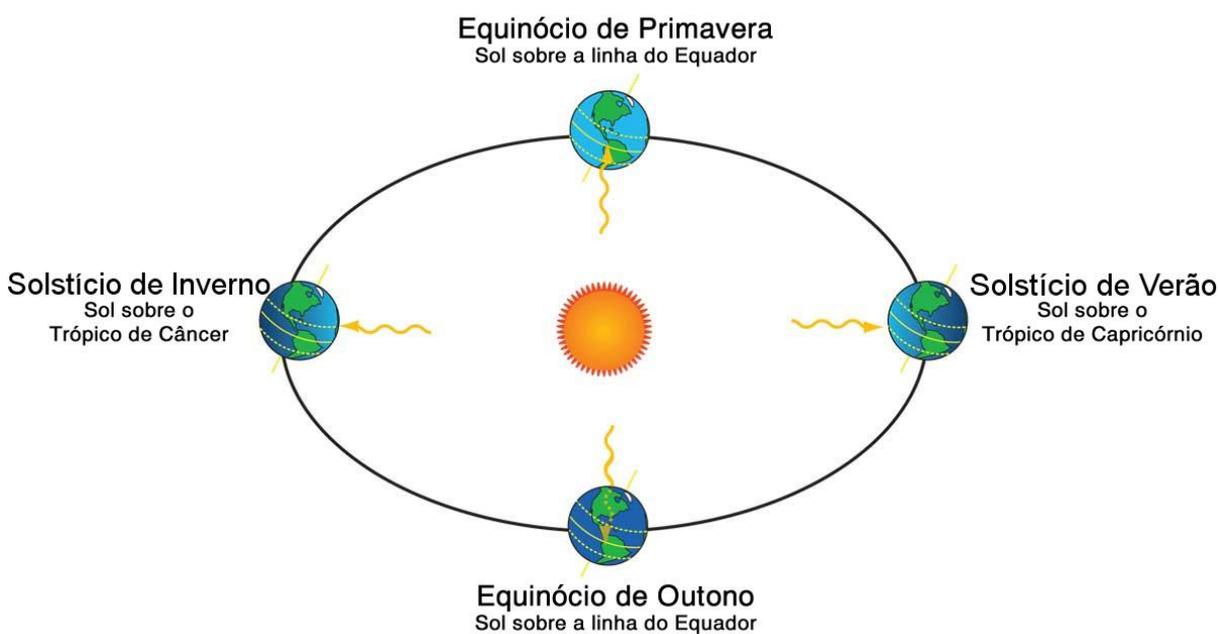


Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2019).

A radiação que atinge a superfície terrestre está diretamente relacionada à duração do dia, que por sua vez, é influenciada pelas estações do ano. Astronomicamente, as estações são determinadas pelo momento em que o Sol atinge sua maior declinação em latitude em relação à linha imaginária do Equador, evento conhecido como solstício, e pelo instante em que cruza o Equador terrestre em sua órbita aparente, evento denominado equinócio, como ilustrado na Figura 2.7.

Durante os períodos de equinócio, a duração do dia é igual à duração da noite em ambos os hemisférios, resultando em incidência de radiação solar com intensidade igual nos dois hemisférios (Pereira *et al.*, 2003).

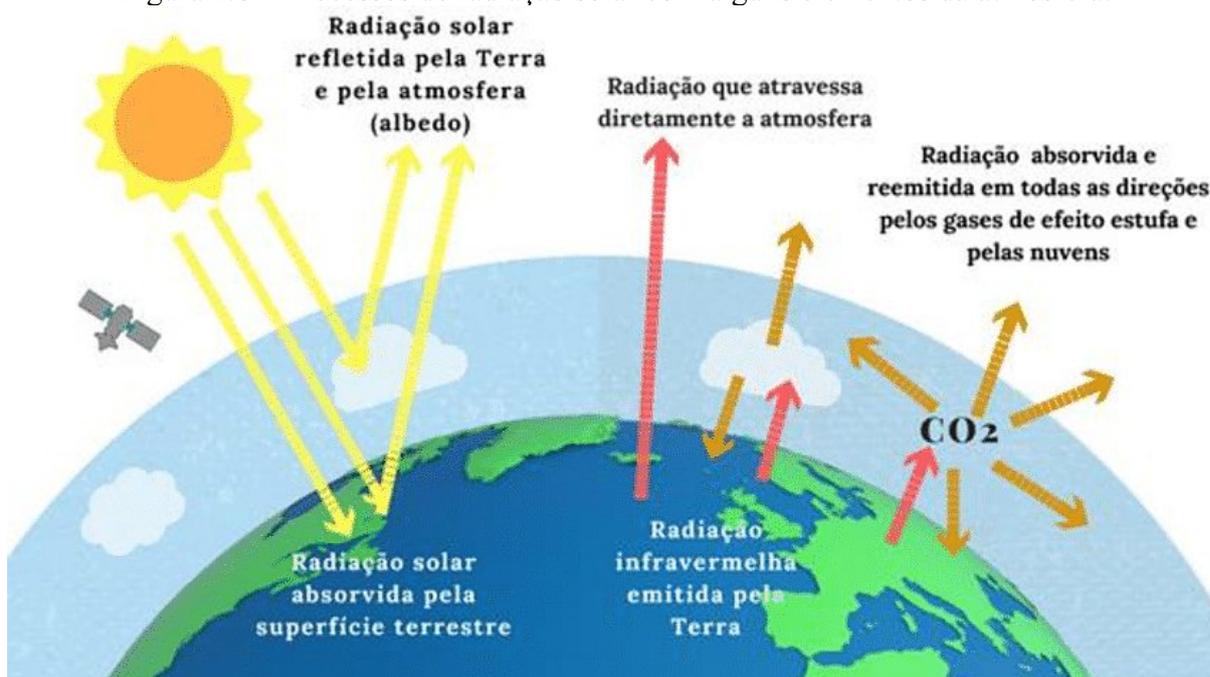
Figura 2.7 – As estações do ano nos hemisférios.



Fonte: Pereira *et al.* (2003).

Na Figura 2.8 estão ilustrados os fenômenos físicos de espalhamento e absorção da radiação solar causados pelos componentes da atmosfera e pela superfície terrestre. Tais processos alteram o espectro eletromagnético da radiação solar à medida que ela atravessa a atmosfera. Estima-se que aproximadamente 25% da radiação solar alcança a superfície terrestre sem sofrer interferências (Pereira *et al.*, 2003).

Figura 2.8 – Processos de radiação solar com alguns elementos da atmosfera.



Fonte: Pereira *et al.* (2003).

2.2 Coletor solar

O coletor solar é um aparelho que capta a energia proveniente da radiação solar, transforma essa energia em calor e o transfere para um fluido de trabalho, normalmente ar, água ou óleo, através de sua estrutura. Este aquecimento do fluido de trabalho é causado pela absorção da radiação solar pelo elemento do coletor encarregado dessa tarefa, cuja variação pode ser influenciada pelo tipo de coletor empregado.

No momento, há uma variedade de coletores solares, com diversos formatos e usos. Entre eles pode-se citar coletores solares utilizados nas indústrias alimentares, utilizados para produzir alimentos desidratados para diversas utilizações, incluindo o transporte em longas distâncias e a criação de novos subprodutos. Na Figura 2.9, ilustra-se uma comparação entre um coletor solar usado para o aquecimento de água em residências e um coletor solar utilizado para secar frutas e grãos.

Figura 2.9 – Comparação entre coletores solares em usos diferentes.



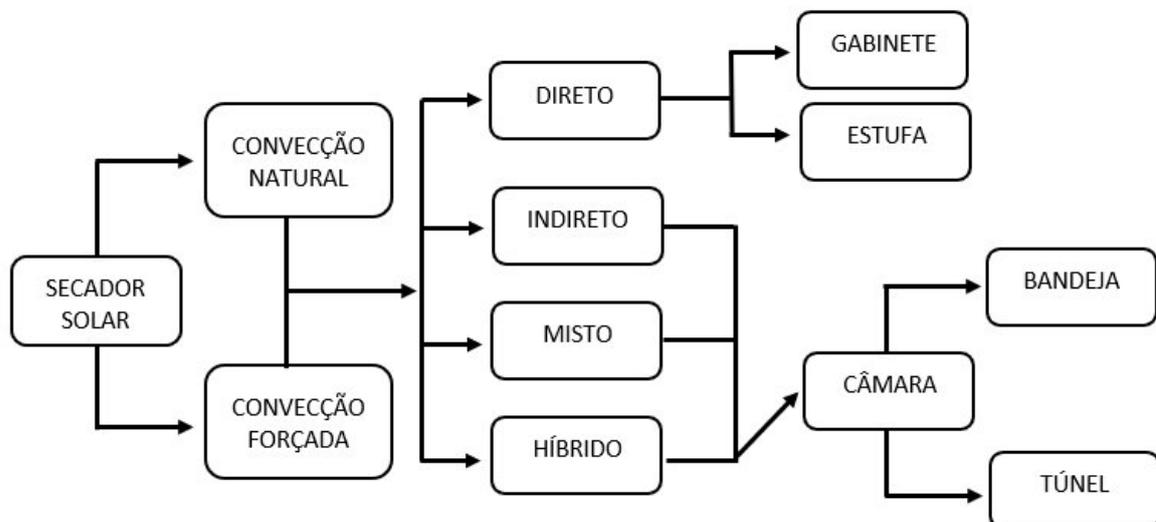
Fonte: Adaptado de Coelho *et al.* (2018).

2.3 Secador solar

Every e Stanley, em 1976, criaram o primeiro modelo de secador solar, um dispositivo em forma de caixa onde o produto a ser seco era colocado e a tampa era transparente (Kumar *et al.*, 2016). Desde esse período, os pesquisadores têm se empenhado em melhorar os secadores solares, com o objetivo de obter rendimentos superiores.

Conforme descrito por Kumar *et al.* (2016), os secadores solares podem ser categorizados em diferentes tipos, conforme ilustrado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Classificação dos secadores solares.



Fonte: Adaptado de Kumar *et al.* (2016).

A principal diferença entre os secadores de convecção natural e forçada está na presença de uma fonte externa que promove um fluxo de ar constante, como por exemplo, o uso de um resfriador, bomba ou ventilador na entrada ou saída do secador. Em contrapartida, no secador de convecção natural, a movimentação do ar ocorre apenas devido ao efeito de termossifão: o ar aquecido, de menor densidade, deixa o secador levando a umidade extraída do produto, o que permite a entrada de ar mais fresco e menos úmido na câmara de secagem (Venkateswarlu; Reddy, 2024). Esse ar adicional é aquecido e elimina mais umidade do produto, até que o processo de secagem esteja finalizado (Conceição, 2022).

O único componente do secador solar de exposição direta é o coletor solar, que também atua como câmara de secagem. Neste recipiente, as frutas são acondicionadas e expostas à luz solar durante todo o procedimento de secagem. Por outro lado, o secador solar indireto é basicamente formado por duas partes: o coletor solar e a câmara de secagem. Neste modelo de secador, o ar é aquecido através do coletor solar, enquanto as frutas são mantidas em uma câmara isolada da radiação solar. Por outro lado, o secador solar misto (ou híbrido) utiliza tanto a energia solar quanto uma outra fonte de energia, como a energia elétrica ou o gás liquefeito de petróleo (GLP). A eficiência térmica média desses secadores solares é de aproximadamente 50%, o que indica um desempenho relativamente baixo.

Na Tabela 2.1 apresenta-se os sistemas de secagem mencionados, destacando o rendimento térmico aproximado de cada um. Os dados fornecem uma visão comparativa das eficiências térmicas alcançadas, permitindo avaliar a performance de diferentes soluções de secagem sob condições semelhantes.

Tabela 2.1 – Rendimento térmico dos diferentes sistemas de secagem.

Sistema de Secagem	Rendimento Térmico
Exposição direta	20 a 40%
Exposição indireta	13 a 25%
Híbrido	17 a 29%

Fonte: Kumar *et al.* (2016).

2.3.1 Secador solar de exposição direta

O equipamento de secagem solar de exposição direta é bem simples, de fácil instalação, operação e manutenção. É basicamente composto por três componentes principais: o coletor, que pode ser uma caixa feita de qualquer material disponível; a bandeja, onde o produto úmido é colocado para secar; e a cobertura do secador, que lhe dá o aspecto de uma estufa.

Segundo a FAO (2022), Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura, em 2020 o Brasil foi o terceiro maior produtor de frutas do mundo. No entanto, a produção voltada para a agroindústria ainda é limitada, voltada ao mercado de frutas frescas.

Há algum tempo, no LEMT (UFCG), o Grupo de Pesquisa em Energia e Desenvolvimento Sustentável da UFCG (GEDS) vinha desenvolvendo e aperfeiçoando secadores solares de baixo custo, com o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável regional e atender às necessidades da agricultura familiar.

Os primeiros dispositivos foram fabricados em MDF, sofrendo modificações na cobertura, na forma do coletor e na quantidade de bandejas. Após novos estudos envolvendo materiais como perfil de alumínio, observou-se melhorias na fabricação e no custo do trabalho (Conceição, 2022).

Com o tempo, além de propor modificações nos secadores, o GEDS expandiu suas pesquisas em sistemas envolvendo a melhora da qualidade do ar de secagem, como evidenciado nos trabalhos de Nunes (2016), Melo (2016), Fernandes (2021), Costa (2022) e Conceição (2022). Além disso, buscou-se facilitar as medições dos parâmetros envolvidos durante os experimentos.

2.4 Sistemas eletrônicos de medição de temperatura e umidade

Neste tópico, será feito um breve resumo sobre alguns sistemas utilizados para medir temperatura e umidade de forma experimental. Um dos sistemas mais conhecidos é o termo-higrômetro (Figura 2.11) que, apesar de amplamente utilizado, apresenta limitações, como a presença de apenas um ponto de medição e a conexão com apenas um tipo de sensor. Além disso, a maioria dos modelos de termo-higrômetro não possui capacidade de armazenamento eletrônico das medições realizadas.

Figura 2.11 – Termo-higrômetro residencial.



Fonte: Arquivo do pesquisador, 2024.

Contudo, os sistemas de secagem envolvem múltiplos pontos de medição, tanto de temperatura quanto de umidade relativa do ar de secagem. Nesse contexto, a plataforma Arduino surge como uma solução eficiente, permitindo a aquisição de dados em vários pontos e viabilizando o armazenamento eletrônico das informações coletadas.

2.4.1 O Arduino: características gerais

O Arduino é uma plataforma de computação física ou embarcada de código aberto, fundamentada em hardware e software de fácil manuseio, capaz de processar as entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos ligados a ele. O Arduino foi inovador ao introduzir um hardware totalmente gratuito, atraindo um grande número de indivíduos interessados em desenvolvê-lo e colaborar com ele (Dilly, 2015).

É frequentemente empregado na elaboração de diversos projetos, que englobam automação, robótica e muito mais. A sua popularidade é principalmente justificada pela simplicidade de uso, juntamente com as comunidades engajadas e sempre prontas para compartilhar projetos, códigos e artigos online, o que contribui de maneira significativa para o desenvolvimento de novos projetos.

O surgimento do Arduino teve origem na busca por uma solução acessível e facilitadora para a integração de estudantes de design em tecnologia no Interaction Design Institute, na cidade de Ivrea, Itália. Em 2005, o professor Massimo Banzi e David Cuartielles, um

pesquisador visitante da Universidade de Malmö, na Suécia, ambos procurando uma solução semelhante, deram os primeiros passos na criação do que viria a ser conhecido como Arduino.

Na época, os produtos disponíveis eram caros e relativamente difíceis de usar. Banzi e Cuartielles decidiram então desenvolver um microcontrolador que pudesse ser utilizado pelos estudantes de arte e design em seus projetos. Dois fatores principais guiaram esse desenvolvimento: a plataforma deveria ser acessível a qualquer pessoa e ter um custo reduzido. Cuartielles projetou uma placa, enquanto um aluno de Banzi, David Mellis, programou o software para operar essa placa. Para a produção inicial de duzentas placas, Banzi contratou um engenheiro local, Gianluca Martino, conforme detalhado por Evans, Noble e Hochenbaum (2013) (Dilly, 2015).

A placa recebeu o nome de Arduino em referência a um bar local frequentado por membros do corpo docente e alunos do instituto, chamado "Bar Di Re Arduino", em homenagem ao Rei Arduin que governou a Itália no ano de 1002 d.C.. As placas foram inicialmente vendidas em forma de kit para que os alunos pudessem montar seus próprios projetos. A primeira tiragem foi rapidamente vendida, e mais unidades foram produzidas para atender à demanda crescente. A popularidade do Arduino cresceu rapidamente quando o público em geral percebeu que o hardware era fácil de usar, de baixo custo e poderia ser aplicado em uma variedade de projetos, além de servir como uma excelente introdução à programação de microcontroladores. O projeto original foi aprimorado ao longo do tempo e novas versões foram introduzidas para atender às novas necessidades, devido a constante evolução dos usuários.

O Arduino tem um hardware simples, mas bastante eficiente, possibilitando a conexão de uma variedade de periféricos, incluindo displays, botões, sensores, LEDs, buzzers, e outros componentes eletrônicos, como eletrodomésticos. Além disso, é compatível com diversas "shields", que são placas adicionais conectadas sobre a Placa de Circuito Impresso (PCB).

2.4.2 Arduino: linha do tempo

O Arduino Mega 2560 é uma placa microcontroladora que se destaca dentro da família Arduino por sua potência e capacidade ampliada. Baseada no microcontrolador ATmega2560, esta placa oferece uma quantidade significativamente maior de pinos de entrada e saída, bem como uma memória mais extensa, quando comparada a modelos mais básicos, como o Arduino Uno.

Essas características tornam o Arduino Mega 2560 especialmente adequado para projetos de maior complexidade, onde são necessários múltiplos sensores, displays, e capacidades avançadas de comunicação. Devido à sua versatilidade e robustez, o Mega 2560 é amplamente utilizado em diversas aplicações, desde automação residencial até robótica avançada, sistemas de aquisição de dados e prototipagem de produtos eletrônicos.

Ao longo dos anos, a comunidade de desenvolvedores e engenheiros observam o surgimento de uma ampla gama de placas microcontroladoras dentro da plataforma Arduino. Cada novo modelo trouxe consigo melhorias e adaptações para atender às necessidades específicas de diversos projetos e aplicações. Entre todas essas placas, o modelo Arduino Mega 2560 tem se destacado e é amplamente utilizado, inclusive neste trabalho específico.

Com suas portas de entrada e saída digitais e analógicas, o Arduino Mega 2560 facilita a integração de múltiplos dispositivos, possibilitando o controle preciso e a aquisição de dados em tempo real. Além disso, sua compatibilidade com diversas bibliotecas e módulos amplifica sua aplicabilidade em projetos de monitoramento contínuo e automação inteligente.

Na Figura 2.12 apresenta-se uma linha do tempo que ilustra a evolução dos modelos mais icônicos de Arduino, destacando aqueles que mais contribuíram para o avanço da eletrônica e da prototipagem. Essa linha do tempo não só contextualiza o desenvolvimento do Arduino Mega 2560, mas também celebra a rica história de inovação contínua desta plataforma, que se tornou um marco para criadores, engenheiros e educadores ao redor do mundo. Desde os primeiros modelos, que iniciaram a revolução da prototipagem de baixo custo, até os mais recentes, cada versão tem trazido novas capacidades e facilitado a implementação de projetos mais complexos.

Figura 2.12 – Variações do Arduino ao longo do tempo.



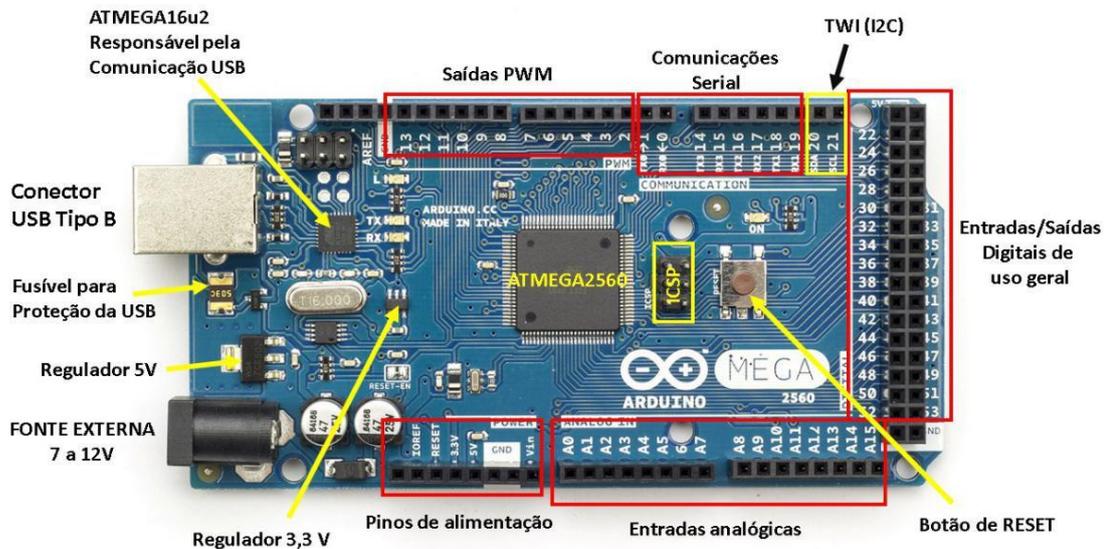
Fonte: <https://www.makerhero.com/blog/o-que-e-arduino/>

O maior diferencial entre o Arduino Uno e seus antecessores é a inclusão de um microcontrolador programado ATmega328, que funciona como um conversor USB-para-serial. Isso significa que o Uno tem a capacidade de ser reprogramado para emular outros dispositivos USB, como mouse, teclado ou joystick. Ele possui 14 pinos de E/S digitais, dos quais 6 oferecem saída PWM, e 6 pinos de entrada analógica. Cada pino de E/S pode suportar uma corrente DC de até 20 mA, enquanto o pino de 3.3V pode fornecer uma corrente contínua de até 50 mA. Em termos de memória, o Arduino Uno tem 32 KB de memória flash, com 0.5 KB dedicados ao bootloader, 2 KB de SRAM e 1 KB de EEPROM. Sua velocidade de clock é de 16 MHz. Essas especificações fornecem uma base sólida para uma variedade de projetos e aplicações de prototipagem com o Arduino Uno (Dilly, 2015).

Por outro lado, o Arduino Mega 2560 possui um microcontrolador ATmega2560. Ele opera com uma tensão de 5V e suporta uma faixa de entrada recomendada de 7 a 12V, com limites de 6 a 20V. O Mega 2560 oferece 54 pinos de E/S digitais, dos quais 15 suportam modulação por largura de pulso (PWM), além de 16 pinos de entrada analógica. A corrente máxima por pino de E/S é de 20 mA, enquanto o pino de 3.3V pode fornecer até 50 mA de corrente contínua. Em termos de memória, o Mega 2560 possui 256 KB de memória flash, dos quais 8 KB são reservados para o bootloader, 8 KB de SRAM e 4 KB de EEPROM. Sua velocidade de clock é de 16 MHz. Essas são as características distintivas do Arduino Uno e do Arduino Mega 2560 (Arduino, 2023).

Devido a maior quantidade de portas de conexões, possuindo o melhor custo-benefício, o Mega 2560 (Figura 2.13), tem sido utilizado como o instrumento de medição de temperatura e umidade, dentro de intervalos de tempos definidos durante o experimento. Os principais componentes do Arduino Mega 2560 são:

Figura 2.13 – Arduino MEGA 2560 e seus componentes.



Fonte: <https://embarcados.com.br/arduino-mega-2560>

- **Microcontrolador:** O microcontrolador é o componente central do Arduino, funcionando como seu cérebro. Trata-se de um circuito integrado capaz de executar instruções programadas, que são escritas em linguagens de programação como C ou C++. No contexto do Arduino, o microcontrolador mais comum é o ATmega, fabricado pela Atmel (agora parte da Microchip Technology). Ele possui memória flash para

armazenar o código, SRAM para dados temporários e EEPROM para armazenamento persistente.

- **Conector USB:** O conector USB permite a comunicação entre o Arduino e um computador. Ele é usado para carregar o código de programação na memória do microcontrolador e também pode fornecer energia à placa. Este conector segue o padrão USB 2.0, garantindo compatibilidade com a maioria dos computadores modernos.
- **Pinos de entrada e saída:** Os pinos de entrada e saída (I/O) são terminais que permitem a interface do Arduino com o mundo externo. Pinos digitais podem ser configurados como entrada ou saída, enquanto pinos analógicos são utilizados para ler sinais de sensores que variam continuamente dentro de um intervalo de valores. O número de pinos disponíveis varia conforme o modelo do Arduino, como o Arduino Uno, que possui 14 pinos digitais e 6 analógicos.
- **Pinos de alimentação:** Estes pinos fornecem diferentes tensões de saída (por exemplo, 3.3V, 5V) que podem ser usadas para alimentar sensores e outros componentes eletrônicos conectados ao Arduino. Além disso, o pino GND (terra) completa o circuito, permitindo o retorno da corrente elétrica.
- **Botão Reset:** O botão reset reinicia o microcontrolador, interrompendo a execução atual do código e reiniciando-o do início. Isso é útil durante o desenvolvimento e a depuração, permitindo que o desenvolvedor recomece o programa sem desconectar e reconectar a fonte de alimentação.
- **Conversor Serial-USB e LEDs TX/RX:** O conversor Serial-USB é um chip, como o FT232 da FTDI ou o CH340 da WCH, que facilita a comunicação entre o computador e o microcontrolador através da porta USB. Os LEDs TX (transmitir) e RX (receber) fornecem feedback visual sobre a transmissão de dados, indicando atividade de comunicação serial.
- **Conector de alimentação:** O conector de alimentação permite que o Arduino seja alimentado por uma fonte externa, como uma bateria ou um adaptador AC-DC. Este conector aceita tensões de entrada que variam entre 7 e 20 Volts, mas a recomendação é usar 9 Volts para evitar sobreaquecimento e garantir uma operação estável.
- **LED de alimentação:** O LED de alimentação é um indicador visual que mostra se a placa está recebendo energia e está operacional. Ele é útil para verificar rapidamente se

o Arduino está corretamente alimentado.

- **LED interno:** O LED interno, frequentemente conectado ao pino digital 13, é uma ferramenta útil para testes rápidos. Ele permite que os desenvolvedores verifiquem se o Arduino está funcionando corretamente ao piscar o LED com simples comandos de programação, facilitando a depuração inicial.

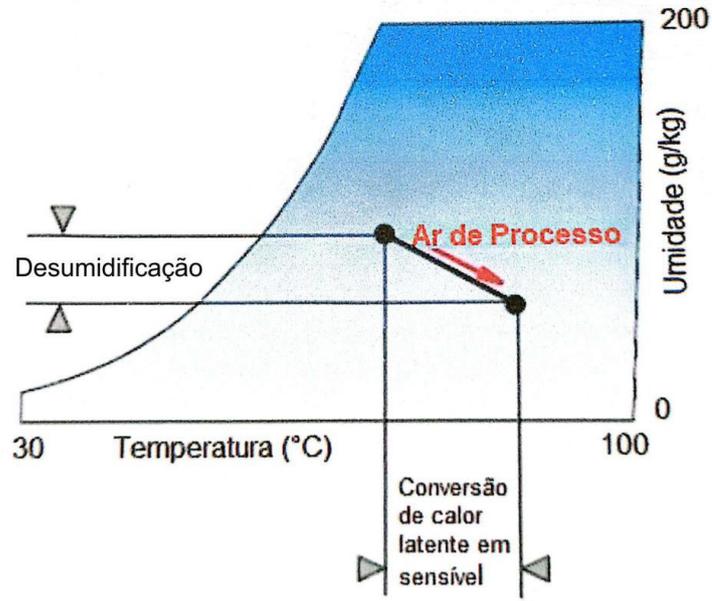
2.5 Desumidificação do ar

Os desumidificadores dessecantes funcionam de maneira significativamente diferente dos desumidificadores que utilizam o método de resfriamento. Em vez de reduzir a temperatura do ar para provocar a condensação da umidade, os desumidificadores dessecantes empregam materiais que atraem o vapor d'água presente no ar. Esse processo cria uma área de baixa pressão de vapor na superfície do material dessecante. Como consequência, a pressão do vapor d'água no ar se torna relativamente mais alta, fazendo com que as moléculas de água se movam do ar em direção ao dessecante. Esse mecanismo é responsável por efetuar a remoção da umidade do ambiente, contribuindo para a desumidificação eficaz.

A principal característica dos dessecantes é sua baixa pressão de vapor na superfície. Quando o dessecante se encontra em um estado frio e seco, a pressão de vapor em sua superfície é bastante reduzida, o que permite que ele exerça uma forte atração sobre a umidade presente no ar ambiente. Esse fenômeno facilita a absorção da umidade do ar para o dessecante.

O posicionamento de unidades dessecantes em secadores solares varia conforme o tipo de sistema. Em modelos de circulação forçada, o dessecante é colocado próximo a entrada de ar para otimizar a remoção de umidade. Já em sistemas de circulação natural, ele é disposto em locais que maximizem o contato com o ar ascendente, aumentando a eficiência de secagem (Dake *et al.*, 2021). Contudo, à medida que o dessecante começa a absorver a umidade e se torna mais úmido, além de aquecido, a pressão de vapor na sua superfície tende a aumentar. Como consequência, o dessecante começa a liberar vapor de água de volta para o ar circundante, ocorrendo assim uma troca de umidade que pode afetar o equilíbrio do ambiente em torno do dessecante, conforme ilustrado na Figura 2.14 (Fernandes, 2021).

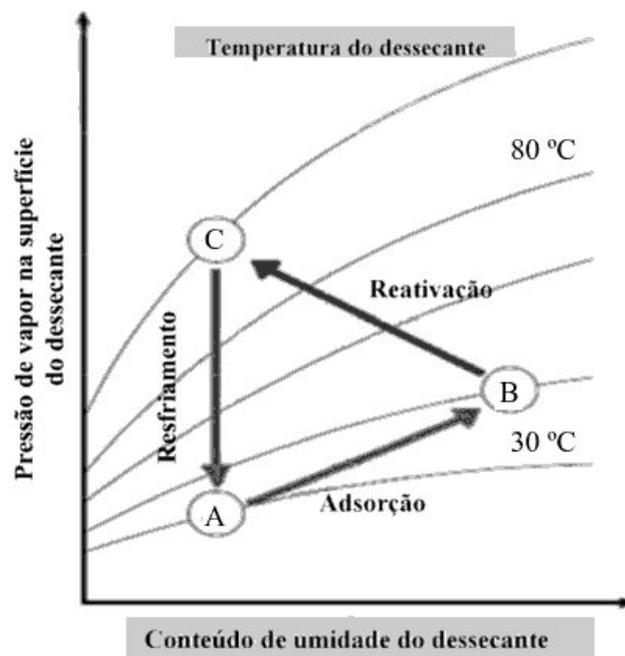
Figura 2.14 – Modelo de um processo de desumidificação por dessecantes aplicado em uma carta psicrométrica.



Fonte: Adaptado Harriman III (2002).

Os desumidificadores dessecantes utilizam as variações de pressão de vapor para desumidificar o ar de forma contínua em um ciclo repetitivo, conforme descrito no equilíbrio simplificado no diagrama da Figura 2.15.

Figura 2.15 – Etapas do processo de desumidificação com dessecantes.



Fonte: Adaptado de Amorim (2012).

O dessecante inicia o ciclo no ponto A, onde sua pressão de vapor superficial é baixa devido ao estado seco e frio. À medida que o dessecante absorve umidade do ar ambiente, sua superfície passa para a condição representada pelo ponto B. Agora, sua pressão de vapor é equivalente à do ar circundante, pois o dessecante está úmido e aquecido.

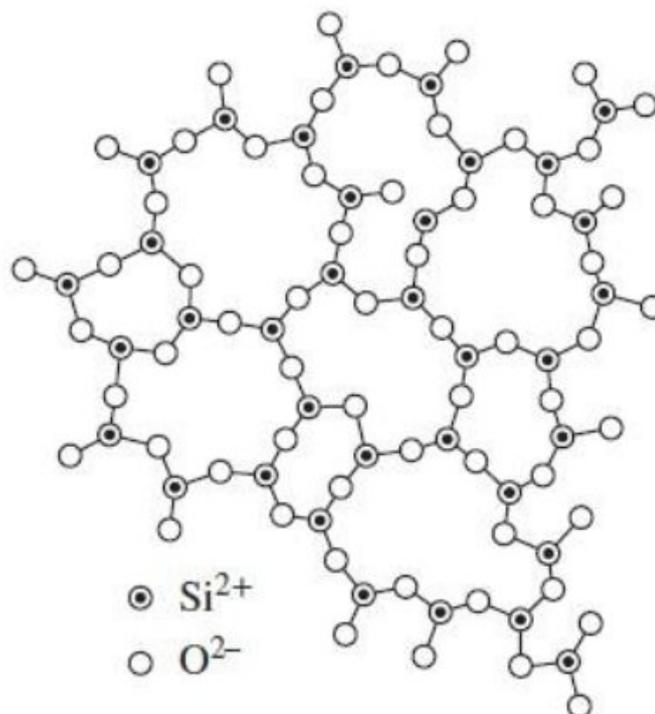
No ponto B, o dessecante não consegue mais absorver umidade, pois não há diferença de pressão entre sua superfície e o vapor no ar. Em seguida, o dessecante é removido do ar úmido, aquecido e colocado em uma corrente de ar diferente. A pressão de vapor na superfície do dessecante torna-se muito alta superior à do ar circundante, fazendo com que o vapor d'água se afaste da superfície em direção ao ar para igualar o diferencial de pressão.

No ponto C, o dessecante está seco, porém, como está aquecido, sua pressão de vapor ainda é muito alta para absorver umidade do ar. Para restaurar sua baixa pressão de vapor, o dessecante é resfriado, retornando-o ao ponto A no diagrama e completando o ciclo para que possa absorver umidade novamente (Harriman III, 2002). Há diferentes tipos de dessecantes, alguns deles serão comentados a seguir.

2.5.1 Sílica-gel

A sílica-gel é um composto sintético e amorfo do silício, constituído por uma rede rígida e contínua de sílica coloidal (Figura 2.16), composta por grãos muito pequenos de SiO_2 hidratado. A presença de hidroxila, na estrutura é um componente crucial para a adsorção, pois é polar e capaz de formar ligações de hidrogênio com óxidos polares, como água e álcool. Cada tipo de gel de sílica possui apenas um tipo de poro, geralmente confinado em canais estreitos. Os diâmetros de poros da sílica-gel são de 2 nm, 3 nm (tipo A) e 0,7 nm (tipo B), com uma área superficial específica variando entre 100 e 1000 m^2/g . A sílica-gel é amplamente utilizada para desumidificação devido à sua alta capacidade de adsorção. O gel de sílica Tipo A pode ser empregado em todas as condições de desumidificação, enquanto o gel de sílica tipo B só é recomendado quando a umidade relativa (UR) é superior a 50% (Ruzhu, 2014).

Figura 2.16 – Representação da cadeia molecular da sílica-gel.



Fonte: Ruhzu (2014).

No processo de adsorção entre água e sílica-gel, a molécula de água se liga ao grupo álcool da sílica, representado por $\text{Si-OH} - \text{OH}_2$, especialmente quando o grau de cobertura da superfície é baixo. À medida que o grau de cobertura da superfície aumenta, a ligação por meio de hidrogênio se torna a força principal de conexão.

O calor de adsorção para essa interação é aproximadamente de 2500 kJ/kg, e a temperatura necessária para a dessorção pode ser bastante baixa, mas acima de 50°C . Cerca de 4 a 6% da água em massa fica ligada a um único grupo hidroxila na superfície do átomo de sílica, e essa ligação não pode ser removida, caso contrário, a capacidade de adsorção da sílica-gel seria comprometida. Portanto, a temperatura de dessorção não deve exceder 120°C e geralmente é mantida abaixo de 90°C .

A temperatura mais baixa observada para a liberação do par sílica-gel-água em experimentos é de aproximadamente 55°C . Essa temperatura de dessorção relativamente baixa é particularmente adequada para aplicações que utilizam energia solar (Ruzhu, 2014).

De acordo com Fernandes (2021), as partículas de sílica-gel têm a capacidade de absorver até 40% do seu peso em água, o que significa que a faixa de vapor de água dentro da sílica-gel varia entre 4% e 40%. Na Figura 2.17 ilustra-se uma massa de sílica-gel com baixa umidade.

Figura 2.17 – Leito de sílica-gel.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

2.5.2 Carvão ativado

A carbonização é um procedimento em que a madeira é exposta a tratamento térmico em temperaturas elevadas, dentro de uma atmosfera controlada e redutora. Esse processo converte a madeira em carvão vegetal por meio de uma decomposição físico-química irreversível, que tem início com a secagem, resultando na perda de água livre ou capilar, além da água de adesão (Cardoso, 2010).

A presença de umidade no carvão vegetal exerce uma influência significativa no desempenho dos processos em que é empregado. O carvão absorve umidade do ambiente, especialmente durante períodos chuvosos, e parte dessa umidade é gradualmente liberada quando exposto à luz solar (Cardoso, 2010).

A densidade do carvão vegetal é uma propriedade crucial, pois influencia o volume ocupado pelo agente redutor nos fornos de redução e gaseificação. Devido à sua alta porosidade, o carvão vegetal é um material com uma porosidade que varia de 70% a 80% (Cardoso, 2010).

Ribeiro (2014) empregou carvão ativado impregnado com prata com o objetivo de obter efeitos bactericidas. Nesse contexto, a autora se valeu da propriedade de adsorção do carvão para reduzir a umidade no ambiente de estudo, enquanto a prata desempenhava sua função antibacteriana no combate aos microrganismos presentes no local.

O primeiro registro, possivelmente, do uso de carvão no Brasil para redução de umidade foi descoberto no Forte de Santa Cruz de Itamaracá (Forte Orange), situado no estado de

Pernambuco (Conceição, 2022). Lá, o carvão foi empregado no chão da casa de pólvora com o intuito de diminuir a umidade no ambiente de armazenamento, conforme ilustrado na Figura 18.

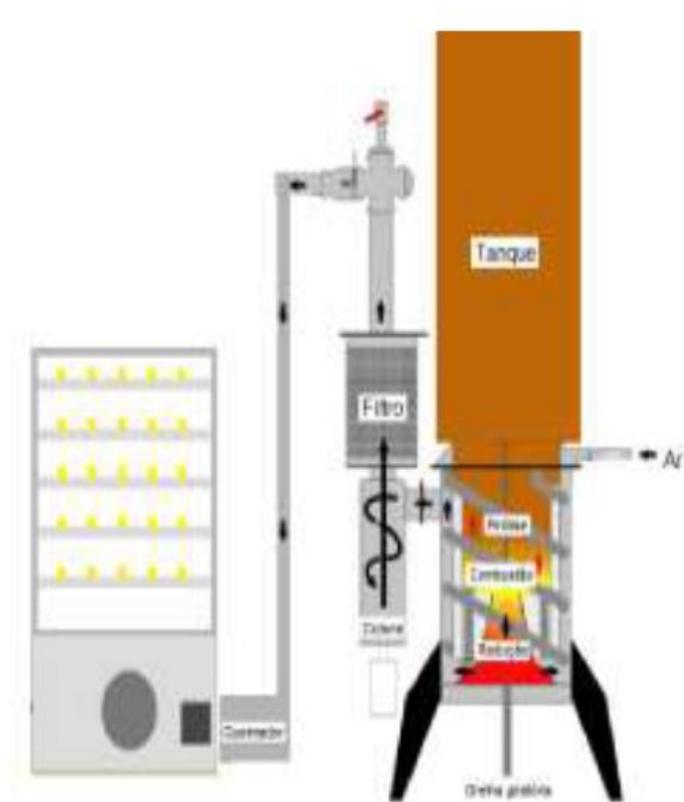
Figura 2.18 – Informativo do uso de dessecante no Forte Orange



Fonte: <https://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-p/09/55/d0/87/forte-orange.jpg>

Oliveira (2011) empregou carvão vegetal em um sistema de aquecimento de ar com o propósito de desidratar banana prata (*Musa sp.*). Isso foi realizado aquecendo o ar de secagem por meio da gaseificação do carvão, ou seja, ela utilizou a combustão do carvão para aquecer o ar que entra no secador. Na Figura 2.19, é demonstrado o modelo do procedimento utilizado para conduzir a secagem.

Figura 2.19 – Esquema de um secador que utiliza carvão vegetal



Fonte: Adaptado de Oliveira (2011).

O carvão ativado é obtido através do processo de ativação, que é um processo que aumenta a porosidade do carvão vegetal, melhorando a adsorção da umidade. Pode ser obtido através da ativação física ou química. Na Figura 2.20, vê-se uma amostra de carvão ativado.

Figura 2.20 – Amostra de carvão ativado.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

No dia a dia, não se usa o carvão ativado como dessecante, mas pode ser encontrado em sistemas de filtragem devido às suas propriedades excepcionais de adsorção. Em muitos lares, ele é utilizado em filtros de água e purificadores de ar. Nos filtros de água, o carvão ativado é eficaz na remoção de impurezas e contaminantes, como cloro, metais pesados e compostos orgânicos, melhorando a qualidade e o sabor da água. Já nos purificadores de ar, ele ajuda a capturar odores desagradáveis, fumaça e compostos químicos voláteis, contribuindo para um ambiente interno mais limpo e saudável.

Além de seu uso em filtragem, o carvão ativado também é utilizado em produtos de cuidados pessoais e higiene. Muitos produtos, como pastas de dente e máscaras faciais, incorporam carvão ativado por suas propriedades de absorção, que ajudam a remover manchas e impurezas da pele e dos dentes. No caso das pastas de dente, ele pode ajudar a clarear os dentes e melhorar a higiene bucal, enquanto em máscaras faciais, promove uma limpeza profunda e ajuda a combater a acne e a oleosidade da pele (Vaz, 2014).

2.5.3 Bentonita

Bentonita é o termo comercial utilizado para designar argilas compostas predominantemente pelo argilomineral montmorilonita, integrante do grupo das esmectitas. As propriedades físico-químicas e tecnológicas dessas argilas são determinadas pela presença da montmorilonita, que confere à bentonita características únicas como a alta capacidade de absorção de água e a plasticidade. A bentonita é um material higroscópico, ou seja, tem a capacidade de absorver e reter a umidade do ambiente circundante (Conceição, 2023).

O nome bentonita origina-se da primeira jazida conhecida dessa argila, localizada em Fort Benton, no Estado de Wyoming, Estados Unidos. Inicialmente, a definição de bentonita estava associada à sua origem geológica, sendo descrita como argilas derivadas de alterações *in situ* de cinzas vulcânicas (Rosário, 2010).

Rosário (2010) conduziu um estudo onde utilizou bentonita tratada com íons de prata para reduzir a atividade microbiana em feridas. Neste contexto, a bentonita desempenhou um papel crucial ao manter o local da ferida seco, enquanto os íons de prata atuaram no combate aos microrganismos presentes. Este estudo demonstra a eficácia da bentonita no processo de adsorção de umidade, evidenciando seu potencial em aplicações biomédicas e de controle microbiano.

Adicionalmente, Shanmugam e Natarajan (2006) desenvolveram um sistema de secagem indireta com convecção forçada e unidade dessecante para a secagem de diversas culturas agrícolas. A unidade dessecante foi projetada para conter 75 kg de material dessecante composto por 60% de bentonita, 10% de cloreto de cálcio, 20% de vermiculita e 10% de cimento. Este arranjo demonstra a versatilidade da bentonita como um componente essencial em sistemas de desidratação devido à sua alta capacidade de absorção de umidade e estabilidade estrutural.

Esses estudos ressaltam a relevância da bentonita (Figura 2.21) em diversas aplicações industriais e tecnológicas, destacando suas propriedades únicas e seu papel significativo em processos de adsorção e controle de umidade.

Figura 2.21 – Amostra de bentonita.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

No dia a dia, o uso da bentonita se destaca em produtos como a terra higiênica para gatos. Esse tipo de areia é amplamente apreciado por suas propriedades de absorção e controle de odores. A bentonita, quando utilizada na composição dessas areias, tem a capacidade de absorver rapidamente a umidade e formar grumos sólidos, facilitando a limpeza da caixa de areia e mantendo o ambiente mais higiênico. Além disso, a bentonita ajuda a controlar os maus odores, proporcionando um espaço mais agradável tanto para os gatos quanto para seus donos.

Pode-se destacar que as propriedades da bentonita a tornam um dessecante altamente eficaz. Devido a sua elevada capacidade de absorção de água, podendo absorver até várias vezes seu peso em água, fazendo com que ela seja extremamente eficiente na remoção de

umidade do ar. A bentonita também se expande ao absorver água e contrai quando seca, permitindo um processo cíclico de absorção e liberação de água que pode ser repetido várias vezes.

Outro ponto importante é que a bentonita é um material não tóxico e amigável ao meio ambiente, sendo segura para uso em várias aplicações, incluindo aquelas que envolvem alimentos e produtos farmacêuticos. Além disso, a bentonita possui estabilidade térmica, mantendo suas propriedades dessecantes em uma ampla faixa de temperaturas, o que a torna adequada para diferentes condições ambientais. No entanto, sua eficácia pode ser influenciada pela presença de outros minerais e impurezas na argila, e sua capacidade de absorção pode diminuir após múltiplos ciclos de umedecimento e secagem (LUZ; OLIVEIRA, 2008).

Além do uso em cuidados com animais de estimação e suas propriedades como dessecante, a bentonita também tem aplicações importantes em cosméticos e produtos de pintura. Em cosméticos, a bentonita é incorporada em vários produtos, como máscaras faciais e cremes, devido às suas propriedades absorventes e purificantes. Desta forma, este material ajuda a remover impurezas, controlar a oleosidade e melhorar a textura da pele, sendo uma escolha popular em tratamentos de beleza.

Na área de pintura, a bentonita é utilizada como um aditivo em tintas e revestimentos para melhorar a viscosidade e a aplicação. Sua capacidade de formar uma estrutura de gel ajuda a garantir uma aplicação uniforme e a estabilidade dos produtos, contribuindo para acabamentos de alta qualidade em diversas superfícies. Essas aplicações demonstram a versatilidade da bentonita e sua importância em uma variedade de contextos cotidianos.

CAPÍTULO III
MATERIAIS E MÉTODOS

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e equipamentos

Para esta pesquisa, os seguintes materiais foram usados:

- Sílica-gel
- Carvão ativado
- Bentonita
- Secador solar
- Sistema de Medição e aquisição de dados

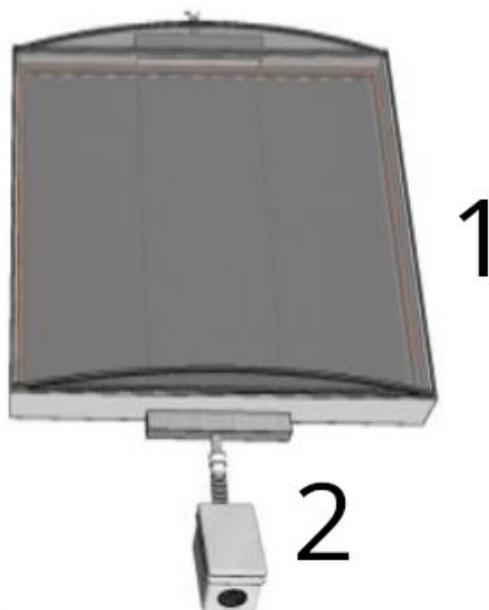
3.2 Equipamentos

3.2.1 O coletor solar

O protótipo desenvolvido neste estudo representa uma evolução dos trabalhos anteriores conduzidos no LEMT, por Conceição (2022) e Fernandes (2021). Eles consistem em secadores solares e sistemas de exposição direta com convecção forçada, ambos com dimensões de 120 cm de comprimento, 90 cm de largura e 12 cm de altura. Uma das características inovadoras desses protótipos é o design da cobertura do sistema de secagem, que utiliza uma cobertura de policarbonato convexa, projetada para aumentar a área de captação da radiação solar incidente.

O sistema apresentado na Figura 3.1 é um coletor solar com cobertura curva, com uma área plana de incidência solar de 1,08 m², uma área de incidência solar curva de 1,176 m² e um volume interno de 201,6 litros.

Figura 3.1 – Protótipo de coletor solar de exposição direta com cobertura convexa.



Fonte: Adaptado de Conceição (2022).

onde:

1. Coletor solar de exposição direta
2. Unidade dessecante com ventilação forçada

A cobertura do coletor é construída com policarbonato alveolar transparente, uma superfície seletiva com uma espessura de 4 mm. A preferência por esse material em detrimento do policarbonato compacto foi motivada pelos espaços de ar entre as duas placas finas e as aletas do policarbonato alveolar, que contribuem para aumentar o isolamento térmico. Em comparação com o vidro, o policarbonato alveolar destaca-se pela sua resistência ao impacto, baixo peso e facilidade de manuseio. Além disso, estudos como o de Toro *et al.* (2015) demonstraram que o policarbonato alveolar transparente apresenta uma transmitância até 55% superior à da cobertura dupla de vidro, reforçando sua eficácia como material para aplicações em sistemas de secagem solar.

A base do coletor, conforme mostrado na Figura 3.2, é fabricada com poliestireno expandido (isopor), revestido com alumínio para assegurar a higiene do processo e melhorar a transferência de calor para o fluido de trabalho.

No trabalho de Conceição (2022), o coletor solar foi incrementado para se tornar um protótipo de secador solar de frutas, com objetivo de obter alimentos desidratados e avaliar a eficiência de dessecantes.

Figura 3.2 – Construção do coletor solar.



Fonte: Conceição (2022).

Dentro da estrutura base, foi inserida uma telha de fibrocimento cuja espessura é 4 milímetros, pintada em tom preto opaco, com tinta spray. Esta telha tem a função de absorver energia solar. A cor preta opaca proporciona uma alta capacidade de absorção e condução, o que facilita a transferência de calor para o ar durante o processo de secagem, além de atuar como um reservatório térmico.

As bandejas usadas para secar o produto foram feitas de cantoneiras de alumínio em formato de L, com 1/2 polegada de espessura, e tela de nylon. O propósito do nylon é facilitar a circulação do ar no ambiente térmico em análise, além de ser prático para remover os resíduos de frutas entre os ciclos de secagem, se necessário (Conceição, 2022).

O sistema analisado é equipado com uma unidade dessecante, que consiste em uma caixa de isopor de 17 litros contendo duas bandejas para o dessecante sólido, construídas também com cantoneiras L de alumínio e arame.

As bandejas ou camas usadas para dessecantes sólidos são projetadas para maximizar o contato com o ar, proporcionando uma desumidificação mais eficiente. Elas permitem uma distribuição uniforme do dessecante, garantindo que o ar passe através do material de forma eficaz. Com isso, aumenta-se a eficiência na remoção de umidade ao longo do processo de secagem (Jarimi *et al.*, 2019).

Conceição (2022) resumiu as principais características de construção e dimensões do protótipo do sistema desenvolvido neste trabalho, explicado em detalhes na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dimensões e características do protótipo estudado.

Componentes	Características
Cooler (soprador)	Eletroventilador radial usado na entrada da unidade dessecante (24V e 0,9A)(Operado com fonte chaveada 12V e 0,5A)
Dimensões do Cooler (saída) (L x A)	8 cm x 3,2 cm
Unidade Dessecante	Caixa de poliestireno (volume: 17 litros)
Dimensões Unidade Dessecante (A x L x P)	36,90 cm x 22,80 cm x 34,20 cm
Material Coletor Solar	Folha de alumínio, Polietileno expandido 25 mm
Dimensões Coletor Solar (L x C x A)	90 cm x 120 cm x 12 cm
Volume interno Coletor Solar	201,6 litros
Entrada de ar	50 cm x 3 cm
Saída de ar	40 cm x 3 cm
Tubulação (D x C)	10 cm x 88 cm
Capacitor térmico	Telha de fibrocimento pintada de preto fosco
Bandeja	Material: Perfil em L de alumínio de ½ polegada e tela de nylon
Área plana do secador	Área plana de incidência de radiação solar: 1,08 m ²
Cobertura curva	Área curva de incidência de radiação solar: 1,176 m ²

Fonte: Adaptado de Conceição (2022).

Contudo, apesar de já desenvolvido, o equipamento utilizado por Conceição (2022) necessitava de várias manutenções para garantir seu funcionamento adequado e a compatibilidade com os experimentos planejados para esta pesquisa.

Para garantir o funcionamento eficaz e preciso do equipamento, foram necessárias diversas intervenções específicas. Inicialmente, realizou-se uma limpeza detalhada do interior do aparelho, eliminando resíduos ou depósitos de sujeira que pudessem prejudicar seu rendimento. Adicionalmente, a vedação da cobertura foi recuperada para garantir a ausência de vazamentos ou infiltrações que pudessem comprometer os resultados dos experimentos. Finalmente, o capacitor térmico foi revestido com uma nova camada de tinta, conforme mostrado na Figura 3.3, assegurando tanto a resistência à corrosão quanto a beleza estética do dispositivo. Essas manutenções se mostraram fundamentais para garantir que o equipamento estivesse em pleno funcionamento, cumprindo assim os rigorosos critérios dos experimentos conduzidos.

Figura 3.3 – Limpeza e pintura do equipamento utilizado por Conceição (2022).



Fonte: pesquisador (2024).

Além da higienização, imprescindível para remover poeiras e resíduos de comida usados em experimentos anteriores, foi colocada uma camada de silicone transparente para aprimorar a vedação da cobertura. A pintura, na cor preto fosco, aplicada nas telhas de fibrocimento teve como objetivo intensificar sua função como capacitor térmico, permitindo alcançar temperaturas mais elevadas conforme o objetivo do experimento.

Além disso, foi realizada a restauração da parte elétrica da unidade dessecante. No estudo de Conceição (2022), foi desenvolvido um sistema de controle de rotação para o soprador instalado na unidade dessecante, conforme ilustrado na Figura 3.4. A implementação desse sistema exigiu a substituição da fonte por uma nova fonte chaveada, além de reparos nos fios. O ajuste da rotação foi realizado com o auxílio de um termo-anemômetro portátil (Figura 3.5), que opera por meio de um sistema de pás e conta com componentes para a medição da velocidade do ar, sensores de temperatura e um display digital.

Figura 3.4 – Sistema de controle de rotação criado por Conceição (2022).



Fonte: Arquivo do pesquisador, 2024.

Figura 3.5 – Termo-anemômetro digital.

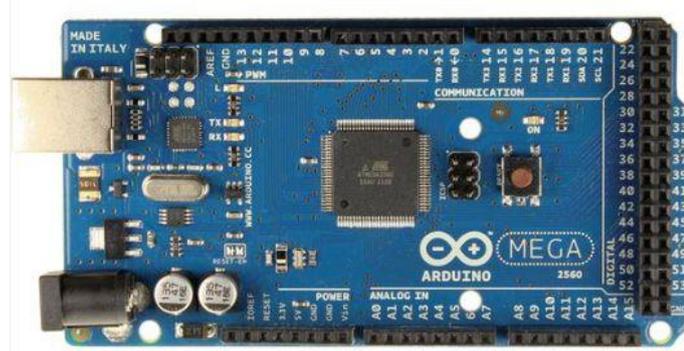


Fonte: Arquivo do pesquisador, 2024.

3.2.2 O SMAD e suas características

O propósito do Sistema de Medição e Coleta de Dados (SMAD) é recolher informações sobre temperatura e umidade relativa em seis locais do sistema. Ele foi instalado na plataforma AT MEGA 2560 (Arduino MEGA 2560), conforme mostrado na Figura 3.6. Este sistema inclui uma "shield" Datalogger, criada especificamente para esta tarefa, cujo projeto e desenho se encontram no Apêndice A.

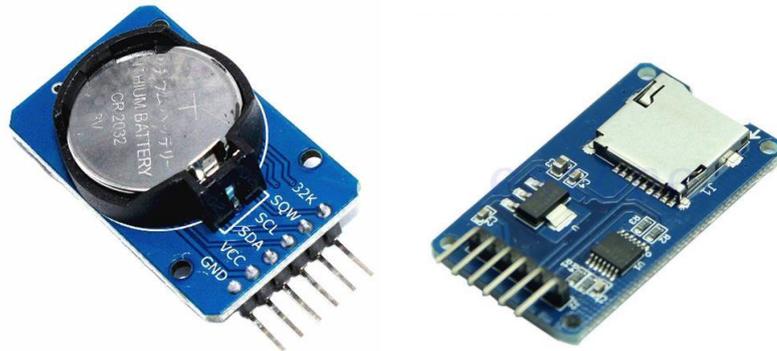
Figura 3.6 – Plataforma AT MEGA 2560 (Arduino MEGA 2560).



Fonte: Arquivo do pesquisador, 2024.

O objetivo da “shield” Datalogger é evitar o uso de cabos que liguem o Arduino a seus outros módulos necessários para o trabalho, o RTC DS3231 e o leitor/gravador Micro SD Card, vistos na Figura 3.7, que servem respectivamente para manter a hora e a data das medições de acordo com o horário local e gravar esses dados em um cartão de memória, em um arquivo no formato .TXT, que pode ser acessado em um computador.

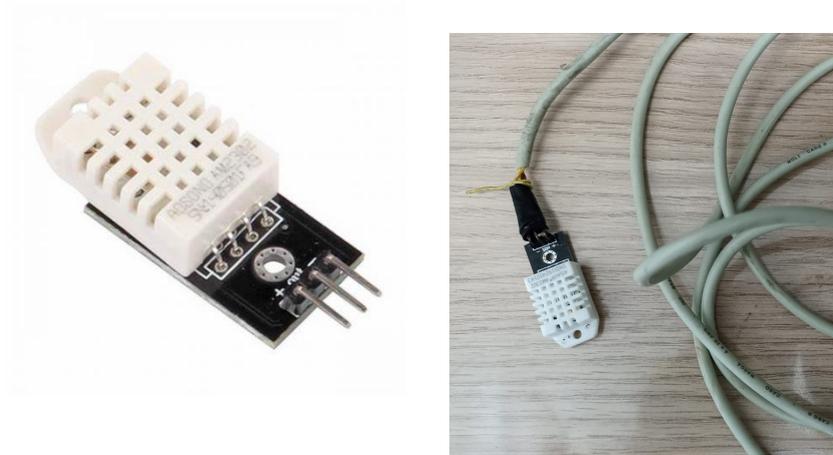
Figura 3.7 – Módulos RTC DS3231 e leitor/gravador Micro SD Card.



Fonte: Arquivo do pesquisador, 2024.

A placa Datalogger também possui conexões tipo borne para conectar os cabos manga que se conectam aos módulos de temperatura e umidade relativa, conforme ilustrado na Figura 3.8. Esses módulos se conectam diretamente ao Arduino MEGA 2560, dispensando a utilização de resistores, já que possuem placas próprias que desempenham essa função.

Figura 3.8 – Módulo DHT 22 e conexão com cabo manga.



Fonte: Arquivo do pesquisador, 2024.

Para acompanhar as medições em tempo real, foi adicionado um display LCD 4X20, juntamente com um módulo I2C, conforme ilustrado na Figura 3.9. Assim, pode-se executar um controle manual em situações de problemas de energia, falhas na programação ou falhas em componentes, proporcionando um controle mais eficaz do experimento.

Figura 3.9 – Display 4x20 com I2C.



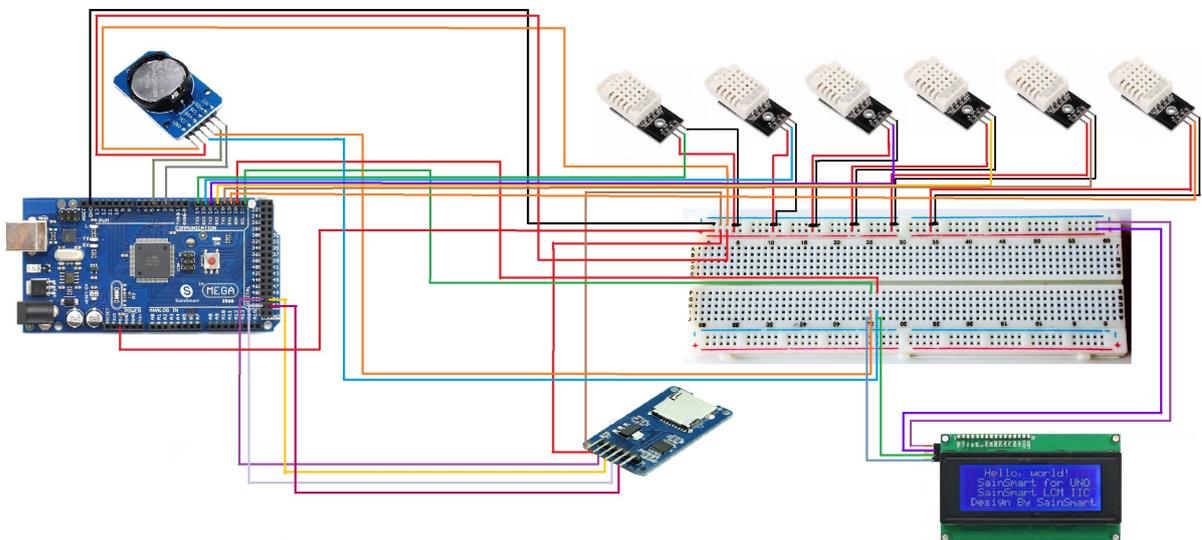
Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

Uma “SHIELD” para Arduino é uma placa adicional que pode ser conectada diretamente sobre a placa Arduino, expandindo suas funcionalidades. Ela adiciona recursos específicos, como controle de motores, comunicação sem fio, sensores, entre outros, sem a necessidade de fios ou complexidade de montagem. São feitas para serem facilmente

encaixadas na placa Arduino, tornando o processo de prototipagem mais rápido e acessível, permitindo que os usuários se concentrem no desenvolvimento de seus projetos sem se preocupar com o detalhamento de circuitos.

A placa Datalogger foi projetada especificamente para o projeto, porém pode ser utilizada para diversas finalidades, dependendo dos sensores que são ligados. Na Figura 3.10, é possível visualizar o diagrama do SMAD, detalhando a conexão de cada componente e como seria a conexão caso existisse uma protoboard que unisse tudo.

Figura 3.10 – Esquema de conexões com protoboard.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

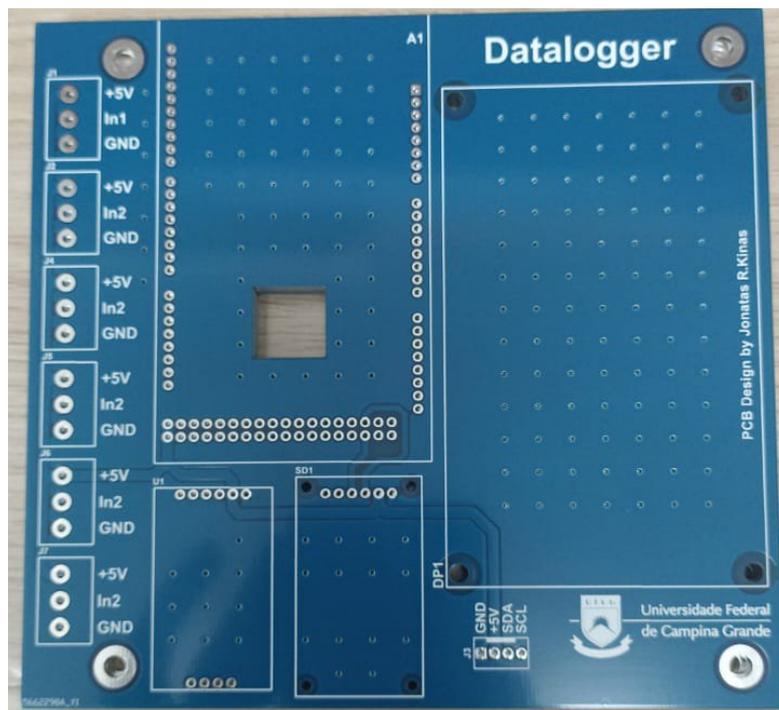
Após a construção do esquema inicial, foi elaborado um projeto detalhado na plataforma Draftsman, conforme ilustrado no Apêndice A. Esse projeto foi desenvolvido com o objetivo de preparar o design para envio a uma empresa especializada na fabricação de placas de circuito impresso (PCBs).

A empresa selecionada para essa tarefa foi a JLCPCB, uma renomada fabricante chinesa de PCBs sob encomenda, reconhecida pela sua qualidade e eficiência. A escolha da JLCPCB foi cuidadosamente fundamentada em diversos fatores, como o excelente custo-benefício oferecido e a vasta gama de opções de personalização disponíveis, que permitem um alto nível de flexibilidade no desenvolvimento de projetos. Além disso, a empresa se destaca pela sua capacidade de produzir placas de circuito impresso com alta precisão e rapidez, atendendo tanto pequenas quanto grandes demandas. Essas características são fundamentais para garantir que o projeto atenda de forma precisa às especificações técnicas exigidas e às necessidades do

cliente, assegurando a excelência do produto final, desde o design até a produção.

Após a finalização do projeto na plataforma Draftsman, os arquivos foram exportados e enviados para a JLCPCB. A importação dos arquivos foi realizada com sucesso, e as placas foram fabricadas e entregues conforme mostrado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Placa “SHIELD” Datalogger do SMAD.



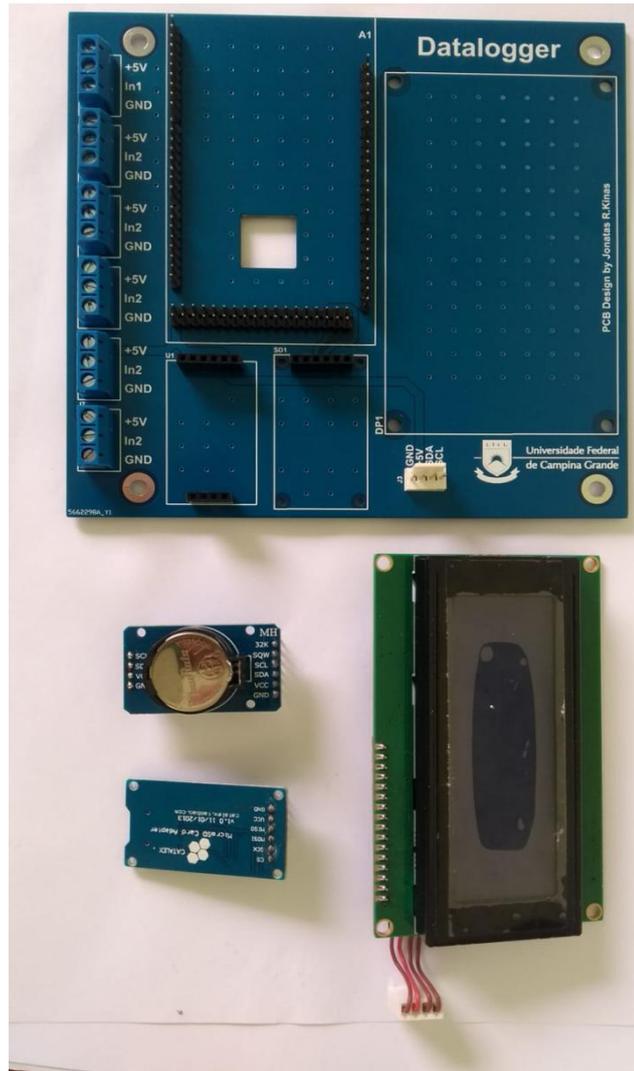
Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

Vale destacar que, no pedido feito à JLCPCB, a quantidade mínima exigida era de cinco unidades de placas de circuito impresso. No entanto, para os propósitos deste experimento específico, apenas uma unidade foi necessária para a construção do Sistema de Medição e Aquisição de Dados (SMAD). A decisão de produzir cinco placas, mesmo precisando de apenas uma, foi estratégica, garantindo unidades adicionais para testes, ajustes e eventuais substituições, se necessário.

Além disso, a escolha da JLCPCB proporcionou vantagens adicionais, como a rápida produção e entrega, o que é fundamental para manter o cronograma do projeto. A qualidade das placas recebidas foi rigorosamente verificada, assegurando que todas as especificações e padrões de qualidade fossem atendidos, resultando em uma base sólida para o desenvolvimento do SMAD.

Após a chegada das placas, foram montados os componentes de conexões tipo Borne, juntamente com outros componentes eletrônicos que seriam integrados, funcionando como uma espécie de placa-mãe, como visto na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Componentes do SMAD.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

Após a montagem dos componentes, o Sistema de Medição e Aquisição de Dados (SMAD) foi conectado aos sensores utilizando cabos do tipo manga (Figura 3.13). Essa escolha se baseia na necessidade de assegurar uma conexão confiável e permitir a manutenção eficiente dos sensores. Os cabos do tipo manga facilitam a substituição rápida dos sensores DHT22, minimizando o tempo de inatividade e mantendo a continuidade das medições.

Os sensores DHT22, conhecidos por sua precisão e confiabilidade na medição de temperatura e umidade, podem ocasionalmente necessitar de manutenção ou substituição. Utilizar conectores de encaixe não apenas simplifica esse processo, mas também reduz o risco de danos aos componentes. Essa abordagem melhora a robustez do sistema e contribui para a eficiência geral do monitoramento, garantindo que o sistema continue operando de forma confiável.

Figura 3.13 – Cabos manga e conectores das unidades sensoras DHT22.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

Cada cabo mede cerca de 1,5 metros de comprimento. As ligações entre a placa e os cabos são estabelecidas por meio de parafusos, que podem ser substituídos em caso de falhas. Depois de montar o case, que é uma caixa de medição de energia residencial com proteção contra sol e chuva, obteve-se a configuração apresentada na Figura 3.14.

Figura 3.14 – SMAD instalado dentro do case



Fonte: Arquivo do pesquisador, 2024.

O display do SMAD (Figura 3.14) possui quatro linhas e vinte colunas, desempenhando um papel crucial na visualização das medições coletadas, sendo particularmente útil para identificar anomalias durante o processo de medição. Ele é programado para exibir a temperatura e a umidade relativa em seis pontos de medição diferentes, conforme a programação escolhida. Na primeira tela, o display apresenta qual é o número da amostra que está sendo computada, seis segundos depois, na segunda tela, a hora e a data da medição, marcada através do módulo RTC DS3231. Em seguida é exibido os dados dos três primeiros sensores de temperatura e umidade e após vinte e quatro segundos para mostrar os valores dos outros três sensores, completando assim a primeira amostra de dados.

Este ciclo de exibição, cuja programação está no Apêndice B, permite um monitoramento contínuo e detalhado das condições ambientais nos pontos de medição estabelecidos. Esta programação, cujo é transmitida via USB ao Arduino, facilmente transmitida e corrigida através de um cabo USB A+B fixo ao case, ao lado dos outros cabos.

Figura 3.15 – Display do SMAD em configuração da hora e data de exibição



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

É importante destacar que o tempo de exibição no display é diferente do tempo de registro dos dados. Embora, ofereça uma visualização rápida e útil para a detecção imediata de anomalias, o registro das medições de temperatura e umidade relativa ocorre de minuto a minuto, sendo armazenado em um cartão de memória do tipo micro SD, localizado dentro do leitor dedicado. Este método de armazenamento garante que grandes volumes de dados possam ser salvos de maneira eficiente e acessível, permitindo uma análise posterior detalhada e a manutenção de um histórico completo das condições monitoradas. A precisão e a regularidade do registro dos dados no micro SD, fornecem a base para análises rigorosas e decisões informadas, sendo mais críticos do que a exibição temporária.

3.3 Metodologia experimental

3.3.1 Localização

Os testes experimentais foram conduzidos no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), situada em Campina Grande, Paraíba, Brasil. As coordenadas geográficas são aproximadamente 7° de latitude Sul e 36° de longitude Oeste, com uma altitude em torno de 600 metros acima do nível do mar.

A escolha de Campina Grande para este projeto foi motivada por duas razões principais: primeiro, devido à infraestrutura disponível (LEMT/PPGEM/UFCG), que possui os equipamentos necessários para medição, aquisição de dados, construção do protótipo e outros

acessórios requeridos para o trabalho experimental e, as características climáticas da cidade que apresenta alta umidade relativa, tornando essencial o uso de dessecantes. A Figura 3.16 ilustra o edifício Professor Júlio Goldfarb, onde os experimentos foram realizados.

Figura 3.16 – Edifício Professor Júlio Goldfarb, sede do LEMT/UFCG.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

Na Figura 3.17, é apresentado o Solarium do LEMT/UFCG durante um dia de experimento, localizado no segundo andar do edifício Professor Júlio Goldfarb.

Figura 3.17 – Foto do Solarium do LEMT/UFCG em um dia de experimento.



Fonte: Arquivo do pesquisador, 2024.

O posicionamento escolhido para o Sistema de Medição e Aquisição de Dados (SMAD) foi cuidadosamente planejado para garantir sua proteção e eficiência. Optou-se por instalar o

SMAD abaixo do coletor solar, (Figura 3.18) um local estratégico que oferece abrigo contra possíveis chuvas e intempéries. Esta localização não apenas protege os componentes eletrônicos sensíveis, mas também facilita a integração do sistema com o coletor solar, otimizando a captação de dados essenciais.

Figura 3.18 – Posicionamento do SMAD durante os testes e experimentos.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

Conforme Grilo (2007), para otimizar a captação da radiação solar ao longo do ano em um secador solar fixo localizado no hemisfério Sul, é recomendável posicioná-lo voltado para o norte geográfico, com uma inclinação equivalente à latitude local mais um acréscimo de 10° a 15° . Isso assegura uma maior eficiência energética do equipamento durante o inverno, ou seja, entre os meses de junho e setembro (Conceição, 2022).

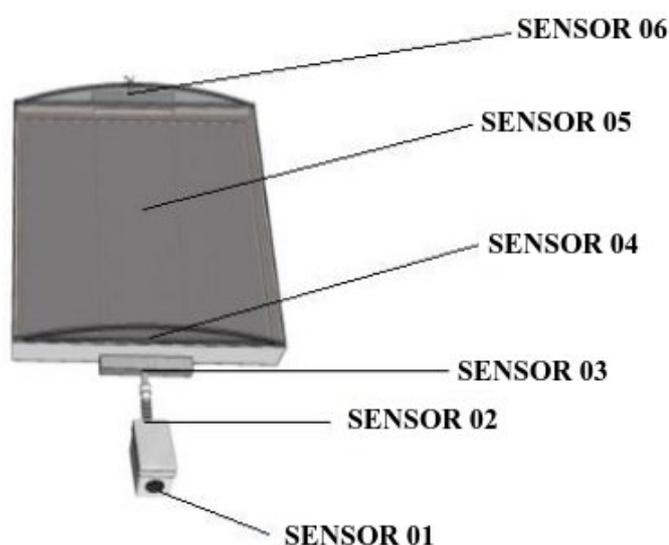
Para a cidade de Campina Grande-PB, com latitude média local de 7° Sul, sugere-se uma inclinação do coletor entre 17° e 22° , orientado para o Norte. No presente estudo, adotou-se uma inclinação de 22° .

3.3.2 Medição e tratamento de dados

Os registros das temperaturas e níveis de umidade relativa do ar durante o processo de aquecimento do ar são cruciais para monitorar suas flutuações ao longo do dia. É essencial realizar essas medições em várias localizações dentro do coletor solar, incluindo entradas e saídas.

Para viabilizar tais medições e possibilitar um controle eficaz do ar de processo, foi desenvolvido e implementado um sistema de medição de temperatura e umidade relativa do ar. Esse sistema, conhecido como Sistema de Medição e Aquisição de Dados (SMAD), foi elaborado utilizando a plataforma Arduino e emprega seis sensores do tipo DHT22. Esses sensores foram estrategicamente posicionados, conforme indicado na Figura 3.19. Todos estão instalados dentro do sistema, exceto o Sensor 01, que mede a temperatura e umidade externa, próximo ao soprador.

Figura 3.19 – Posicionamento de sensores ao longo do sistema térmico.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

Além das avaliações automáticas feitas pelo SMAD, foi preciso definir um parâmetro manual em situações de irregularidades no sistema. Para tal, foi desenvolvido um formulário detalhado na Tabela 3.2, que possibilitem o registro das medições através da observação do visor, do horário local e das temperaturas obtidas com um termômetro infravermelho digital laser (Figura 3.20).

Diferentemente do tempo de medição realizado pelo SMAD, o formulário impresso registrava os dados de temperatura e umidade relativa a cada hora. Além disso, mesmo em caso de alguma anomalia ligada as marcações de horário, temperatura e umidade relativa do SMAD, os registros dos horários eram mantidos em relação ao tempo corrente, marcado em relógio, ou em relação a temperatura marcada no termômetro infravermelho.

Com esse método, foi possível manter um registro impresso das medições, assegurando uma documentação completa do experimento. Dessa forma, qualquer erro no sistema

automático poderia ser identificado e corrigido manualmente, garantindo maior precisão e confiabilidade às informações coletadas.

Tabela 3.2 – Monitoramento manual de dados experimentais.

Experimento _____, utilizando _____ como dessecante. Data ___/___/___

Hora	Tempo de experimento (min)	Temp. 1 (°C) Umidade 1 (%)	Temp. 2 (°C) Umidade 2 (%)	Temp. 3 (°C) Umidade 3 (%)	Temp. 4 (°C) Umidade 4 (%)	Temp. 5 (°C) Umidade 5 (%)	Temp. 6 (°C) Umidade de 6 (%)

Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

Figura 3.20 – Termômetro laser digital infravermelho para emergências, ao lado do anemômetro e da balança de precisão.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

Durante o período experimental, ilustrado na Figura 3.21, os dias foram selecionados estrategicamente com base em condições meteorológicas favoráveis. Optou-se por dias ensolarados, nos quais a probabilidade de chuvas era mínima, garantindo que as variáveis climáticas não interferissem significativamente nos resultados. Além disso, o horário dos testes foi planejado para coincidir com os períodos de máxima irradiação solar, assegurando que a energia captada fosse a mais intensa possível ao longo do experimento.

3.3.3 Medição da energia solar

Neste estudo, reportado por Conceição (2022), utilizamos informações obtidas da estação meteorológica do Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas do Centro de Engenharia Elétrica e Informática da UFCG (LEIAM/CEEI/UFCG) e do pirômetro modelo CM21, produzido pela Kipp & Zonen, para calcular a irradiação solar incidente. Esses equipamentos estão devidamente instalados no laboratório LEIAM/UFCG (Figuras 3.22 e 3.23).

Figura 3.22 – Estação Meteorológica do LEIAM/UFCG.



Fonte: Lima (2016).

Figura 3.23 – Pirômetro do LEIAM/UFCG.



Fonte: Lima (2016).

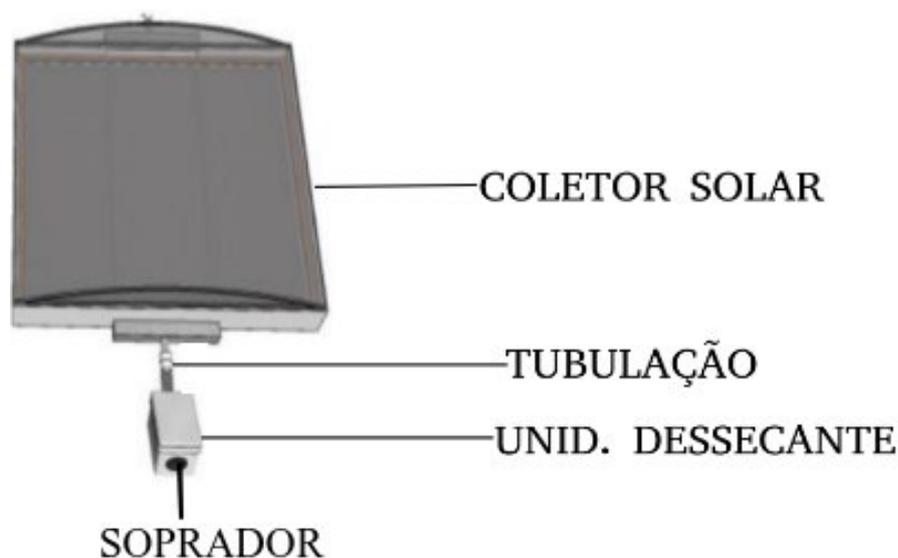
3.3.4 Procedimentos experimentais

Neste trabalho, o objetivo é identificar o dessecante mais eficaz por meio de uma análise teórica, complementada pela coleta de dados de temperatura e umidade relativa em tempo real, realizada pelo SMAD. Ao contrário de estudos anteriores, este cálculo será realizado em três partes distintas do protótipo, como ilustrado na Figura 3.24 e será detalhado nos tópicos a seguir.

Os experimentos foram conduzidos com sílica-gel, carvão ativado e bentonita ao longo de aproximadamente um mês, em dias ensolarados, realizados aproximadamente entre 10:00h às 16:00h, totalizando cerca de 360 minutos diários de observação de tempo máximo. Na unidade dessecante, haviam duas bandejas, cada uma contendo 1 kg de dessecante, totalizando 2 kg. A unidade dessecante sempre ficou posicionada antes da entrada de ar do coletor solar.

Antes de realizar cada experimento, a sílica-gel, ou o carvão ativado, ou a bentonita, foram postas ao sol durante 6 horas, aproveitando também o horário do meio-dia, com o objetivo de obter o melhor rendimento possível, mesmo sendo conservadas em local fechado e seco. O coletor solar permaneceu vazio e, após a sua montagem, antes do primeiro experimento, permaneceu no mesmo local, pois o objetivo é testar a sua eficiência com as melhorias trazidas pela unidade dessecante.

Figura 3.24 – Trechos do sistema separados para calcular o rendimento térmico.



Fonte: Adaptado de Conceição (2022).

- **Soprador:** sistema de ventilação forçada através de um sistema de pás movido através de um motor elétrico.
- **Unidade dessecante:** neste local, será colocado o dessecante e medido a temperatura do ar e umidade relativa através do SMAD.
- **Tubulação:** é a conexão entre o coletor e a unidade dessecante.
- **Coletor Solar:** Local onde o processo de aquecimento do ar ocorre com mais eficiência.

Na Figura 3.25, pode-se observar a disposição da camada de dessecante, que, no exemplo ilustrado, é composta por bentonita, dentro da bandeja superior.

Figura 3.25 – Vista superior da unidade dessecante, carregada com bentonita.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

Para todos os dessecantes utilizados, esta foi a mesma disposição e a mesma quantidade dentro da unidade dessecante, padronizando as amostras experimentais. A cada troca de dessecante, em cada um deles (sílica-gel, carvão ativado e bentonita) foi feito um processo de regeneração, que consistia em deixar o dessecante em bandejas no sol para que a sua umidade fosse para o ambiente Figura 3.26.

Figura 3.26 – Processo de regeneração de leitos de sílica-gel transparente e colorida.



Fonte: Arquivo do pesquisador, 2024.

Os experimentos com dessecantes foram realizados conforme a seguinte tabela:

Tabela 3.3 – Registro dos experimentos com dessecantes aplicados ao coletor solar.

EXPERIMENTO	MATERIAL DESSECANTE	DATA	HORÁRIO
E1	Sílica-gel	18/10/2023	10:16 até 15:57
E2	Sílica-gel	19/10/2023	13:04 até 15:48
E3	Sílica-gel	24/10/2023	11:08 até 16:30
E4	Sílica-gel	25/10/2023	11:24 até 16:40
E5	Carvão ativado	30/10/2023	11:03 até 16:40
E6	Carvão ativado	01/11/2023	10:53 até 16:30
E7	Carvão ativado	07/11/2023	10:36 até 15:39
E8	Carvão ativado	08/11/2023	12:10 até 16:39
E9	Bentonita	10/11/2023	11:08 até 16:14
E10	Bentonita	16/11/2023	11:30 até 17:10
E11	Bentonita	21/11/2023	11:42 até 16:48
E12	Bentonita	22/11/2023	10:30 até 16:58

Fonte: Arquivo do pesquisador, 2024.

A realização de múltiplos experimentos em dias distintos foi essencial para garantir a confiabilidade dos dados coletados. Essa redundância permitiu mitigar possíveis erros decorrentes de fatores externos, como variações ambientais inesperadas ou falhas técnicas no

sistema de medição.

O intervalo entre cada experimento não interferiu significativamente no teor de umidade dos dessecantes, uma vez que os ensaios foram conduzidos em dias ensolarados e com baixa umidade relativa do ar. Essas condições climáticas favoreceram a manutenção das propriedades dos dessecantes, minimizando a absorção indesejada de umidade entre os testes.

No entanto, para fins de registro e análise, um único experimento bem-sucedido por tipo de dessecante é suficiente, desde que as condições experimentais tenham sido rigorosamente seguidas e os dados coletados sejam representativos. Assim, a repetição dos ensaios foi aplicada como uma estratégia de controle, reforçando a integridade e a confiabilidade dos resultados apresentados.

Durante os experimentos, foram medidas os seguintes parâmetros de processo que variam com o tempo:

- a) temperatura e umidade relativa do ar ambiente;
- b) temperatura e umidade relativa do ar dentro da unidade dessecante;
- c) temperatura e umidade relativa do ar dentro do coletor solar;
- d) irradiação solar.

Para cada experimento, os valores obtidos para a variação da temperatura e da umidade relativa do ar, medidos a cada minuto, são registrados em tabelas e representados em gráficos.

A determinação da velocidade do ar que atravessa as seções de entrada e saída do sistema térmico foi realizada utilizando um anemômetro digital portátil, conforme mostrado na Figura 3.27, modelo VEC - GM 8901, da marca Vectus.

A medição da velocidade do ar foi realizada no mesmo ponto onde atualmente está posicionado o Sensor 04, para melhor entendimento, ver Figura 3.19. Nesse local, obteve-se um valor de 3,5 m/s, caracterizando um fluxo de ar estável. Não foram realizadas medições em outros pontos, pois essa região, dentro do experimento, apresentou o menor espalhamento do fluxo de ar.

Figura 3.27 – Anemômetro digital utilizado neste trabalho.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

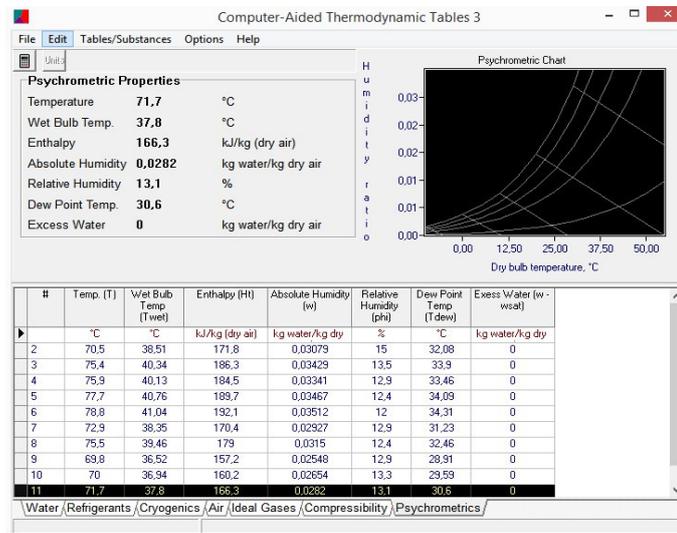
Para cada experimento, os seguintes passos foram executados:

- a) Inicialmente, o sistema já estava montado no Solarium do LEMT/UFCG, sendo necessário apenas montar a unidade dessecante já preparada com as quantidades de sílica-gel, ou carvão ativado, ou bentonita e ligar o soprador.
- b) Em seguida, o SMAD foi conectado, sendo ligado a todo o sistema conforme visto anteriormente na Figura 3.18 e após a montagem, todas as junções do sistema foram vedadas com três camadas de fita adesiva larga e transparente.
- c) Posteriormente, a unidade dessecante foi carregada com 2 kg de dessecantes sem umidade, distribuídos igualmente e uniformemente em duas bandejas. E o anemômetro foi colocado na saída de ar da unidade dessecante, para medir a velocidade do ar.
- d) E por fim, ao finalizar o experimento, os dados coletados através do cartão de memória e através da tabela de controle foram obtidos e catalogados em um arquivo (.txt), que será aplicado ao estudo teórico através de outros softwares.

Para se obter os dados, de entalpia e umidade absoluta do ar nos diferentes pontos do sistema térmico, foi utilizado o software Computer-Aided Thermodynamic Tables 3 (CATT 3), a partir dos dados de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do tempo.

Na Figura 3.28, pode-se observar um exemplo das informações geradas pelo CATT 3 a partir da inserção dos valores da temperatura e da umidade relativa do ar de processo.

Figura 3.28 – Exemplo da tabela do CATT3, após inserir os dados de temperatura e umidade relativa, na função psychrometrics.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

Além da entalpia e umidade absoluta do ar, outra informação relevante para realizar as análises nesse trabalho é a massa específica do ar (ρ). Esta propriedade termofísica pode ser obtida como segue:

$$\rho = \frac{p_{ATM} \times 1000}{\bar{R} \times 1000 \times (T + 273)} \quad (3.9)$$

sendo:

p = pressão atmosférica de Campina Grande cujo valor é 101,325 kPa, e constante ao longo do tempo.

\bar{R} = constante particular dos gases igual a 0,287 kJ/kgK, também constante ao longo do tempo.

T = temperatura do ar (°C) que varia ao longo do tempo de experimento e com a posição ao longo do sistema térmico.

3.4 Análise energética do sistema térmico

Para a avaliação energética do sistema térmico em estudo, utilizou-se das equações de conservação de massa e energia (1ª Lei da termodinâmica) aplicadas a um sistema aberto (volume de controle).

3.4.1 Conservação da massa

A lei da conservação da massa estabelece que a taxa de variação da massa contida dentro do volume de controle, em um instante t , é igual à taxa de fluxo de massa entrando (e) no volume de controle, naquele mesmo instante, menos a taxa de fluxo de massa saindo (s), no mesmo instante t . Esta relação é formalmente expressa pela Equação 3.1, como segue:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_s - \sum \dot{m}_e \quad (3.1)$$

no qual:

$\frac{dm_{vc}}{dt}$ = taxa temporal da variação da massa contida no interior do volume de controle (kg/s);

\dot{m}_e e \dot{m}_s = são as vazões mássicas instantâneas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente (kg/s).

3.4.2 Conservação de energia

A primeira lei da termodinâmica, também conhecida como lei da conservação da energia, estabelece que "a taxa de variação da energia contida dentro do volume de controle, no instante t , é igual à taxa líquida na qual a energia está sendo transferida para dentro do volume de controle por transferência de calor, no instante t , menos a taxa líquida na qual a energia está sendo transferida para fora do volume de controle por trabalho, no instante t , mais a taxa líquida de energia transferida para o volume de controle juntamente com o fluxo de massa."

Aplicando o princípio da conservação da energia ao volume de controle, esse enunciado é representado através da Equação 3.2, como segue:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (3.2)$$

onde:

$\frac{dE_{vc}}{dt}$ = taxa temporal da variação da energia contida no interior do volume de controle (W);

\dot{Q}_{vc} = taxa de transferência de calor ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle (W);

\dot{W}_{vc} = taxa de transferência por trabalho ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle (W);

\dot{m}_e e \dot{m}_s = são as vazões mássicas instantâneas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

v_e = Velocidade do ar na entrada do volume de controle $\left(\frac{m}{s}\right)$;

v_s = Velocidade do ar na saída do volume de controle $\left(\frac{m}{s}\right)$;

g = Aceleração da gravidade $\left(\frac{m}{s^2}\right)$;

z_e = Valor absoluto da posição vertical (altura) da entrada do volume de controle (m);

z_s = Valor absoluto da posição vertical (altura) da saída do volume de controle (m);

h_e = Entalpia específica do ar na entrada do volume de controle $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

h_s = Entalpia específica do ar na saída do volume de controle $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

3.4.3 Fluxo mássico

O fluxo de massa do fluido de trabalho para o coletor solar pode ser determinado pela Equação 3.3, como segue:

$$\dot{m} = \rho V A \quad (3.3)$$

No qual:

\dot{m} = Vazão mássica do fluido de trabalho $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$;

ρ = Massa específica do fluido de trabalho na entrada do volume de controle $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$;

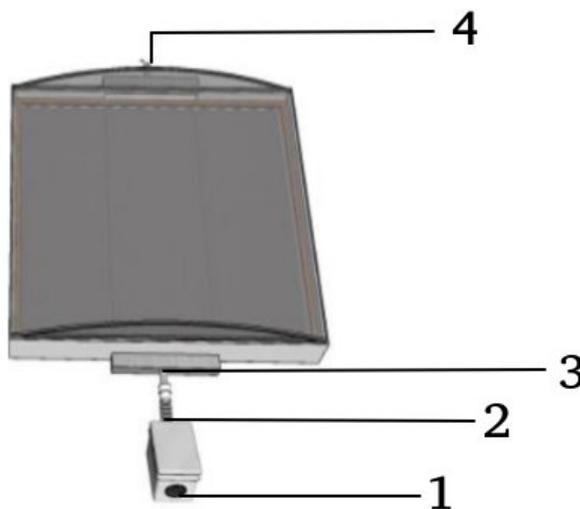
V = Velocidade média do fluido no volume de controle $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$;

A = Área de escoamento do fluido no volume de controle (m^2) ;

Para efetuar os cálculos, aplicou-se a primeira lei da termodinâmica a cada componente do sistema térmico. Para isso, foi necessário definir inicialmente um volume de controle e sua respectiva fronteira. Em todo o estudo foi assumido condições de regime permanente.

Neste estudo, foca-se especificamente em três volumes de controle ao longo do sistema analisado. Na Figura 3.29, ilustra-se os volumes de controle a serem analisados.

Figura 3.29 – Volumes de controle utilizados para o cálculo termodinâmico.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

onde:

- Do ponto 1 até o ponto 2, tem-se o primeiro volume de controle que inicia no soprador e se estende até o final da unidade dessecante.
- Do ponto 2 até o ponto 3, tem-se o segundo volume de controle, que inicia do tubo de conexão e se estende até a entrada do coletor solar.
- Do ponto 3 até o ponto 4, tem-se o terceiro volume de controle, que inicia da entrada do coletor até a sua saída.

A quantidade de calor transferida do ponto 1 até o ponto 2, \dot{Q}_{12} foi obtida através do princípio da conservação da energia (primeira lei da termodinâmica), tendo como considerações iniciais: regime permanente, variações de velocidade e desnível desprezíveis, sendo dado pela equação 3.4, que segue:

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_2 (h_2) - \dot{m}_1 (h_1) + \dot{W}_{12} \quad (3.4)$$

sendo que o \dot{W}_{12} , é a potência do soprador, calculado através da tensão e corrente do soprador, através da Equação 3.5, da a seguir. Os valores de \dot{m}_1 e \dot{m}_2 são obtidos através da Equação 3.3.

$$P = U \cdot i \quad (3.5)$$

onde:

- P = Potência do motor elétrico do soprador
- U = Tensão de trabalho do soprador
- i = Corrente elétrica do soprador

Para o próximo volume de controle, a quantidade de calor transferido do ponto 2 até o ponto 3 é dada pela Equação 3.6, como segue:

$$\dot{Q}_{23} = \dot{m}_{23} (h_3 - h_2) \quad (3.6)$$

Nesse caso, o valor de \dot{m}_{23} será igual ao valor de \dot{m}_3 , pois o fluxo mássico não sofre variação ao longo do percurso. Sendo assim, tem-se que:

$$\dot{m}_{23} = \dot{m}_3 = \rho_3 V_3 A_3 \quad (3.7)$$

De forma análoga, como no próximo trecho também não há trabalho produzido pelo coletor solar, tem-se que \dot{Q}_{34} será dado por:

$$\dot{Q}_{34} = \dot{m}_{34} (h_4 - h_3) \quad (3.8)$$

Neste volume de controle, os fluxos de massa que entram e saem são iguais. É crucial calcular tanto o valor de \dot{m}_{34} quanto os de \dot{m}_1 , \dot{m}_2 , \dot{m}_3 e \dot{m}_4 , usando a equação apropriada. Este processo é essencial para assegurar a exatidão dos cálculos e a uniformidade dos resultados alcançados, garantindo que a concentração de massa seja mantida de maneira correta.

Ao aplicar o conceito de eficiência térmica, juntamente com a Primeira Lei da Termodinâmica para um volume de controle, chega-se a uma expressão matemática que descreve o rendimento térmico do coletor solar, como reportada na Equação 3.9.

$$\eta_{\text{coletor}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{\dot{Q}_{34}}{A \cdot \dot{Q}_{\text{média}}} \quad (3.9)$$

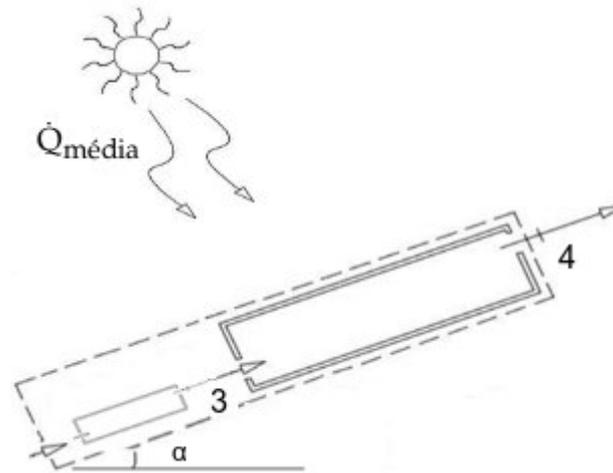
onde:

A = Área da cobertura transparente do coletor solar (m^2);

$\dot{Q}_{\text{média}}$ = Média da irradiação solar, incidente sobre o coletor solar, durante o processo de aquecimento do ar $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}\right)$, o qual é obtido de forma experimental.

A Figura 3.30 ilustra esquematicamente a radiação incidente no coletor solar.

Figura 3.30 – Esquema da radiação incidente sobre o coletor solar.



Fonte: Arquivo do pesquisador (2024).

3.4.4 Determinação das propriedades termodinâmicas do ar

De posse dos dados de entalpia e densidade do ar, calculou-se os valores de \dot{Q} em diferentes trechos do sistema térmico ao longo do tempo, e plotam-se os resultados utilizando-se o software Grapher.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são expostos os resultados alcançados durante os testes experimentais com o SMAD, empregado no coletor solar, sendo informada a massa inicial de cada dessecante, assim como a quantidade de água adsorvida em cada experimento. Em sequência são disponibilizados os resultados da eficácia mássica e do desempenho do sistema térmico obtido em cada teste.

4.1 Análise dos resultados experimentais

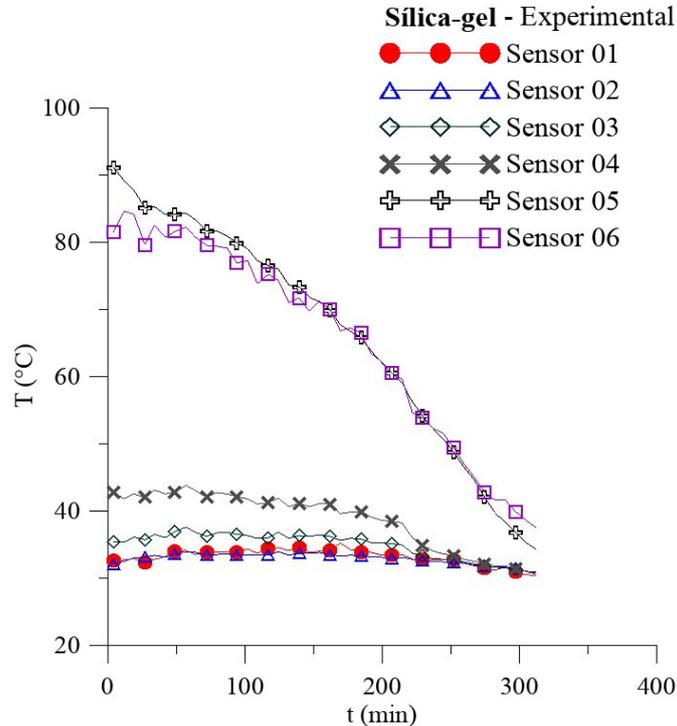
Os testes experimentais do sistema de coletor solar acoplado à unidade dessecante foram realizados ao longo de dias consecutivos para avaliar o desempenho dos dessecantes no processo.

O objetivo, foi avaliar a eficiência térmica e a remoção de umidade de forma contínua, utilizando como materiais dessecantes: sílica-gel, carvão ativado e bentonita. Essa abordagem permitiu analisar o comportamento dos dessecantes sob diferentes condições de radiação solar, obtendo dados comparativos para cada material.

4.1.1 Experimento utilizando sílica-gel como material dessecante

O experimento foi realizado em 25/10/2023, das 11:28 hs da manhã às 16:38 hs da tarde, com o objetivo de avaliar o desempenho do dessecante próximo ao meio-dia, quando a irradiação solar foi máxima, e observar seu comportamento ao entardecer, momento em que a umidade relativa atinge seu valor máximo. A Figura 4.1 apresenta os valores das temperaturas registradas ao longo do período experimental, com medições realizadas em intervalos de oito minutos. Para um melhor entendimento, recomenda-se verificar a Figura 3.18.

Figura 4.1 – Histórico transiente da temperatura do ar em diferentes pontos do sistema térmico para a sílica-gel.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

Para um melhor entendimento, informa-se que o Sensor 01, instalado na entrada da unidade dessecante, simboliza a temperatura do ambiente, enquanto que o Sensor 02 simboliza a temperatura interna da unidade dessecante. O Sensor 03 se encontra no tubo que conecta a unidade dessecante ao coletor solar. Já o Sensor 04 se encontra na entrada do coletor solar, o Sensor 05 se encontra no meio do coletor solar e o Sensor 06 se encontra na saída. Avaliando-se os resultados verifica-se que a temperatura do ar cresce desde a entrada até a saída do sistema térmico, sendo que os Sensores 05 e 06 apresentam as temperaturas mais elevadas. Além disso, pode-se notar redução das temperaturas, devido ao movimento da Terra.

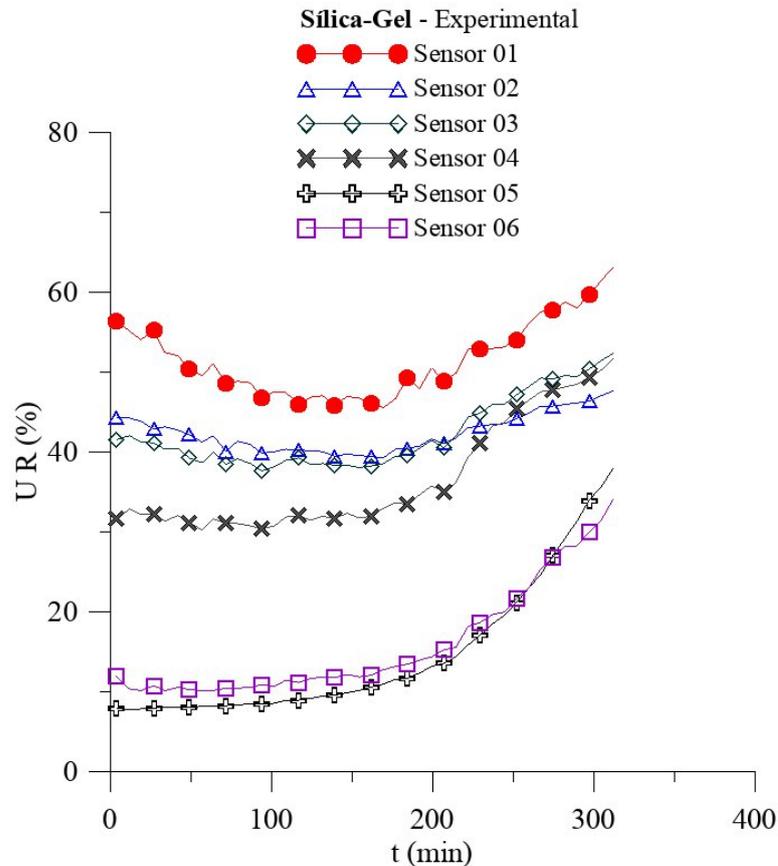
Durante todo o período do experimento, o coletor solar permaneceu totalmente exposto à radiação solar, sem qualquer sombreamento que pudesse comprometer a captação de energia. Além disso, as condições climáticas se mantiveram estáveis, sem ocorrência de chuvas ou ventos de alta velocidade que pudessem interferir no desempenho do sistema e na confiabilidade dos resultados obtidos.

Verifica-se que o sistema, no local do Sensor 05, atingiu 91,1 °C, sendo a sua maior temperatura logo no início do processo, sendo reduzida para 34,3 °C, no final do experimento, às 16h38min.

Observa-se, ainda que, o sistema térmico conseguiu aquecer o ar a uma temperatura acima de 70 °C, por cerca de 150 min (aproximadamente 2,5h). Portanto, com condições térmicas para realizar secagem de diferentes produtos em temperaturas moderadas.

Na Figura 4.2, são apresentados os índices de umidade relativa, obtidos ao mesmo tempo que as medidas de temperatura. Isso é possível devido à capacidade do sensor DHT 22 de medir simultaneamente a temperatura e a umidade relativa. Portanto, pode-se examinar a mudança na umidade relativa durante o mesmo intervalo de tempo em que se percebem as alterações na temperatura, oferecendo uma perspectiva mais abrangente das medidas realizadas durante o experimento.

Figura 4.2 – Histórico transiente da umidade relativa do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com sílica-gel.



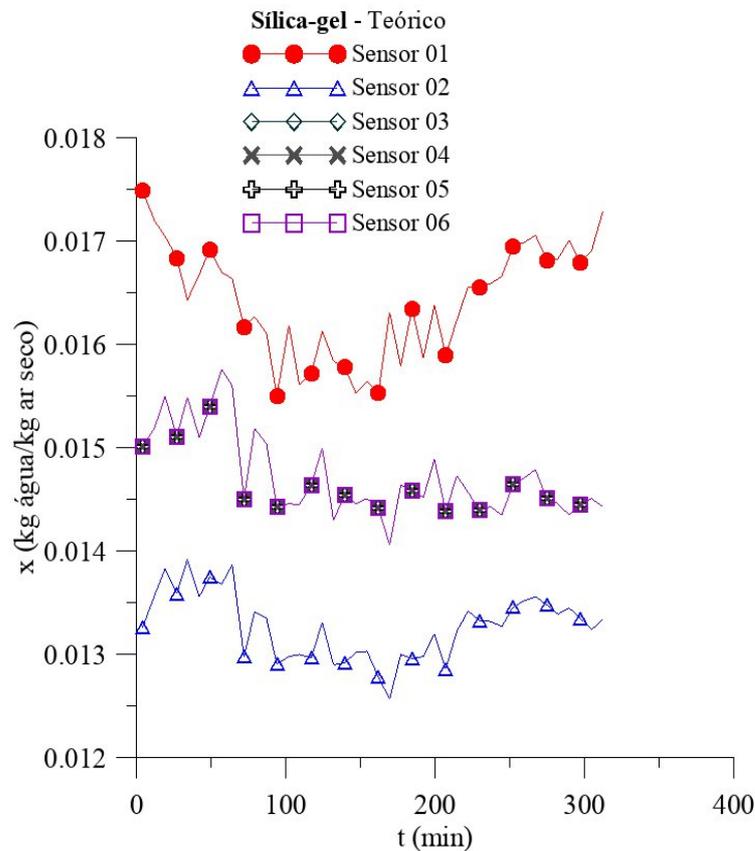
Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

Avaliando-se os resultados ilustrados na Figura 4.2, observa-se que os Sensores 05 e 06 apresentam os menores níveis de umidade relativa, com variações ao longo do tempo, provocado pelo aumento da temperatura do ar nessa região. No entanto, ao final do experimento, foi notado um aumento nos valores de umidade relativa, que pode ser atribuído ao entardecer e à subsequente diminuição da incidência da radiação solar, que provoca, naturalmente uma diminuição de ar seco no coletor solar.

Avaliando-se simultaneamente, as Figuras 4.1 e 4.2, verifica-se um comportamento bem interessante da umidade relativa na região entre a entrada do ar ambiente (Sensor 01) e a saída do ar no desumidificador (Sensor 03). Observa-se que nessa região, a temperatura do ar, no interior do sistema térmico é praticamente igual a temperatura do ar ambiente. Então a diminuição de umidade relativa do ar se dá por dois motivos: a) Localmente, pela ação do dessecante ao longo do tempo, e b) Devido ao aumento da temperatura do ar, pela ação da radiação solar no ambiente. O valor mínimo da umidade relativa do ar ocorreu logo no início do processo em $t \approx 4$ min, atingindo um valor de 7,9%, quando $T = 91,1$ °C.

Na Figura 4.3, são apresentados os valores de umidade absoluta que foram obtidos utilizando o software CATT3. Todos os cálculos de umidade absoluta foram feitos ponto a ponto, de acordo com as medições realizadas pelo SMAD.

Figura 4.3 – Histórico transiente da umidade absoluta do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com sílica-gel.



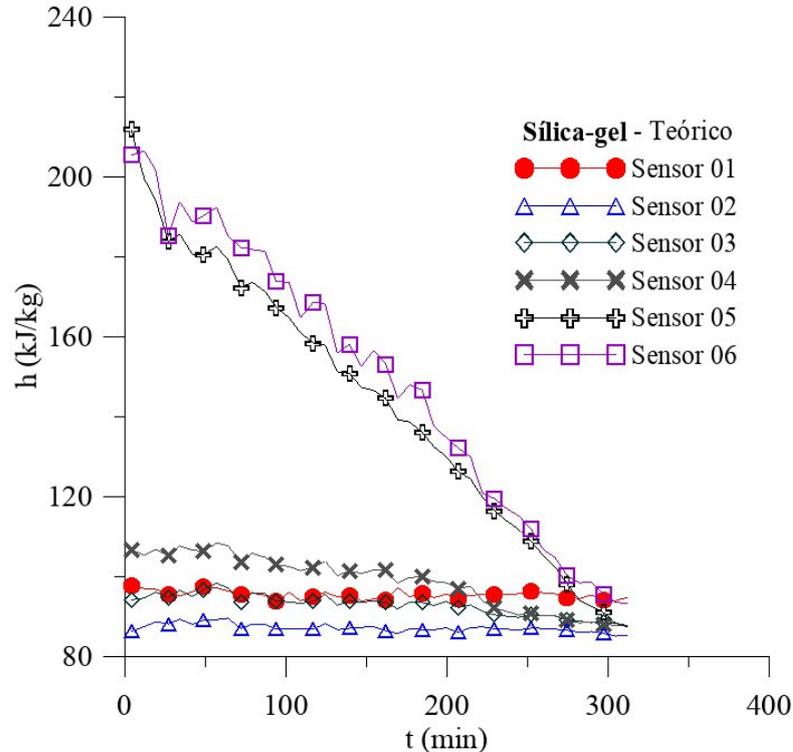
Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

Após a análise dos dados apresentados na Figura 4.3, verifica-se uma diferença média na umidade absoluta do ar de $3,15 \times 10^{-3}$ kg(água)/kg(ar seco), ao se usar sílica-gel como dessecante.

Como a conservação da massa do ar seco foi mantida ao longo do experimento e a energia interna do sistema permaneceu constante, as curvas dos Sensores 03, 04, 05 e 06 apresentaram sobreposição. Esse comportamento indica que a umidade absoluta se manteve equivalente da saída da unidade dessecante, até o final do coletor solar.

Na Figura 4.4 ilustra-se as flutuações da entalpia específica do ar ao longo do tempo. Esses dados foram obtidos utilizando o software CATT 3, cuja informação torna-se crucial para a avaliação da eficiência do coletor solar com a unidade dessecante. A análise da entalpia permite compreender melhor o desempenho térmico do sistema, fornecendo uma base sólida para calcular a eficiência e otimizar o funcionamento do coletor solar.

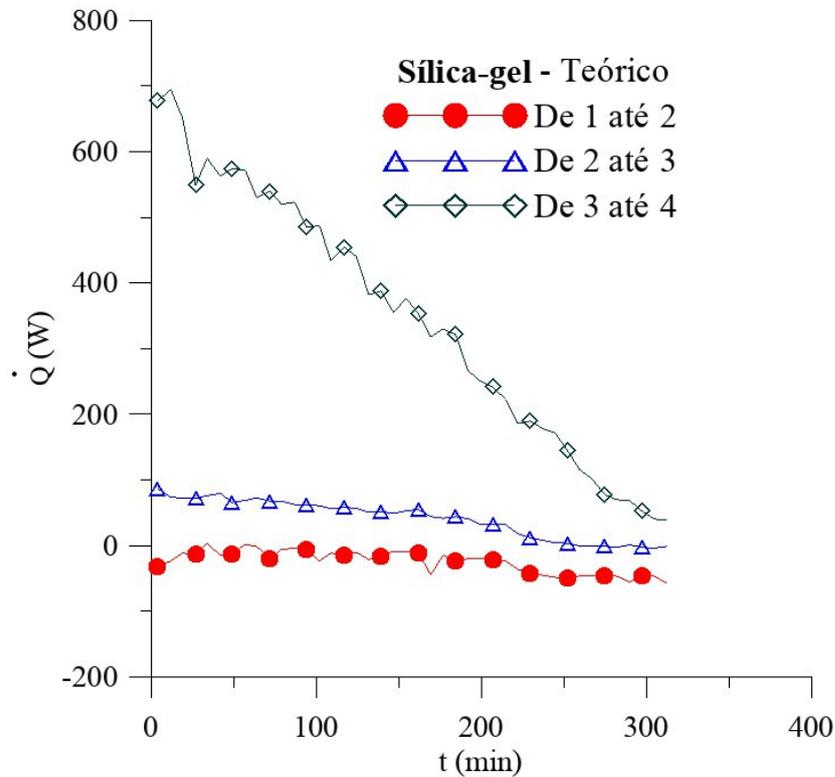
Figura 4.4 – Histórico transiente da entalpia do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com sílica-gel.



Ao se analisar a Figura 4.4 verifica-se um aumento significativo nos valores de entalpia ao longo do sistema térmico, atingindo seu maior valor no interior do coletor solar (Sensor 05). Este aumento na entalpia específica do ar é resultado da maior absorção e armazenamento de calor no interior do coletor solar, sugerindo que essas regiões estão expostas a condições térmicas mais severas do que as demais partes do sistema. Sendo esse, exatamente, o objetivo do coletor solar presente no sistema térmico.

Na Figura 4.5 são apresentados os valores da taxa de transferência de calor em cada um dos volumes de controle ao longo do tempo. Para melhor entendimento do sistema térmico, ver Figura 3.27.

Figura 4.5 – Histórico transiente da taxa de calor recebido pelo ar em diferentes trechos do sistema térmico para o experimento com sílica-gel.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador, 2024.

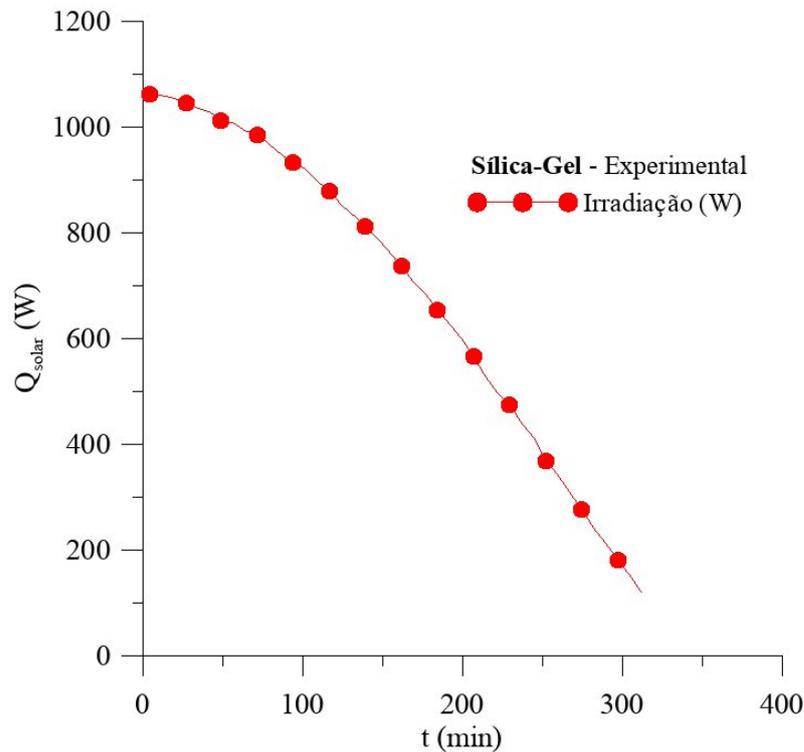
Ao analisar a Figura 4.5, observa-se que no volume de controle de 1 até 2, os valores da taxa de transferência de calor começam a ser negativos, indicando uma perda de calor para o ambiente, devido ao gasto de energia usada para o acionamento do soprador.

Já no trecho 2 até 3, que representa a tubulação de ar entre a saída da unidade dessecante e a entrada do coletor solar, ocorre um fluxo de calor positivo que reflete no aumento da temperatura do ar no interior da tubulação, com conseqüente, redução na umidade relativa do ar.

No trecho 3 até 4, que corresponde ao coletor solar, o fluxo de calor recebido pelo ar cresce significativamente, mas foi diminuindo ao longo do tempo, devido a redução da radiação incidente, provocada pelo movimento de rotação da Terra. A grande intensidade inicial é atribuída à alta absorção de radiação solar pelo coletor solar durante o período de maior insolação.

Com o avanço do tempo e o início do entardecer, a radiação solar diminuiu, resultando em uma redução gradual da transferência de calor para o coletor solar. Para comprovar esta explicação, na Figura 4.6 está plotada a intensidade da insolação na área plana do coletor solar ao longo do tempo de experimento.

Figura 4.6 – Histórico transiente da radiação solar no coletor para o experimento com sílica-gel.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

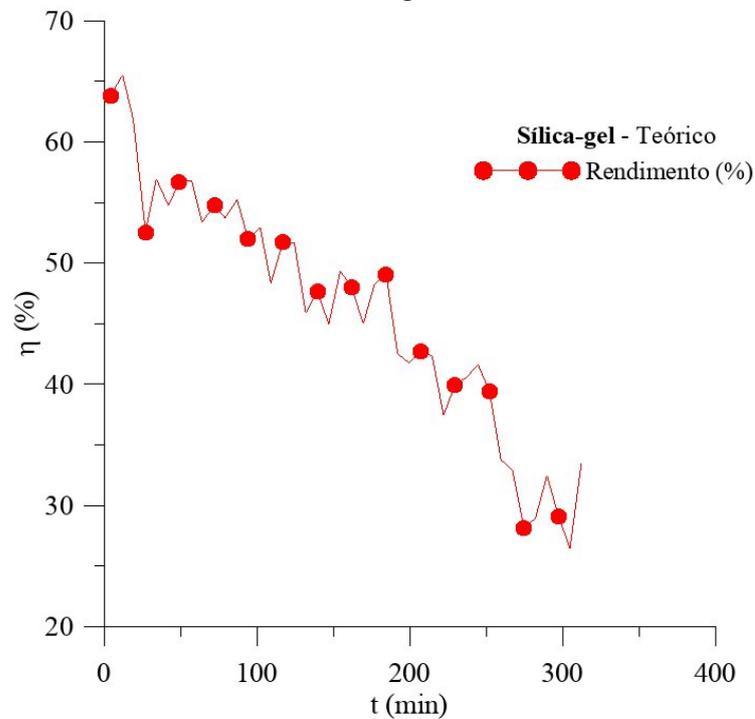
No início do experimento, a radiação solar atinge o coletor em um ângulo mais direto, resultando em uma alta intensidade de energia incidente. No entanto, à medida que o sol se aproxima do horizonte, o ângulo de incidência se torna mais oblíquo, diminuindo a quantidade de energia solar que o coletor pode absorver. Esse efeito é mais pronunciado no final da tarde, quando a intensidade da radiação solar está reduzida devido à maior distância que os raios solares percorrem através da atmosfera.

Além do efeito do entardecer, o aumento da umidade do ar também contribui para a redução do \dot{Q}_{solar} , o que aumenta a absorção e dispersão da radiação solar antes que ela atinja o coletor. O vapor d'água e as gotículas de água em suspensão podem atuar como filtros, atenuando a radiação solar e reduzindo a quantidade de energia que chega ao coletor.

Na Figura 4.7, está ilustrado o rendimento térmico do coletor solar em função do tempo de processo.

Analisando os resultados apresentados na Figura 4.7, pode-se verificar que, inicialmente, durante o período de maior insolação, o coletor solar absorve uma quantidade significativa de radiação solar e, conseqüentemente, gera-se uma alta taxa de transferência de calor. Para o ar, no entanto, conforme o dia avança e o entardecer se aproxima, a intensidade da radiação solar diminui, reduzindo a quantidade de energia que o coletor pode absorver e converter em calor, reduzindo, por sua vez, a performance energética do coletor.

Figura 4.7 – Histórico transiente do rendimento térmico do coletor para o experimento com sílica-gel.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador, 2024.

Além da redução na radiação solar disponível, a eficiência do coletor também pode ser afetada por uma diminuição na diferença de temperatura entre o coletor e o ambiente. Com o passar do tempo, a diferença de temperatura entre o coletor e o ambiente externo diminui à medida que o coletor solar se ajusta às condições de iluminação reduzida, resultando em uma menor taxa de transferência de calor do ar em seu interior.

A Tabela 4.1, relaciona os valores médios da diferença de entalpia (Δh), do trabalho ao longo do tempo (\dot{W}), das taxas de transferência de calor e do rendimento térmico, nos volumes de controle ao longo do sistema térmico.

Tabela 4.1 – Médias resultantes do experimento com sílica-gel

COMPONENTE	Δh (kJ/kg)	\dot{W} (W)	\dot{Q} (W)	\dot{Q}_{solar} (W)	η_{coletor} (%)
SOPRADOR + UNIDADE DESSECANTE (TRECHO 1-2)	- 2585,47	6	- 24,97	—	—
TUBULAÇÃO (TRECHO 2-3)	5970,24	—	40,90	—	—
COLETOR SOLAR (TRECHO 3-4)	50428,33	—	345,87	690,39	46,06

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2024).

4.1.2 Experimento utilizando carvão ativado como material dessecante

Este experimento foi realizado no dia 07/11/2023, no período das 10:36 hs da manhã, até às 15:39 hs. O principal objetivo do experimento é avaliar a eficiência dos dessecantes em um intervalo de tempo que compreende desde o período próximo ao meio-dia até o entardecer. Esse período foi escolhido porque, à medida que a tarde avança, a umidade relativa do ar tende a aumentar.

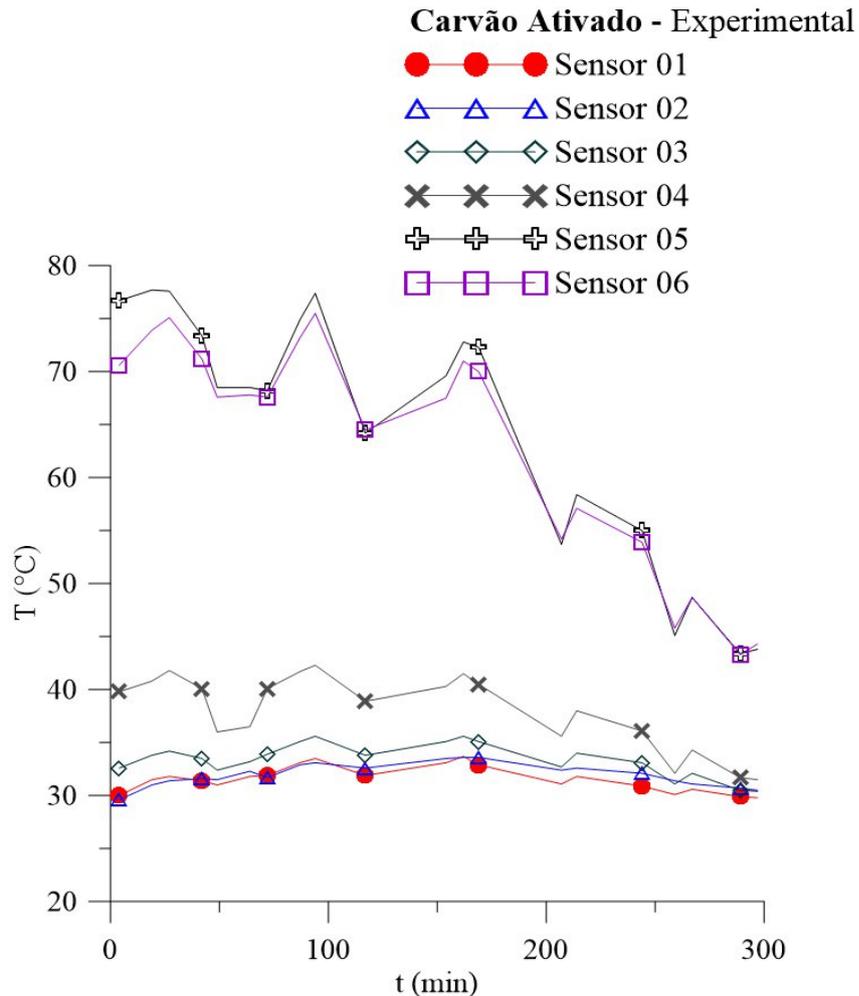
Embora o experimento tenha sido encerrado em um período mais curto, o SMAD coletou uma quantidade suficiente de dados para permitir uma análise precisa do comportamento do dessecante ao longo do período de estudo.

Foram realizados diversos experimentos, contudo os demais experimentos com carvão ativado foram excluídos devido à passagem de nuvens durante as medições, o que provocou variações bruscas nos dados registrados tanto pelo pirômetro do LEIAM/UFCG quanto pelo SMAD. Essas oscilações comprometem a precisão da análise.

Na prática padronizando o horário de realização dos experimentos, as condições climáticas ainda podem apresentar variações ao longo do período de estudo. Diante disso, torna-se essencial a análise teórica para compreender de forma mais precisa o comportamento do dessecante e sua interação com o ambiente.

Na Figura 4.8, está ilustrado os valores das temperaturas registradas ao longo do período experimental. Estes dados experimentais são essenciais para a análise detalhada do desempenho térmico do dessecante durante o experimento.

Figura 4.8 – Histórico transiente da temperatura do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com carvão ativado.

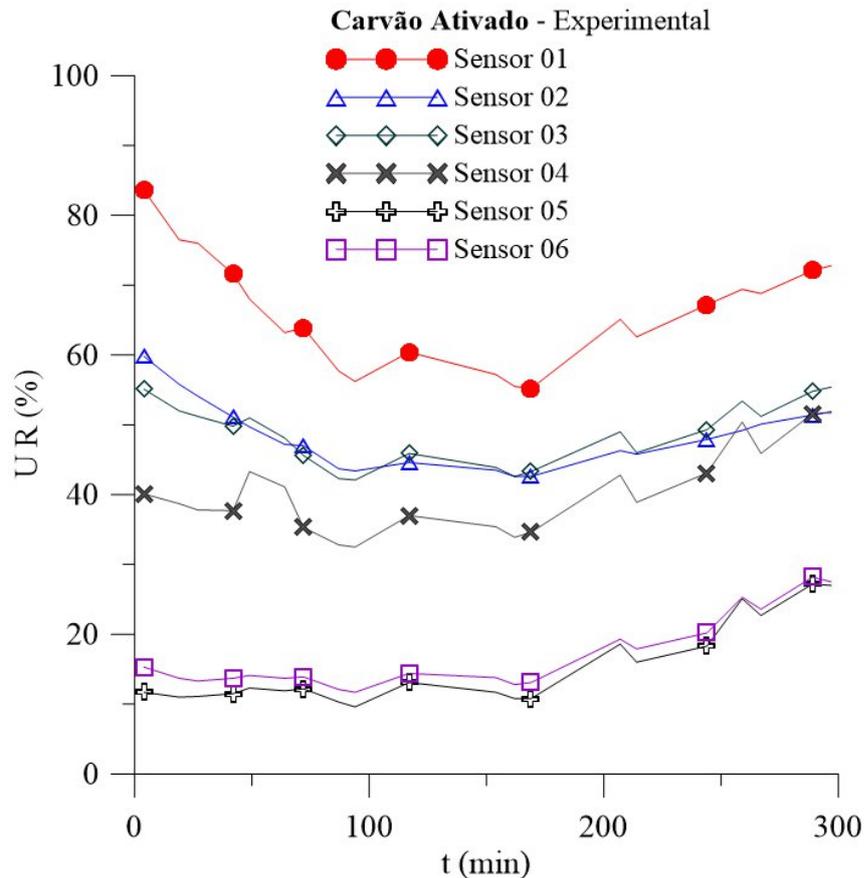


Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

Neste experimento, os sensores foram posicionados de forma idêntica ao experimento com sílica-gel. Observa-se que ocorreram variações nas medições devido à presença de nuvens ao longo do dia. Mesmo assim, é possível identificar um padrão nos resultados obtidos com o carvão ativado, especialmente nos Sensores 5 e 6, que registraram as temperaturas mais altas. No decorrer do dia, esses sensores apresentaram uma queda de temperatura mais acentuada, pois estão localizados na zona de maior aquecimento do coletor solar. Na Figura 4.9, observa-

se a variação dos valores da umidade relativa ao longo do tempo deste experimento.

Figura 4.9 – Histórico transiente da umidade relativa do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com carvão ativado

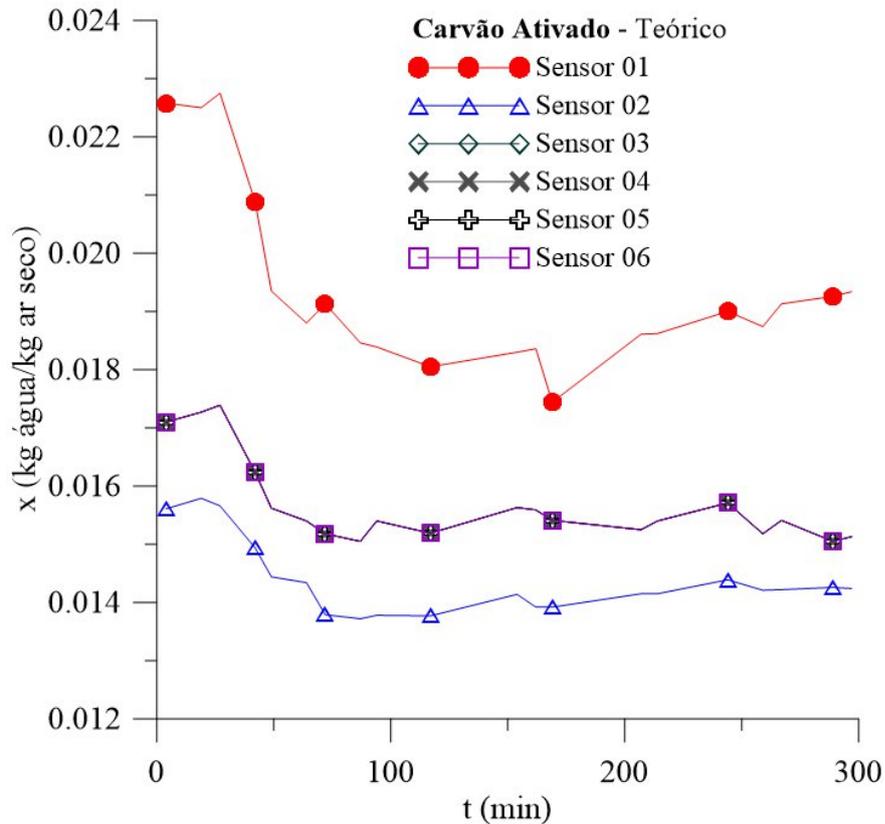


Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

Assim como no experimento com a sílica-gel, os valores mais altos de umidade relativa foram registrados no Sensor 1, enquanto os mais baixos ocorreram nos Sensores 5 e 6 devido aos valores de temperaturas nestes locais. Observa-se também uma proximidade do ar entre as medições dos Sensores 2 e 3, o que indica que o carvão ativado está retendo a umidade de forma eficaz antes da entrada do coletor solar.

Em comparação ao experimento com a sílica-gel, os valores de umidade relativa do ambiente externo ao sistema térmico, neste caso, foram significativamente mais altos ao longo do dia, o que reflete o desempenho do dessecante sob essas condições. Isso sugere que o dessecante foi mais exigido ao longo do experimento. Abaixo, na Figura 4.10, tem-se o comportamento da umidade absoluta do ar ao longo do tempo de experimento.

Figura 4.10 – Histórico transiente da umidade absoluta do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com carvão ativado



Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

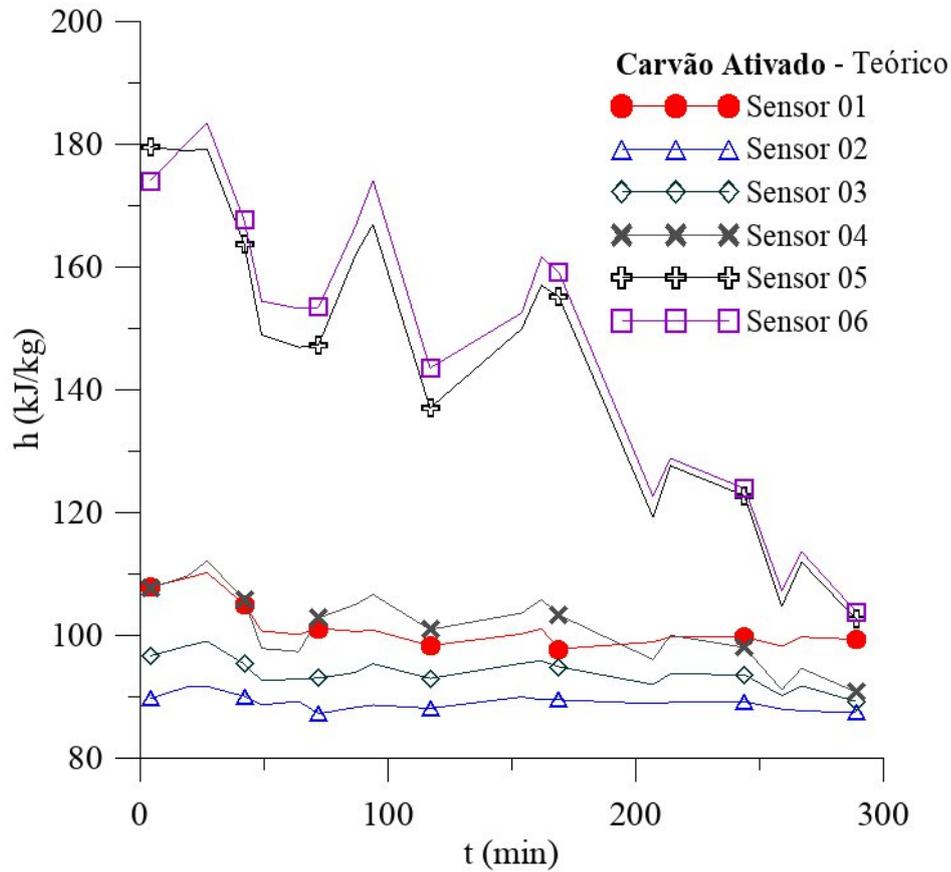
A análise do comportamento das curvas revelou que o Sensor 2 registrou os menores níveis de umidade absoluta, demonstrando a efetiva atuação do dessecante. Quando comparado ao experimento com sílica-gel, observou-se que a diferença de umidade absoluta entre o Sensor 1 e o Sensor 2 foi mais acentuada ao longo do tempo, evidenciando uma variação mais significativa entre esses pontos de medição.

Os níveis registrados pelo Sensor 3 mantiveram-se constantes ao longo do experimento, uma vez que não houve variação na umidade absoluta a partir do Sensor 2. Isso ocorreu devido à ausência de alterações nesse parâmetro até a saída do sistema, uma vez que o sistema é isolado. A falta de absorção adicional indica que não há materiais capazes de absorver ou fornecer umidade para o ar de secagem, além da inexistência de qualquer produto a ser seco dentro do coletor solar. Dessa forma, a transferência de umidade a partir do Sensor 3 foi limitada, garantindo a homogeneidade dos valores registrados ao longo do experimento.

Na Figura 4.11, observa-se a variação dos níveis de entalpia ao longo do tempo de

experimentos, obtidos de forma teórica a partir do software CATT 3.

Figura 4.11 – Histórico transiente da entalpia do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com carvão ativado.



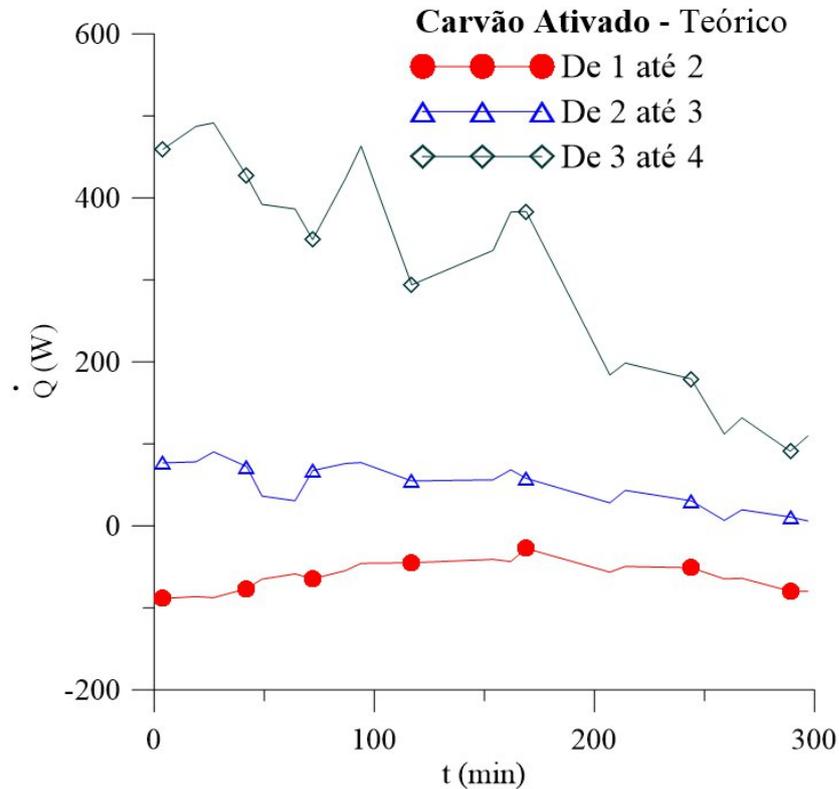
Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

No eixo das ordenadas, é possível observar que os níveis de entalpia foram mais baixos em comparação com o experimento com sílica-gel, indicando uma maior demanda térmica ou uma retenção de calor menos intensa durante o processo.

Apesar desse decréscimo, o comportamento geral permanece semelhante ao observado anteriormente. Nos Sensores 05 e 06, os níveis de entalpia são mais altos no início do experimento e, em seguida, diminuem gradualmente ao longo do tempo, mostrando uma tendência de queda conforme o experimento avança.

Na Figura 4.12, observa-se os níveis de transferência de calor em cada volume de controle ao longo do tempo de experimento.

Figura 4.12 – Histórico transiente do fluxo de calor recebido pelo ar em diferentes trechos do sistema térmico para o experimento com carvão ativado.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

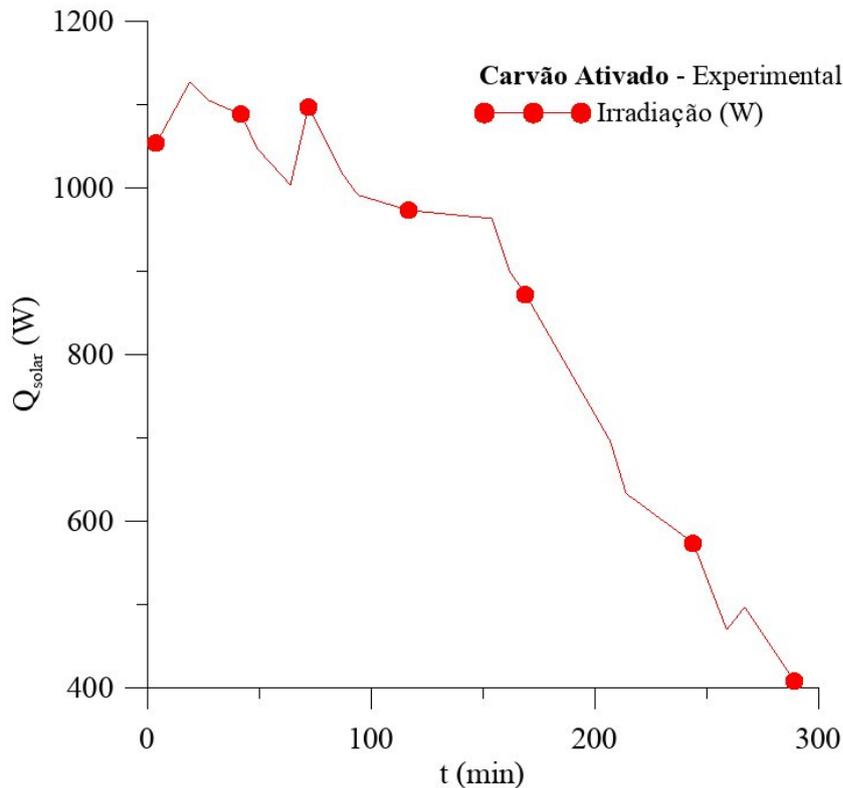
Pode-se observar que, ao longo do tempo de experimento, os maiores valores foram registrados no volume de controle entre os pontos 3 e 4. No entanto, diferentemente do experimento anterior, a transferência de calor foi significativamente menor. Esse comportamento indica uma variação no desempenho térmico do sistema, influenciada pelo tipo de dessecante utilizado, que afeta a capacidade de retenção e dissipação de calor nos diferentes pontos de controle.

Embora se trate do mesmo sistema estudado anteriormente, a substituição do dessecante provocou mudanças significativas no perfil de transferência de calor. O comportamento das curvas, contudo, apresenta semelhanças com o experimento realizado com sílica-gel, o que sugere que o padrão de resposta térmica permanece próximo ao modelo inicial, mesmo com a troca do material dessecante.

Na Figura 4.13, observa-se os níveis de irradiação ao longo do tempo de experimento. Diferentemente do experimento anterior, a irradiação apresentou níveis irregulares devido à passagem de nuvens e outros fenômenos atmosféricos. A incidência solar, que depende da

posição do sol e das condições climáticas, mostrou-se instável ao longo do experimento. Esses fatores naturais influenciaram as medições, resultando em variações na quantidade de energia solar disponível. Esses dados foram registrados pelo pirômetro, possibilitando a construção de uma curva de irradiação para análise.

Figura 4.13 – Histórico transiente da radiação solar no coletor para o experimento com carvão ativado.



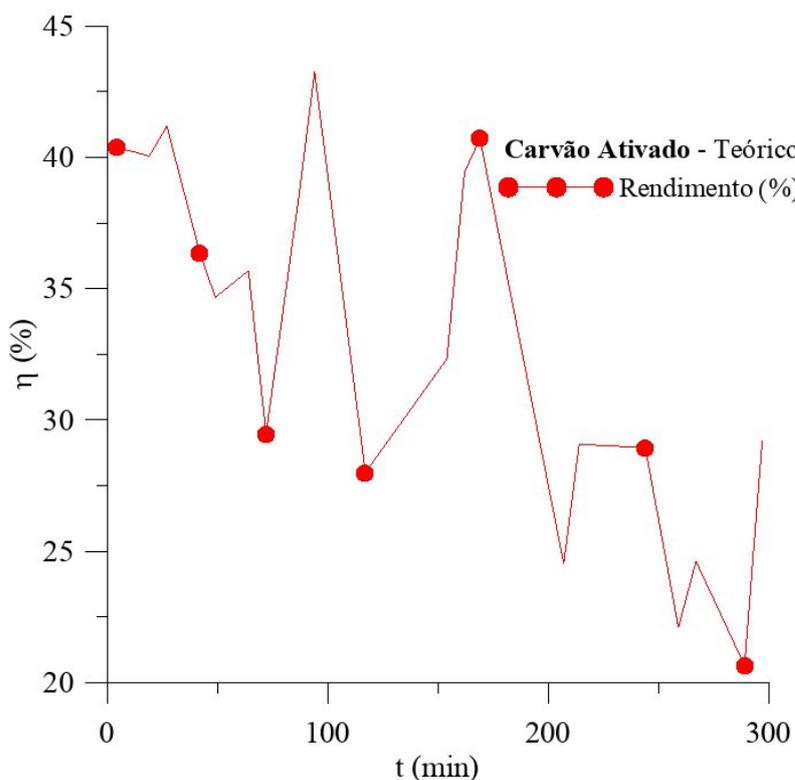
Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

Mesmo com essa irregularidade, é possível observar uma queda na curva similar à do experimento com sílica-gel, que apresenta uma incidência mais intensa no início e uma redução gradual com o passar do tempo. Esse comportamento é típico em experimentos com exposição solar direta, onde a intensidade da radiação tende a variar durante o dia, especialmente em função da trajetória solar e da presença de nuvens, que podem provocar uma queda acentuada nos valores medidos.

Na Figura 4.14, observa-se o rendimento térmico do sistema ao longo do tempo de experimento. Comparado com o experimento envolvendo sílica-gel, o rendimento do experimento com carvão ativado foi mais baixo. Isso ocorre porque a sílica-gel atua adsorvendo a umidade de maneira mais eficiente, retendo uma maior quantidade de água na sua superfície

porosa, o que melhora a desumidificação do ar e, conseqüentemente, o rendimento do sistema de secagem.

Figura 4.14 – Histórico transiente do rendimento térmico do coletor para o experimento com carvão ativado.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

O último gráfico apresenta um número reduzido de pontos de medição, uma vez que os resultados exibiram muitos picos, o que interferiu na linha de tendência. Apesar disso, foi possível analisar o comportamento do dessecante carvão ativado, e observou-se que seu rendimento foi inferior ao da sílica gel.

O carvão ativado, por sua vez, também possui uma estrutura porosa, sendo mais eficaz em processos de adsorção de impurezas e gases do que em reter umidade. Dessa forma, sua capacidade de desumidificação é reduzida em comparação à sílica-gel, o que impacta negativamente no rendimento do experimento.

Mesmo assim, ajustando a quantidade de carvão ativado, é possível alcançar um resultado tão bom quanto o da sílica-gel, além de aproveitar as vantagens específicas do carvão ativado. Entre essas vantagens, destacam-se a sua alta capacidade de adsorção de compostos orgânicos e gases, o que pode ser útil em ambientes onde o controle de odores ou de certos

poluentes seja desejado.

Na Tabela 4.2 estão explicitados os valores da diferença de entalpia, do trabalho ao longo do tempo, das taxas de transferência de calor e do rendimento térmico, nos volumes de controle ao longo do sistema térmico.

Tabela 4.2 – Médias resultantes do experimento com carvão ativado.

COMPONENTE	Δh (kJ/kg)	\dot{W} (W)	\dot{Q} (W)	\dot{Q}_{solar} (W)	η_{coletor} (%)
SOPRADOR + UNIDADE DESSECANTE (TRECHO 1-2)	-7485,79	6	-60,36	—	—
TUBULAÇÃO (TRECHO 2-3)	7506,84	—	51,78	—	—
COLETOR SOLAR (TRECHO 3-4)	47095,78	—	325,02	938,71	33,2

Fonte: Elaborada pelo pesquisador (2024).

Ao observar os dados da tabela, nota-se que o experimento com carvão ativado apresentou um rendimento inferior em comparação ao experimento com sílica-gel. Essa diferença se deve, em parte, às propriedades distintas de cada dessecante, que influenciam diretamente na capacidade de adsorção de umidade e, conseqüentemente, na eficiência do coletor solar. A sílica-gel apresenta uma estrutura altamente eficiente para a absorção de umidade, o que a torna mais eficaz em situações em que a remoção de água do ar é essencial para o desempenho otimizado do sistema.

Além das características dos dessecantes, fatores externos, como a variação na incidência solar durante o experimento, também contribuíram para essa diferença nos resultados. Flutuações na radiação solar, provocadas por fatores atmosféricos como a presença de nuvens, podem ter impactado as médias de rendimento, uma vez que influenciam a quantidade de energia disponível para o processo. Dessa forma, tanto as propriedades intrínsecas dos materiais quanto as condições ambientais atuaram em conjunto para determinar o desempenho final observado nos experimentos.

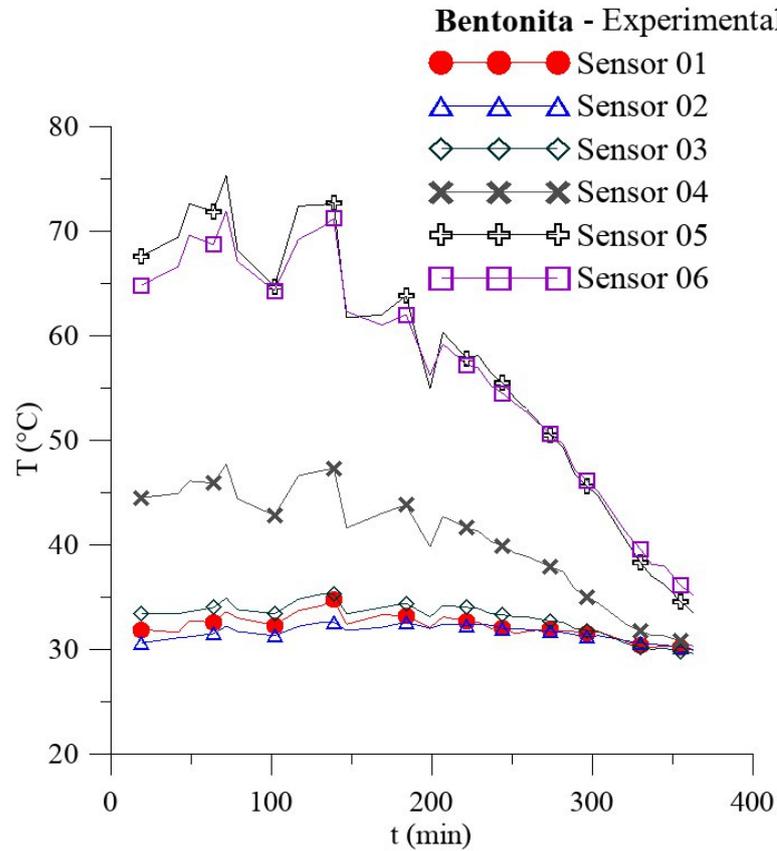
4.1.3 Experimento utilizando bentonita como material dessecante

O experimento foi conduzido em 22/11/2023, com o início das medições registrado às 10:30 hs da manhã e o encerramento ocorrendo às 16:58 hs da tarde. Esse intervalo de tempo foi escolhido de forma a abranger uma ampla faixa horária, garantindo uma coleta de dados mais completa e representativa das variações ao longo do dia.

Ressalta-se, mais uma vez, que a principal motivação para a definição desse período foi englobar o horário próximo ao meio-dia, possibilitando uma análise detalhada do comportamento do dessecante nas horas subsequentes, especialmente durante a transição para o entardecer. Além disso, essa escolha permitiu a realização de um elevado número de medições pelo Sistema de Medição e Aquisição de Dados (SMAD), viabilizando a obtenção de um conjunto robusto de informações para fundamentar as análises teóricas e aprimorar a compreensão do desempenho dos materiais utilizados no experimento.

Na Figura 4.15, pode se observar os valores das temperaturas registradas ao longo do tempo de duração do experimento. A análise detalhada desses dados permitirá compreender melhor como as temperaturas se comportaram em resposta às condições ambientais e à eficiência da bentonita, que foi o dessecante utilizado em mesma quantidade que as utilizadas para sílica-gel e carvão ativado.

Figura 4.15 – Histórico transiente da temperatura do ar em diferentes pontos do sistema térmico para bentonita.



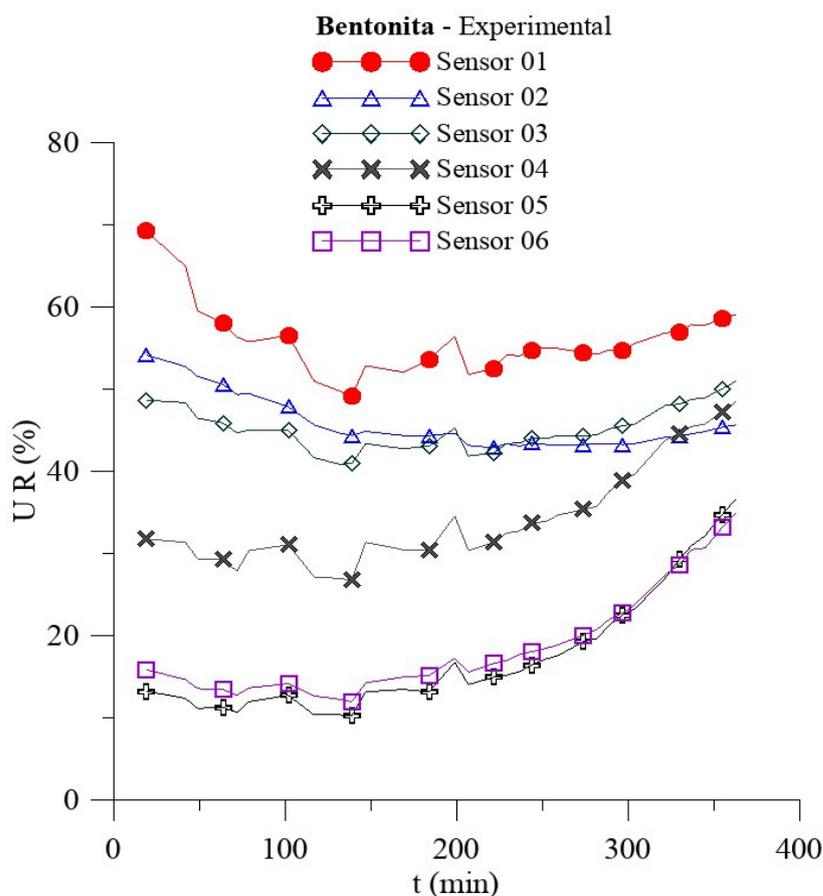
Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

Na Figura 4.15, observa-se o comportamento da temperatura ao longo do tempo neste experimento, verificando-se picos durante o dia devido a instabilidades na atmosfera, como variações na intensidade da radiação solar, formação de nuvens e mudanças na direção do vento. Essas flutuações afetam a distribuição de calor no sistema, gerando variações nos dados captados ao longo do dia.

Os Sensores 05 e 06, assim como em outros experimentos, registraram uma queda mais acentuada, atribuída ao seu posicionamento em uma zona que já estava aquecida desde o início do experimento e que, com o entardecer, experimentou um resfriamento mais rápido. Por outro lado, os Sensores 01, 02 e 03 mantiveram leituras mais próximas entre si e, com o passar do tempo, essas temperaturas se aproximaram ainda mais, indicando uma estabilização em comparação com os demais sensores.

Os valores da temperatura do ar, neste caso, foram mais baixas quando comparadas com os valores obtidos com sílica-gel e carvão ativado. Na Figura 4.16, observa-se a variação da umidade relativa do ar ao longo do tempo de experimento.

Figura 4.16 – Histórico transiente da umidade relativa do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com bentonita.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador, (2024).

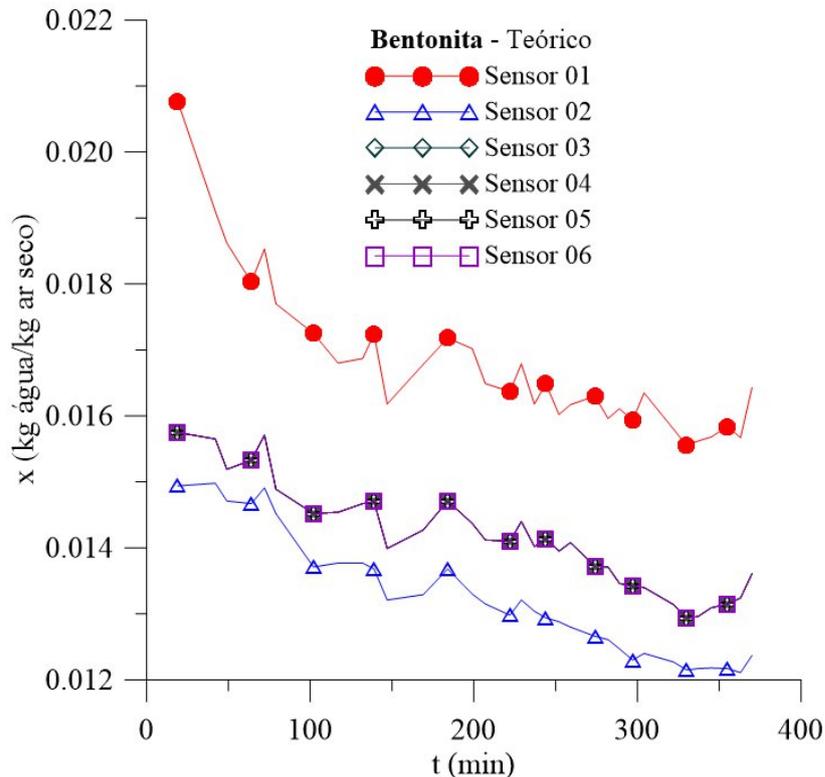
Ao analisar a Figura 4.16, percebe-se que os menores níveis de umidade relativa ao longo do tempo de experimento foram registrados pelos Sensores 05 e 06. Em contraste, os níveis de umidade detectados pelo Sensor 01, responsável pelo monitoramento da temperatura ambiente, foram significativamente mais elevados em relação aos demais experimentos. Esse comportamento demonstra a influência das condições externas, destacando que o ambiente fora do sistema possui maior umidade relativa em comparação com as regiões internas controladas.

No caso do Sensor 02, foi possível observar o potencial de absorção de água pela bentonita, que se mostrou mais eficaz em comparação ao Sensor 01, responsável pelas

condições externas. Esse contraste reforça a capacidade da bentonita de reduzir a umidade relativa dentro do sistema, evidenciando seu papel como um material dessecante eficiente.

Na Figura 4.17, observa-se o comportamento da umidade absoluta deste experimento ao longo do tempo.

Figura 4.17 – Histórico transiente da umidade absoluta do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com bentonita.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador, (2024).

Comparado aos outros experimentos, a umidade absoluta do experimento com bentonita apresentou valores bem diferentes entre o Sensor 01 e os demais sensores, devido à capacidade da bentonita de absorver a umidade de forma mais eficaz em determinadas condições, como também devido ao ar externo estar mais úmido.

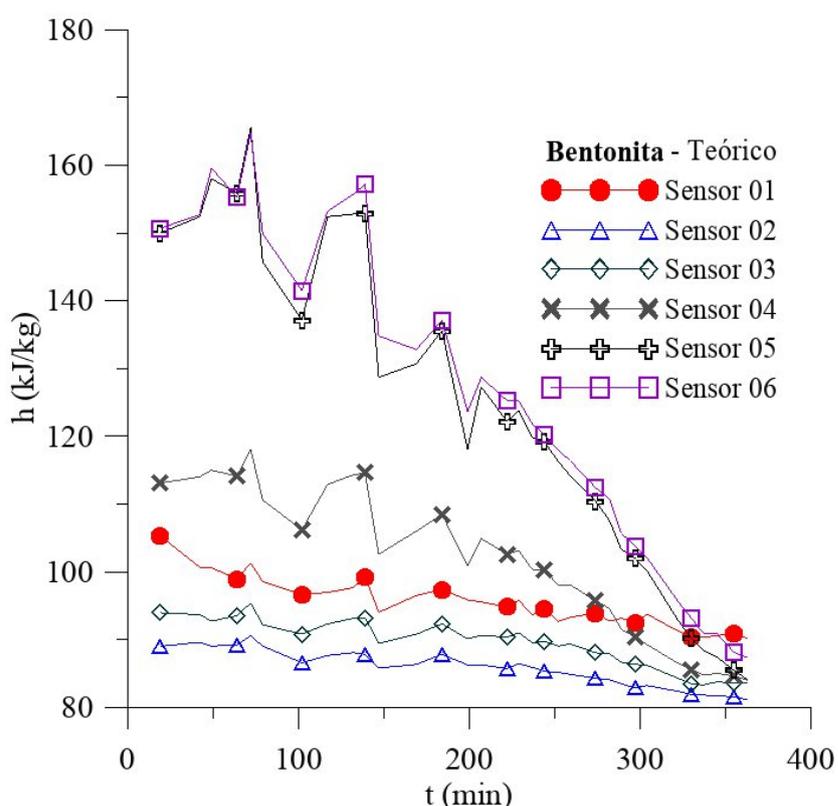
Dentre os dessecantes analisados, a sílica-gel apresentou um desempenho superior na remoção de umidade, seguida pelo carvão ativado e pela bentonita, cujos os valores analisados variaram ao longo do experimento. Como todos os testes foram realizados sob condições ambientais semelhantes, com dias ensolarados e variações reduzidas de temperatura e umidade relativa, os resultados observados refletem principalmente as diferenças na capacidade de adsorção de umidade absoluta de cada material.

A bentonita, apesar de sua capacidade de retenção de umidade, apresentou menor eficiência em comparação com os demais dessecantes, enquanto o carvão ativado exibiu um comportamento intermediário. Esses fatores indicam a necessidade de uma análise mais detalhada para compreender as relações entre as propriedades dos dessecantes e sua performance em diferentes condições de operação.

Observa-se que a bentonita apresentou menor eficiência na remoção de umidade, uma vez que os níveis médios de umidade absoluta registrados no local do Sensor 02 foram de 0,0132 kg de água por kg de ar seco. Em comparação, o carvão ativado obteve um valor de 0,01327 kg de água por kg de ar seco, enquanto a sílica-gel registrou 0,01431 kg de água por kg de ar seco. Vale destacar que esse ponto de medição está localizado dentro da unidade dessecante, o que possibilita uma avaliação direta da eficiência de cada material sob as mesmas condições experimentais.

Na Figura 4.18, observa-se os níveis de entalpia, obtidos teoricamente, variando ao longo do tempo de experimento.

Figura 4.18 – Histórico transiente da entalpia do ar em diferentes pontos do sistema térmico para o experimento com bentonita.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

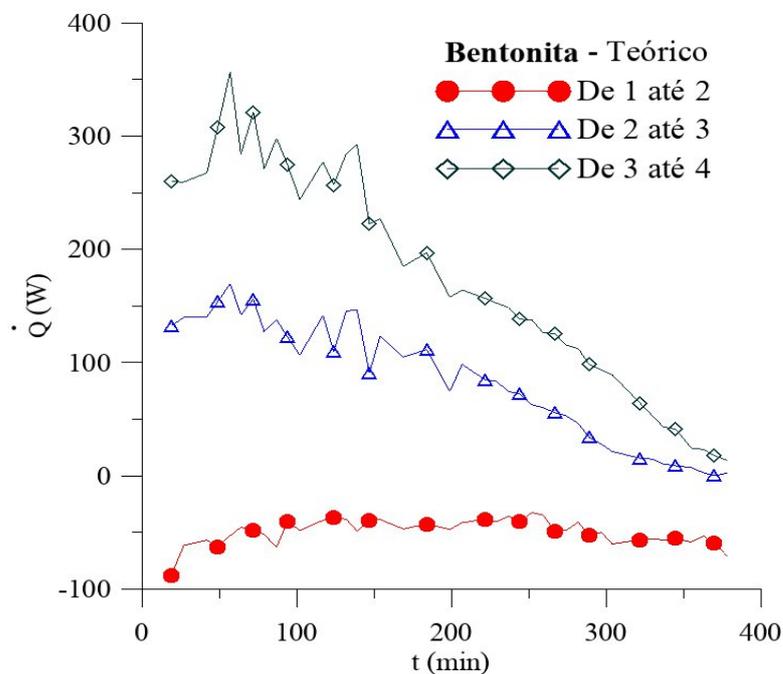
A entalpia do sistema apresentou valores mais elevados nos Sensores 05 e 06, o que pode ser atribuído às temperaturas mais altas registradas nessas áreas. O aumento na entalpia, que reflete a quantidade total de energia térmica disponível, está diretamente relacionado ao aumento de temperatura, uma vez que, conforme o calor se acumula, o potencial energético do sistema cresce. Esses sensores, localizados em regiões com maior exposição térmica ou em pontos críticos do sistema de secagem, destacam-se por captar as flutuações de energia, mostrando a importância da alta temperatura no processo de aquecimento e transferência de calor.

Além disso, foram observados picos na entalpia ao longo do período experimental, causados por instabilidades no decorrer do dia, como variações na intensidade da radiação solar ou alterações nas condições atmosféricas. Essas flutuações resultaram em mudanças bruscas na energia armazenada e transferida no sistema, evidenciando a influência dos fatores externos sobre a eficiência térmica e o comportamento dos sensores. Tais picos indicam que, mesmo em condições controladas, o ambiente externo exerce um impacto significativo sobre o desempenho térmico, especialmente nos pontos onde a medição foi mais sensível a essas variações.

A entalpia registrada pelo Sensor 02, dentro da unidade com bentonita, foi mais baixa em comparação ao Sensor 01, que monitorava o ambiente externo, devido à ação da bentonita como dessecante, reduzindo o vapor de água presente no ar e, conseqüentemente, reduzindo a entalpia. Em comparação, com a mesma massa, a sílica gel mostrou-se mais eficiente em situações de alta umidade, enquanto o carvão ativado apresentou desempenho inferior. Assim, cada material dessecante influencia de modo distinto a transferência de calor e a entalpia.

A Figura 4.19 mostra os valores da transferência de calor do sistema ao longo do tempo de experimento.

Figura 4.19 – Histórico transiente do fluxo de calor recebido pelo ar em diferentes trechos do sistema térmico para o experimento com bentonita.



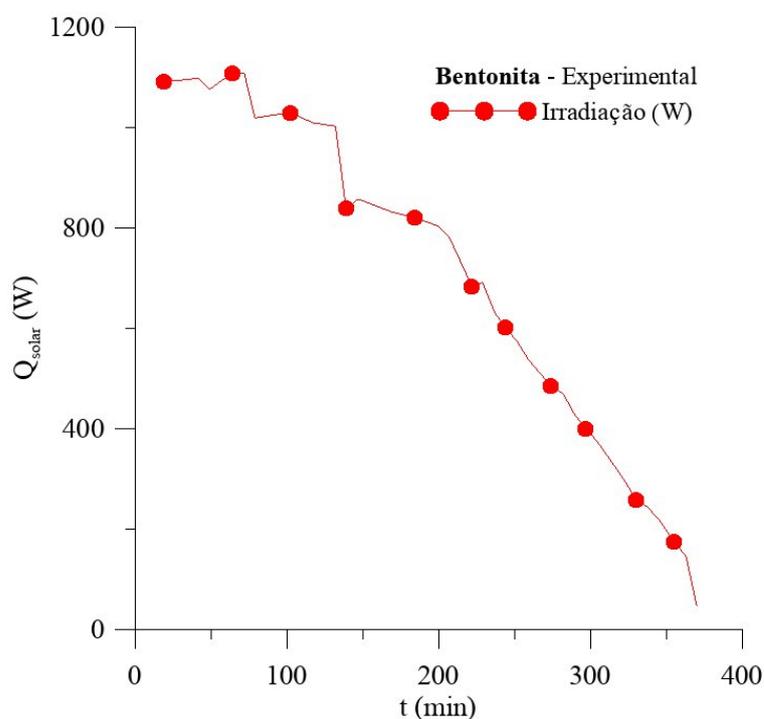
Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

No volume de controle entre os pontos 3 e 4, definido pelo coletor solar, ocorreram muitos picos devido às instabilidades externas, como variações na radiação solar e nas condições climáticas, que afetaram diretamente a medição de temperatura e umidade. Essas flutuações resultaram em oscilações nas medições térmicas, dificultando a estabilidade do sistema.

No volume de controle entre os pontos 1 e 2, a transferência de calor apresentou maior eficiência no experimento com sílica-gel, confirmando seu desempenho superior em comparação à bentonita e ao carvão ativado. A sílica-gel demonstrou maior capacidade de remoção de umidade, especialmente em condições de temperatura estável, enquanto a bentonita, apesar de sua estrutura porosa, reteve uma quantidade inferior de umidade. O carvão ativado, por sua vez, apresentou menor eficiência na remoção de umidade em ambientes com alta umidade e temperaturas variáveis, confirmando a maior efetividade da sílica-gel no sistema analisado.

Na Figura 4.20, observa-se os valores da irradiação solar ao longo do tempo de experimento.

Figura 4.20 – Histórico transiente da radiação solar no coletor para o experimento com bentonita.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

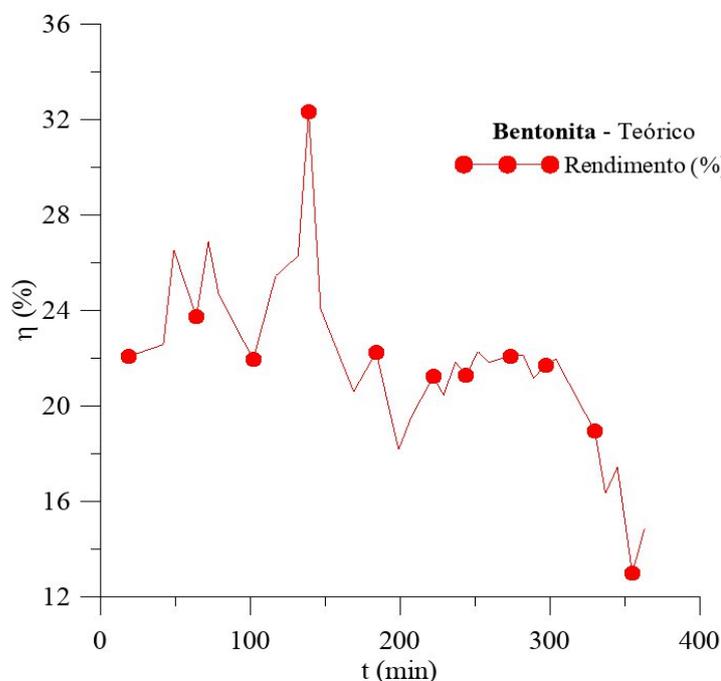
A redução da irradiação ao longo do experimento ocorreu devido à diminuição da intensidade solar durante o entardecer. Com o tempo, a saturação dos dessecantes comprometeu sua capacidade de absorver umidade do ar, influenciando o desempenho do processo térmico. Esse efeito tornou-se mais evidente à medida que a radiação solar diminuía, impactando a transferência de calor no sistema.

A sílica-gel apresentou a maior capacidade de absorção de umidade entre os dessecantes analisados, seguida pelo carvão ativado e, por último, pela bentonita. Sua eficiência superior deve-se à sua estrutura amorfa e alta afinidade por moléculas de água, permitindo uma rápida e eficiente remoção da umidade do ar. O carvão ativado, embora também apresente capacidade de adsorção devido à sua superfície microporosa, mostrou um desempenho inferior ao da sílica-gel. A bentonita, por sua vez, demonstrou a menor capacidade de remoção de umidade, entre os dessecantes analisados.

A eficácia da bentonita pode ser maior que o carvão ativado e a sílica-gel em condições de baixa umidade relativa e temperaturas constantes. Como possui alta afinidade por água, permite uma absorção gradual e eficaz em ambientes com variações térmicas mais suaves.

Na Figura 4.21, observa-se os valores do rendimento do coletor ao longo do tempo de experimento.

Figura 4.21 – Histórico transiente do rendimento térmico para o experimento com bentonita.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

O rendimento térmico do sistema ao se utilizar bentonita foi o mais baixo entre os dessecantes analisados, devido à sua capacidade limitada de adsorção em comparação com a sílica-gel e o carvão ativado. A sílica-gel demonstrou a melhor eficiência na remoção de umidade, devido à sua alta afinidade por moléculas de água, o que permite uma remoção mais eficaz e duradoura da umidade. O carvão ativado, embora apresente boa capacidade de adsorção, teve um desempenho intermediário. Por sua vez, a bentonita, por ser um material argiloso, possui uma capacidade de adsorção inferior, tornando-se rapidamente saturada em ambientes com alta concentração de vapor d'água, o que reduz sua eficácia ao longo do tempo.

Adicionalmente, a bentonita apresenta uma taxa de adsorção mais lenta em comparação à sílica-gel e ao carvão ativado. Esses últimos possuem características que favorecem uma adsorção mais rápida e eficiente, devido à maior afinidade por moléculas de água. É importante destacar que a massa de bentonita, carvão ativado e sílica-gel foi mantida constante durante o experimento, com valores equivalentes em quilogramas. No entanto, devido às diferenças nas propriedades de adsorção, a sílica-gel e o carvão ativado demonstraram maior capacidade de

adsorção de umidade, resultando em um desempenho superior desses materiais em relação à bentonita.

A Tabela 4.3 mostra as médias evidenciadas a partir das análises experimentais e teóricas deste experimento, resumido em valores o desempenho da bentonita neste sistema.

Tabela 4.3 – Médias resultantes do experimento com bentonita

COMPONENTE	Δh (kJ/kg)	\dot{W} (W)	\dot{Q} (W)	\dot{Q}_{solar} (W)	η_{coletor} (%)
SOPRADOR + UNIDADE DESSECANTE (TRECHO 1-2)	-5909,39	6	-48,63	—	—
TUBULAÇÃO (TRECHO 2-3)	11448,18	—	79,03	—	—
COLETOR SOLAR (TRECHO 3-4)	24046,06	—	166,09	723,45	21,9

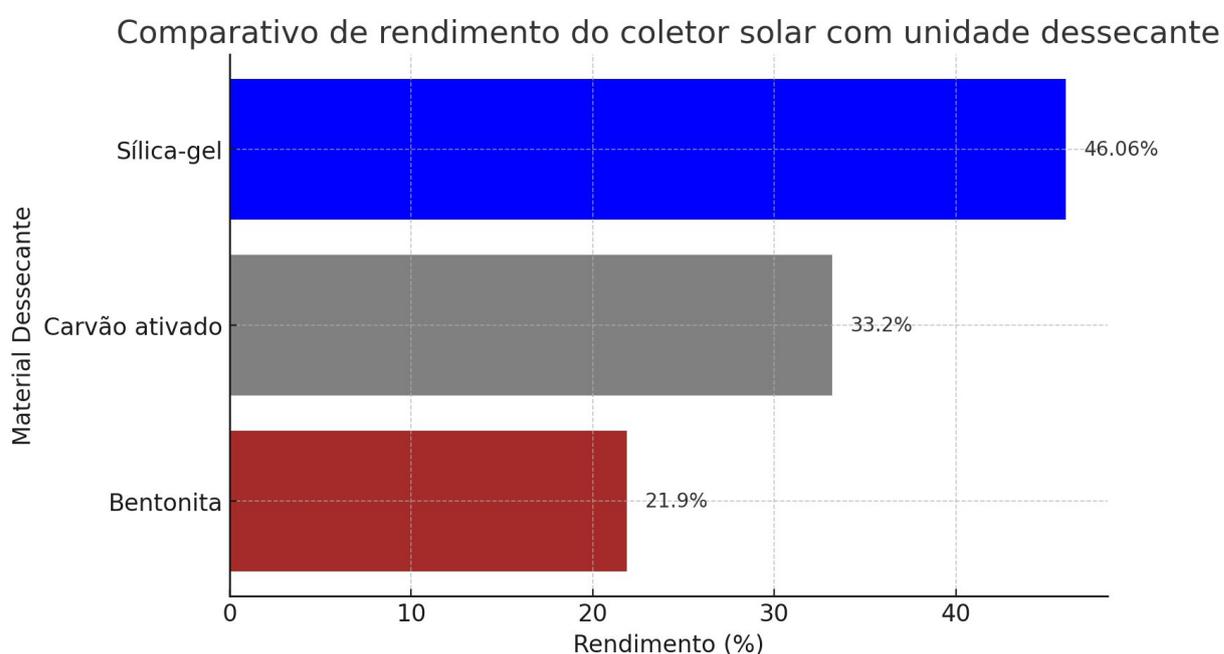
Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

Atualmente, as análises experimentais dos dessecantes utilizados no sistema de secagem solar estão sendo finalizadas, com foco na sílica-gel, carvão ativado e bentonita. As medições realizadas com o sistema de medição e aquisição de dados (SMAD) permitiram avaliar o desempenho de cada material, considerando sua influência na eficiência térmica e na umidade relativa dentro do coletor solar. Os resultados obtidos, tanto nas análises teóricas quanto experimentais, têm sido essenciais para entender as vantagens e limitações de cada dessecante, proporcionando uma base sólida para a escolha do material mais adequado para otimizar o processo de secagem solar.

As análises foram conduzidas de maneira consistente para todos os experimentos, e utilizaram a mesma quantidade de dessecante dentro de um sistema idêntico. Cada material foi analisado em um sistema com os mesmos componentes e condições operacionais, o que assegurou a comparabilidade dos resultados. Dessa forma, foi possível avaliar de forma precisa a contribuição de cada dessecante, mantendo a uniformidade nos parâmetros experimentais, para garantir que as diferenças de desempenho fossem atribuídas unicamente às características dos materiais analisados e condições do ar atmosférico.

Na Figura 4.22 apresenta-se um gráfico de barras comparativo, no qual são mostrados os rendimentos de cada um dos dessecantes estudados, expressos em porcentagens. O gráfico evidencia o desempenho superior da sílica-gel, oriundo de um maior rendimento de adsorção de umidade entre os materiais analisados. A comparação visual entre os dessecantes permite identificar claramente a eficiência de cada um, reforçando a escolha da sílica-gel como o material mais adequado para o sistema em estudo devido ao seu desempenho superior.

Figura 4.22 – Comparação de desempenho do sistema térmico ao se utilizar diferentes materiais dessecantes.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador (2024).

CAPÍTULO V
CONCLUSÕES

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises experimentais realizadas neste trabalho permitiram concluir que a sílica-gel apresentou um desempenho superior em relação ao carvão ativado e à bentonita no sistema de secagem solar. Os dados coletados ao longo dos experimentos mostraram que a sílica-gel proporcionou o melhor controle da umidade relativa e o aumento mais significativo do rendimento térmico do sistema, resultando em um processo de secagem mais eficiente. Esses resultados são consistentes com as propriedades do material, que é amplamente conhecido por sua alta capacidade de adsorção de umidade.

O experimento com o maior rendimento térmico coincidiu com um dia de maior irradiação solar em comparação aos outros experimentos. No entanto, mesmo com essa variação, os resultados confirmaram que a sílica-gel apresentou o melhor desempenho em termos de rendimento térmico. Essa superioridade foi observada independentemente das flutuações nas condições meteorológicas, como a intensidade da irradiação solar. A análise dos dados de temperatura, umidade relativa, umidade absoluta, entalpia e transferência de calor mostrou que a sílica-gel manteve sua eficiência de adsorção e desempenho térmico, reafirmando sua eficácia como o dessecante mais adequado para o sistema estudado.

Embora a sílica-gel tenha se destacado no desempenho geral do sistema, é importante destacar que o carvão ativado e a bentonita também apresentaram boas performances, com resultados próximos aos da sílica-gel em algumas condições. Em cenários específicos, como variações nas características ambientais ou em sistemas que priorizem outros fatores, como a absorção de certos contaminantes ou a necessidade de materiais com menor custo, o carvão ativado e a bentonita podem ter um rendimento igual ou até superior ao da sílica-gel. Portanto, a escolha do dessecante ideal depende de uma análise mais ampla que considere diferentes parâmetros operacionais e econômicos.

Foram realizados 12 experimentos no total, dos quais três foram selecionados com base no seu desempenho consistente e na ausência de anomalias nas marcações de tempo. Esses experimentos apresentaram menores variações nos picos de irradiação e mostraram maior alinhamento com os dados de irradiação obtidos pelo pirômetro. A escolha desses experimentos garantiu maior confiabilidade aos resultados, permitindo uma análise mais precisa e representativa do desempenho dos dessecantes.

A importância das medições realizadas pelo sistema de medição e aquisição de dados (SMAD) para este experimento não pode ser subestimada. O SMAD foi fundamental para

garantir que as medições de temperatura e umidade relativa do ar em diferentes pontos do sistema fossem feitas de forma precisa e consistente, permitindo uma análise detalhada e confiável do desempenho dos dessecantes. O uso desse sistema permitiu, não só a coleta de dados em tempo real, mas também o acompanhamento contínuo das variáveis do processo, o que foi fundamental para avaliar de forma precisa as características de cada material dentro do sistema de secagem solar.

A utilização do SMAD possibilitou uma maior confiança nos resultados obtidos, já que os dados foram coletados de forma controlada e em condições específicas para cada experimento. Além disso, a possibilidade de realizar medições em múltiplos pontos do sistema proporcionou uma visão abrangente do comportamento térmico e da dinâmica de umidade, o que foi fundamental para a compreensão dos efeitos dos diferentes dessecantes. Esse controle rigoroso das variáveis experimentais foi um dos principais diferenciais que permitiu uma análise comparativa precisa e a obtenção de conclusões robustas.

Em síntese, os experimentos realizados neste estudo demonstraram que a sílica-gel é o dessecante mais eficiente dentro do sistema de secagem solar estudado, mas também indicaram que o carvão ativado e a bentonita possuem potencial para alcançar desempenhos semelhantes, dependendo das condições específicas de operação. A combinação de medições precisas e análises detalhadas realizadas com o sistema de medição e aquisição de dados (SMAD) foi fundamental para a obtenção de resultados confiáveis e para a realização de uma avaliação comparativa eficaz, que pode servir de base para futuras otimizações e estudos sobre sistemas de secagem solar.

Como sugestões de trabalhos que podem ser desenvolvidos a partir das análises aqui apresentadas, propõe-se:

- Testar experimentalmente, a bentonita e o carvão vegetal, separadamente, afim de determinar o decaimento da capacidade de adsorção desses materiais, com o objetivo de informar sua viabilidade econômica (custo / benefício) e ambiental;
- Testar experimentalmente, outros materiais como dessecantes do ar de secagem no sistema térmico desenvolvido;
- Testar experimentalmente, o desempenho do sistema térmico na desidratação de produtos alimentícios como frutas e hortaliças;

- Utilizar como plataforma principal o ESP32 ou outro tipo de sistema de medição e aquisição de dados com conexões sem fio (Wi-fi ou Bluetooth), para a monitoração dos parâmetros de processo.
- Testar outros tipos de fontes de alimentação usando energia solar para os sistemas elétricos agregados ao coletor solar.

REFERÊNCIAS

- ABF. **Anuário Brasileiro de Fruticultura**. Santa Cruz do Sul, RS: Editora Gazeta. 2018.
- ABDULMALEK, S. H.; ASSADI, M. K.; AL-KAYIEM, H. H.; GITAN, A. A comparative analysis on the uniformity enhancement methods of solar thermal drying. **Energy**, v.148, p.1103-1115, 2018.
- ALEXANDRE, H. V. *et al.* Cinética de secagem de abacaxi pérola em fatias. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, PB, v.11, n. 2, p. 123-128, 2009.
- ALONGE, A. F.; UDUAK, U. S. Development of a direct active solar dryer and its use in drying Chester leaves (*Heinsia crinita*). **Journal of Agricultural Engineering and Technology**, v. 22, n. 4, p.110-120, 2014.
- AMORIM, J. A. **Estudo teórico e experimental do calor específico e da cinética de sorção em reator fixo**. 2012. 121p. Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. 2012.
- Arduino. Disponível em: <http://arduino.cc>. Acesso em Abril 2023.
- BRAGA, B.; ZATORRE, N.; SANTOS, G.; CASTRO, P. Uma Visão da Agricultura Familiar no Município de Seropédica. **Cadernos de Agroecologia**, v.10, n. 1, 2015.
- BRASIL. Resolução RDC ANVISA/MS nº. 272, de 22 de setembro de 2005. Regulamento técnico para produtos de vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 04 jan. 2005.
- CARDOSO, M.T. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira**. 2010. 121p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Ciência Florestais), Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais 2010.
- COELHO, B. E. S.; NASCIMENTO, M. M. do; CARVALHO, I. R. B. de; SOUSA, K. dos S. M. de; MACHADO, N. S.; NETO, Acácio Figueiredo. Curva de secagem solar e avaliação físico-química da manga“Espada”. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, V. 01, p. 1-8, 10 jul. 2018.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A participação do abacaxi no desenvolvimento econômico nas regiões produtoras**. Fevereiro/2020a. Disponível em: https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/compendio-de-estudos-da-conab/item/download/30706_fec8df8c31ba1fa1fd923e1c0b86baee. Acesso em: 30 jan. 2022.
- CONCEIÇÃO, João André Soares e Sousa da. **Análise experimental comparativa de um sistema de secagem solar, usando diferentes dessecantes: bentonita, carvão vegetal e arroz**. 2022. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

COSTA, N. L. **Desenvolvimento experimental de um sistema de secagem solar em regiões com dados meteorológicos distintos**. 2022. 241p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande 2022.

DAKE, R. A. *et al.* A review on the use of sorption materials in solar dryers. **Renewable Energy**, v. 175, p. 965–979, set. 2021.

DILLY, R. O. *et al.* Aplicação em Tempo Real de Monitoramento de Umidade e Temperatura Utilizando Arduino. **Caderno de Estudos em Sistemas de Informação**, Juiz de Fora - Mg - Brasil, v. 2, n. 1, p. 1-20, jun. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE Disponível em:
<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> Acesso em: 20 jul. 2021.

FAO – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO. FAOSTAT (2020). Disponível em:
<https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1302182/>. Acesso em: 26 jan. 2022.

FAO – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO. FAOSTAT (2019). Disponível em:
<https://www.fao.org/americas/noticias/ver/pt/c/239394/>. Acesso em: 26 jan. 2022.

FERNANDES, J. F. S. **Desenvolvimento experimental de um secador solar especial com sílica-gel como dessecante do ar de secagem**. 2021. 139p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

GERMER, S. P. M. *et al.* Viabilidade Econômica de uma Unidade Produtora de Frutas Desidratadas por Processo Osmótico. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.42, n.05, p.20-35, 2012.

GOMES, Í. A. **Dimensionamento e otimização de um secador solar de frutas utilizando o método do planejamento experimental fatorial**. 2021. 149p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande, PB, 2021.

GOMES, Í. A. **Desenvolvimento Experimental de um Secador Solar de Frutas com Aproveitamento Multienergético**. 2015. 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2015.

GRILO, M. B.; LACERDA, A. F. **Secador Solar**: Cartilha para produção de banana-passa. Campina Grande, PB: editora da UFCG, 10p. 2013.

GRILO, M. B. **Fundamentos da energia solar: radiação solar e coletor solar plano conceitos básicos e aplicações**. Campina Grande, PB: Editora da UFCG, 60p. 2007.

HARRIMAN III, L. G. **The Dehumidification Handbook**, 2 ed. Massachusetts: Munters Corporation, 2002.

INCROPERA, F. P. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 8. ed., Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, S.A., 2019.

ISLAM, M.; ISLAM, M. I.; TUSAR, M.; LIMON, A. H. Effect of cover design on moisture removal rate of a cabinet type solar dryer for food drying application. **Energy Procedia**, v. 160, p. 769-776, 2019.

ISLAM, M. K.; ISLAM S.; BEGUM, N.N.; UDDIN K.Z. Fabrication and performance study of a direct type solar dryer. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 9, n. 2, p.565-569, 2018.

JARIMI, H. *et al.* Review on the recent progress of thermochemical materials and processes for solar thermal energy storage and industrial waste heat recovery. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 14, n. 1, p. 44–69, 1 mar. 2019.

KRANG, E. G.; ONWE, D. N.; ONDA, D. O. Development of a direct passive solar dryer for crayfish (*Procambarus clarkii*). **International Journal of Engineering Research and Science & Technology**, v. 4, n. 2, p.153-164, 2015.

KUMAR, M., SANSANIWAL, S. K., KHATAK, P. Progress in solar dryers for drying various commodities, Renewable and Sustainable **Energy Reviews**, v. 55, p. 346-360, 2016.

LIMA, A. G. B. **Fenômeno de Difusão em Sólidos Esferoidais Prolatos. Estudo de caso: secagem de banana**. 1999, 265p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Unicamp. Campinas, SP, 1999.

LIMA, W. S. **Análises de Sistemas de Secagem: solar, elétrico e misto na produção de banana passa**. 2016. 259p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande 2016.

LUZ, Adão Benvindo da; OLIVEIRA, Cristiano Honório de. Argila-Bentonita. In: LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando A. Freitas. **Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2008. Cap. 11. p. 239-253.

MELO, C. T. M. C. B. **Desenvolvimento e Análise Experimental de um Secador Solar de Frutas com Aproveitamento Multienergético**. 2016. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2016.

MORAN, M. J. *et al.* **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. Eighth edition. Nova Jersey. John Wiley & Sons, 1056 p, 2018.

MOURA, J. L. F. P. **Projeto e Construção de um Secador Solar para ser utilizado em Atividades Didáticas na UFCG**. 2007, 97p. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Campina Grande, PB, 2007.

- NUNES, A. G. **Desenvolvimento Experimental de um Secador Solar Multienergético para a Secagem de Frutas**. 2016. 198p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2016.
- OLIVEIRA, M. C. T. B. **Obtenção de banana passa por meio de secagem via gaseificação de carvão vegetal**. 2011. 86p. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, MG. 2011.
- PEREIRA, E. M. D. *et al.* Energia Solar Térmica. *In: Fontes Renováveis de Energia no Brasil*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, p. 239-280, 2003.
- PRADO, R.T.A. *et al.* **Levantamento do estado da arte: Energia solar. Projeto tecnologias para construção habitacional mais sustentável**. São Paulo: Projeto FINEP 2386/04. 2007.
- RIBEIRO, G. V., **Obtenção de carvão ativado impregnado com prata para fins bactericidas**. 2014. 121p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2014.
- ROSÁRIO, J. A. **Obtenção de material antimicrobiano a a partir de bentonita nacional tratada com prata**. 2010, 148p. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina. 2010.
- RUZHU, W., LIWEI, W., JINGYI, W. Adsorption Refrigeration Technology Theory and Application, 1 ed. Singapura: Wiley. 2014.
- SANUSI, Y.; AJADI, D.; ADEYEMO, I. Comparative study of performance of open, direct and indirect solar dryer in drying tomatoes. *Int. Journal of Current Engineering and Technology*. v. 3, n. 2, p. 637-45, 2013.
- SECRETÁRIA ESPECIAL DE AGRICULTURA FAMILIAR E DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO (SEAD), 2017. **Plano Safra da Agricultura Familiar**. Brasília, DF, 2017/2020.
- SHANMUGAM, V.; NATARAJAN, E. *Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with reflective mirror*. *Applied Thermal Engineering*, v.27, p.1543-1551. 2006.
- SOUZA, M. C. *et al.* Cinéticas de Secagem do Abacaxi CV. Pérola. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 15, p. 428-427, Goiânia, 2012.
- TEFERA, A.; ENDALEW, W.; FIKIRU, B. Evaluation and demonstration of direct solar potato dryer. **Livestock Research for Rural Development**. v. 25, n. 12, 2013.
- TORO, J. D. N.; RUSCHEL, C. S.; KRENZINGER, A. Estudo da transmitância do policarbonato alveolar em diferentes ângulos de incidência para a cobertura de um coletor solar passivo. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 6, n. 1, p.11-18, 2015.
- VAZ, Inês Fernandes da Silva. **Principais Plantas em Dermatologia**. 2014. 64 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mestrado Integrado em Ciência Farmacêuticas, Departamento de

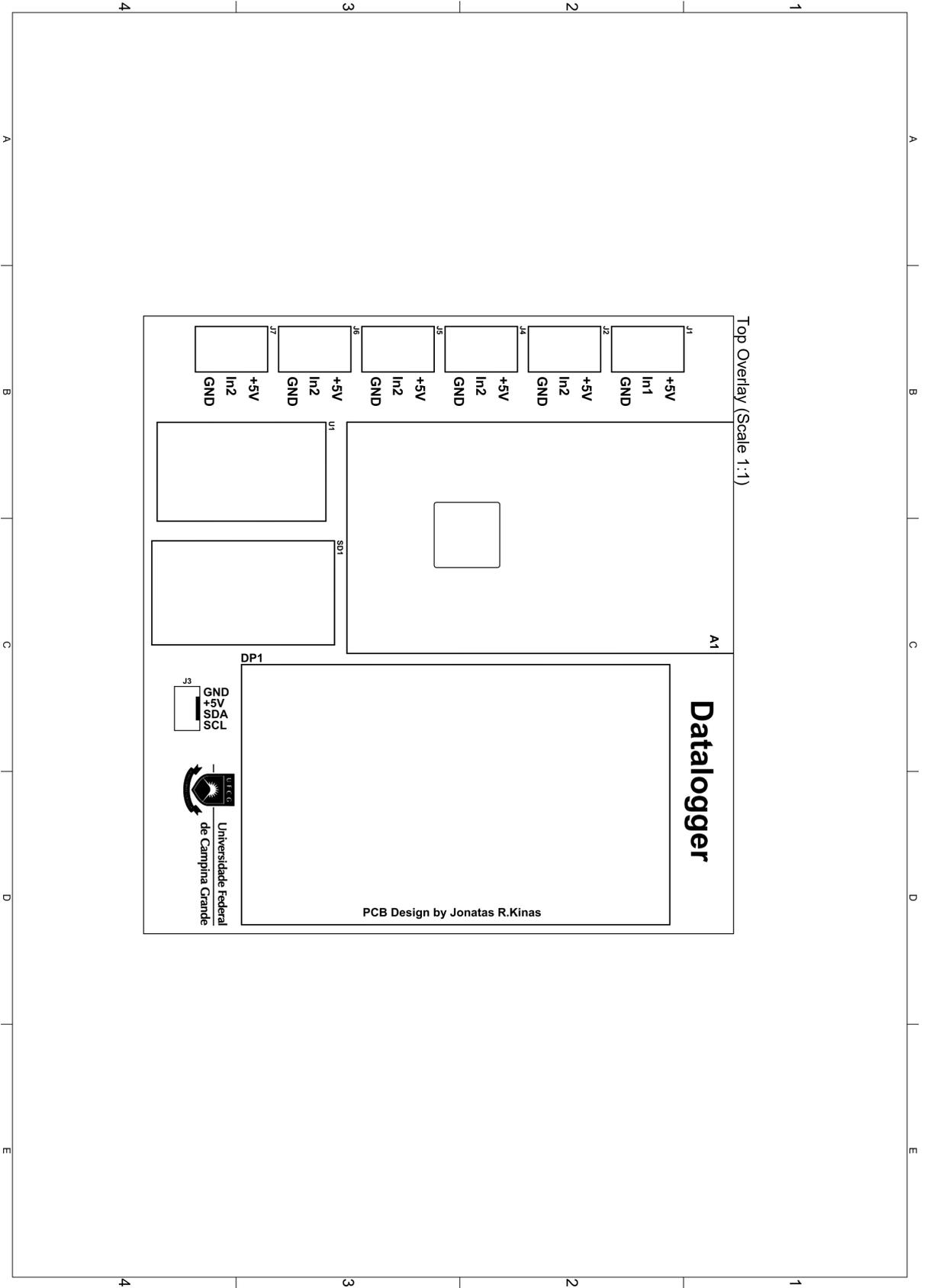
Química e Farmácia, Universidade Federal do Algarve, Faro, 2014.

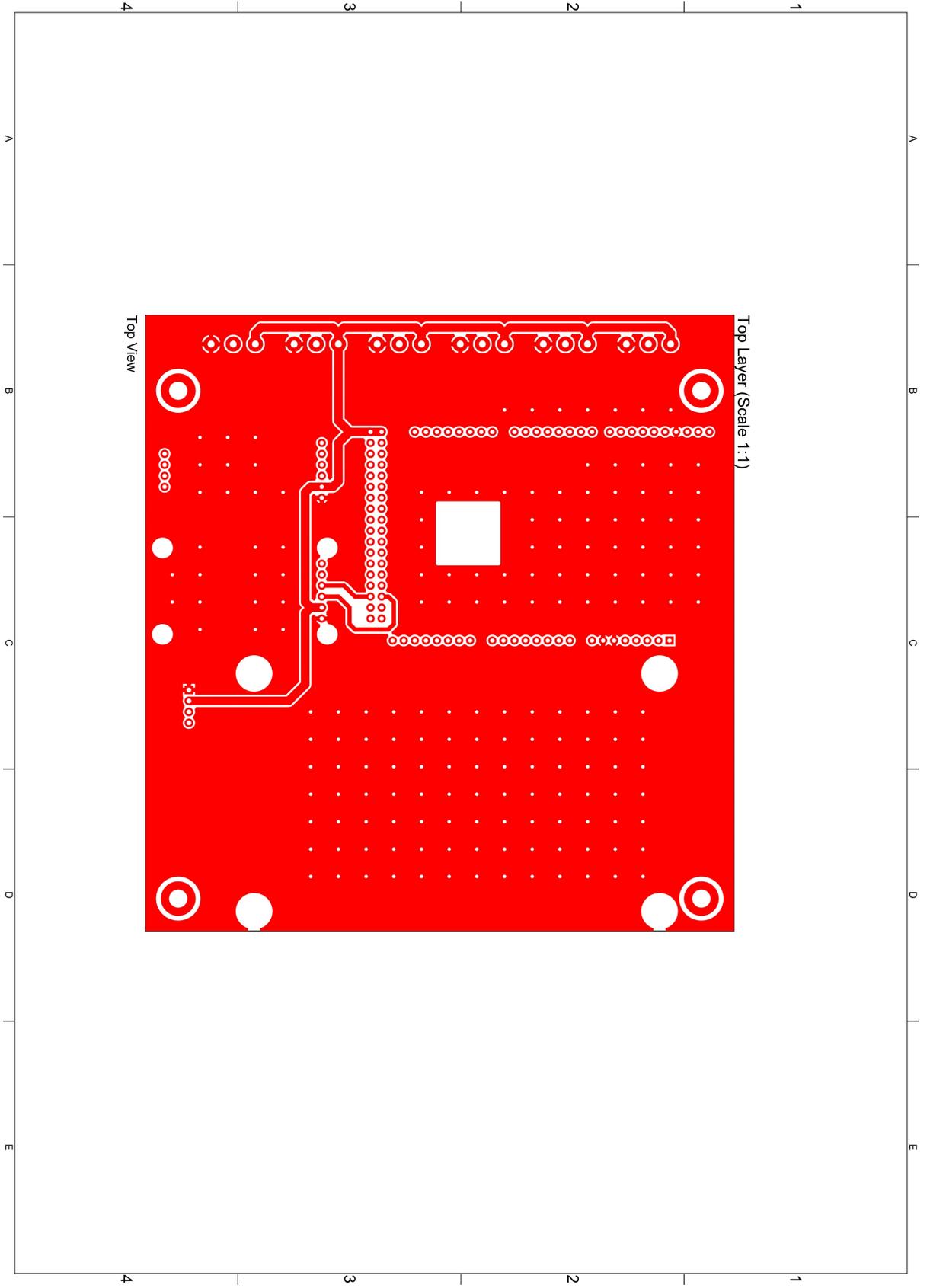
VENKATESWARLU, K.; REDDY, S. V. K. Recent trends on energy-efficient solar dryers for food and agricultural products drying: a review. **Waste Disposal & Sustainable Energy**, v. 6, n. 3, p. 335–353, set. 2024. Disponível em: <https://embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>. Acesso em: 17 jul. 2024.

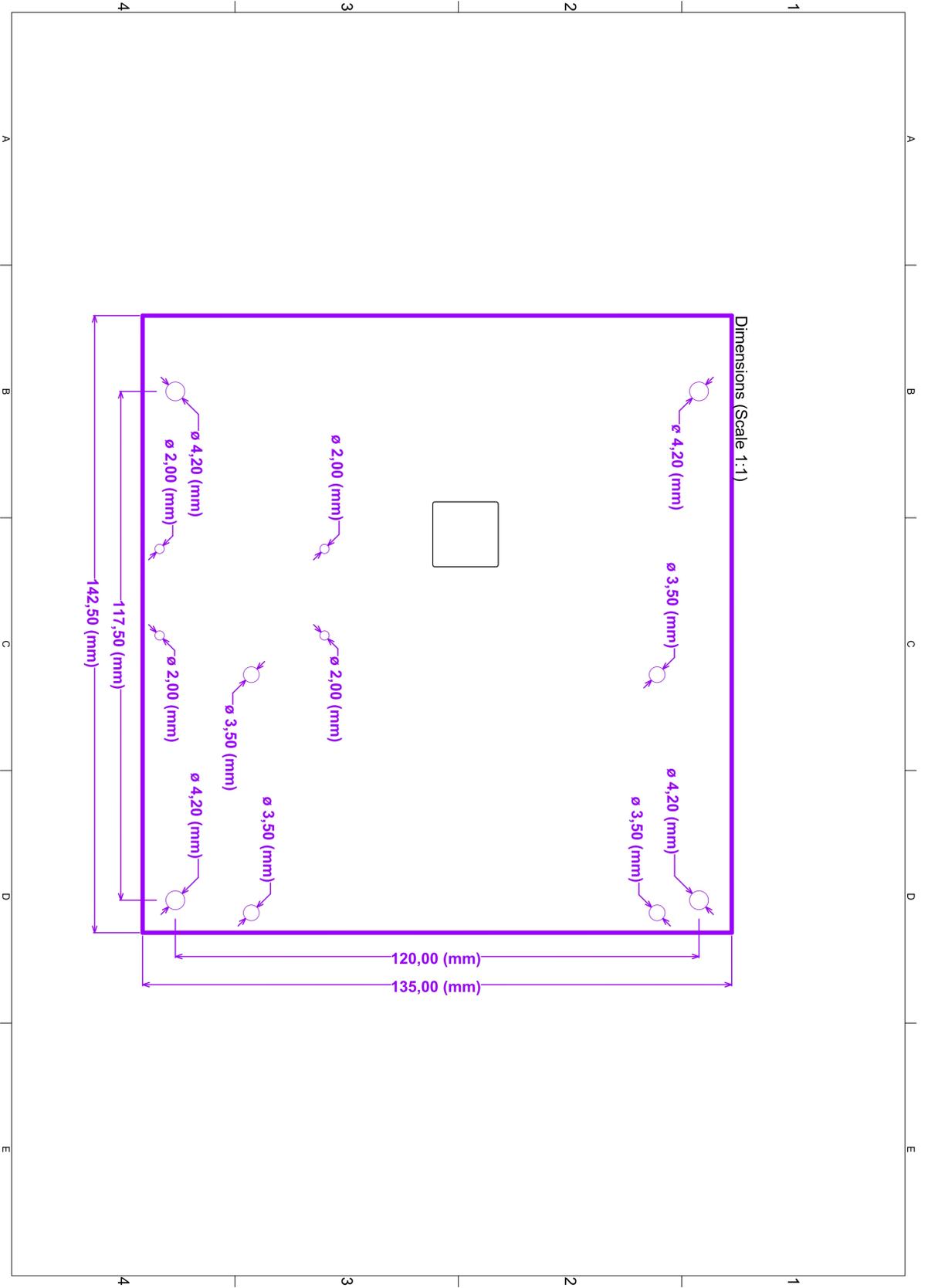
APÊNDICE A

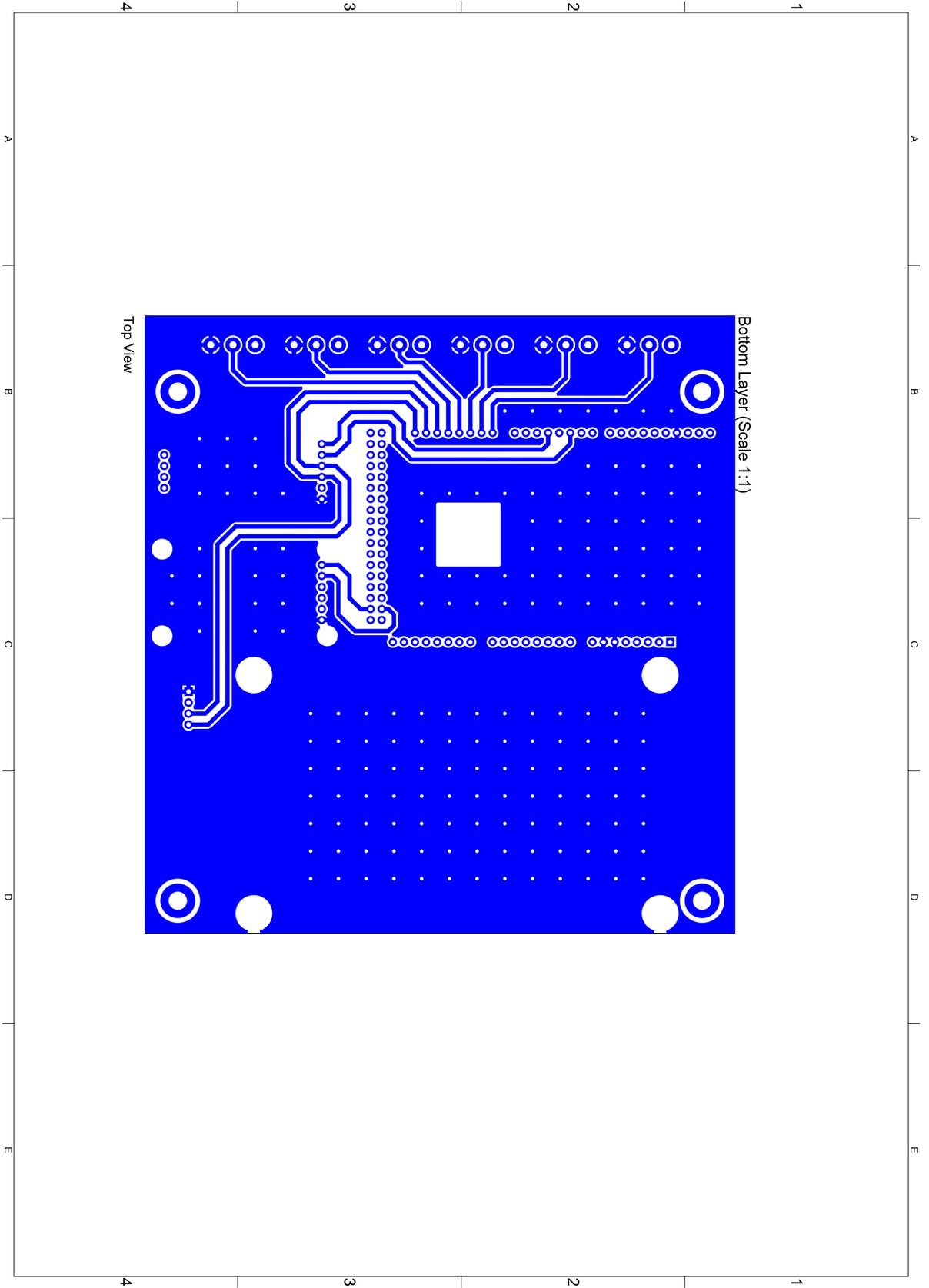
**PROJETO E DESENHO DO DATALOGGER DO SMAD, EM PARCERIA COM
JONATAS RODRIGO KINAS**











APÊNDICE B

**PROGRAMAÇÃO DO SMAD, EM PARCERIA COM KLERITON JOSÉ ALMEIDA
BARBOZA E THIAGO FARIAS DE ALMEIDA**

```

/* Programa para um datalogger a ser utilizado em secadores solares
desenvolvido no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas
(LEMT),
Desenvolvedor: JOÃO MARCOS DOMINGUES BOTELHO
Data de criação: outubro de 2019
Modificado por: Nórton Leonardo Teodório Rafael e Kleriton José
Almeida Barboza,
Data de modificação: janeiro de 2023
Modificado por Thiago Farias de Almeida
Data de modificação: 07 de NOVEMBRO de 2023
*/

// IMPORTAÇÃO DAS BIBLIOTECAS
#include <SD.h>
#include <DHT.h>
#include "RTCLib.h"
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

//CONFIGURAÇÕES DE TEMPORIZAÇÃO EM MILISEGUNDOS
int SECOND = 1000;           //CONSTANTE QUE DESCREVE 1 SEGUNDO
int MINUTE = SECOND * 60;    //CONSTANTE QUE DESCREVE 1 MINUTO
int TIMER_AMOSTRA = 6 * SECOND; //TEMPO DE EXIBIÇÃO DA MENSAGEM
QUE EXIBE O NUMERO DA AMOSTRA
int TIMER_DATA = 6 * SECOND; //TEMPO DE EXIBIÇÃO DA MENSAGEM
QUE EXIBE A DATA ATUAL DURANTE O LOOP
int TIMER_MEDICAO1 = 24 * SECOND; //TEMPO DE EXIBIÇÃO DA MENSAGEM
QUE EXIBE AS INFORMAÇÕES DE MEDIÇÃO DOS 3 PRIMEIROS SENSORES
int TIMER_MEDICAO2 = 24 * SECOND; //TEMPO DE EXIBIÇÃO DA MENSAGEM
QUE EXIBE AS INFORMAÇÕES DE MEDIÇÃO DOS 3 ULTIMOS SENSORES
int TIMER_ERRO_SENSOR = 4 * SECOND; //TEMPO DE EXIBIÇÃO DA MENSAGEM
QUE EXIBE AS INFORMAÇÕES DE ERRO DE MEDIÇÃO DO SENSOR
int TIMER_WARNING = 5 * SECOND; // TEMPO DE EXIBIÇÃO DAS
MENSAGENS DE ALERTA
const int SENSOR_QNT = 6; //CONSTANTE QUE INDICA QUANTOS
SENSORES SÃO UTILIZADOS PELO SISTEMA

// DEFINIÇÃO DOS PINOS DE DADOS E TIPO DO SENSOR
#define PIN1 14
#define PIN2 15
#define PIN3 16
#define PIN4 17
#define PIN5 18
#define PIN6 19
#define TYPE DHT22

//Configuração dos sensores
DHT sensor1(PIN1, TYPE); // Definição do objeto sensor1 do tipo DHT
DHT sensor2(PIN2, TYPE); // Definição do objeto sensor2 do tipo DHT
DHT sensor3(PIN3, TYPE); // Definição do objeto sensor3 do tipo DHT
DHT sensor4(PIN4, TYPE); // Definição do objeto sensor4 do tipo DHT
DHT sensor5(PIN5, TYPE); // Definição do objeto sensor5 do tipo DHT
DHT sensor6(PIN6, TYPE); // Definição do objeto sensor6 do tipo DHT
DHT sensors[] = {sensor1, sensor2, sensor3, sensor4, sensor5, sensor6};
//DEFINIÇÃO DE UM ARRAY CONTENDO TODOS OS SENSORES PREVIAMENTE
DEFINIDOS

//Configuração da permanência de dados

```

```

char FILE_NAME[] = "sensor.txt";

RTC_DS3231 rtc; // Instanciação do objeto rtc do tipo
DS3231
DateTime tempo; // Variável do tipo RTCDateTime para a
obtenção da hora e minutos
int amostra = 0; // Contador da amostra atual
const int chipSelect = 53; // Definição do pino CS do módulo SD CARD
bool isSDCardInserted; //Flag que indica se existe um cartão SD
inserido

File file; //Variavel para o arquivo que vai ser escrito

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,4, 20); // Definição do objeto lcd com os
seus respectivos pinos

// #####
// # INICIALIZAÇÃO DO SISTEMA #
// #####

//Iniciando sistema
void setup() {

    //Inicializa os sensores, Inicializa e configura o RTC, inicializa
o display
    setupConf();
    delay (TIMER_WARNING); //Aguarda 5 segundos para seguir a
execução do programa

    //Checa se existe um cartão SD inserido. Exibe uma mensagem de
inicialização do cartão ou de erro, se o cartão não for identificado
    isSDCardInserted = checkSDCardInserted();
    delay(1 * SECOND); //Aguarda 1 segundo para seguir a
execução do programa

    //Se o cartão estiver inserido, insere o cabeçalho no arquivo de
escrita
    if(isSDCardInserted){
        setUpSecador();
    }

}

// Realiza as configurações dos módulos do hardware
void setupConf(){
    inicieSensors(); //Inicializa os sensores
    setRTC(); //Configura o RTC para iniciar a data e hora
    lcd.init(); // Inicializa o display para exibição de
informações
    lcd.backlight(); // Configuração do display
    lcd.setCursor(0, 0); // Posiciona o cursor na primeira linha e
primeira coluna do display LCD
}

//Itera todos os sensores, chamando o método de inicialização de cada
um
void inicieSensors(){
    for(int i = 0; i < SENSOR_QNT; i++){

```

```

        sensors[i].begin();
    }
}

//Realiza a leitura do cartão SD. Caso o cartão não seja identificado,
retorna false, e imprime uma mensagem de erro na tela
//Caso não seja identificado erro, retorna true e exibe uma mensagem de
sucesso na tela
bool checkSDCardInserted(){
    bool checkSDBool = SD.begin(chipSelect); //Checa se o SDCard esta
inserido

    lcd.clear();           // Limpa a tela do display LCD
    lcd.home();            // Posiciona o cursor na primeira linha e
primeira coluna do display LCD
    if (!checkSDBool) {    // Confere se o SD CARD está inserido
        lcd.print("ERRO NO SD CARD!!!");    // Mostra uma mensagem de erro
no display LCD
        lcd.setCursor(0, 2);                // Posiciona o cursor na
segunda linha e primeira coluna do display LCD
        lcd.print("SD Nao Detectado");        // Mostra uma mensagem no
display LCD
    }
    else {
        lcd.print("INICIANDO SD CARD");    // Mostra uma mensagem de no
display LCD
    }

    //retorna true se há cartão inserido e false caso não seja
identificado o cartão
    return checkSDBool;
}

//Insere o texto do cabeçalho no arquivo do SD. Não retorna valores
void setUpSecador(){

    lcd.setCursor(0, 2);                // Posiciona o cursor na
terceira linha e primeira coluna do display LCD
    lcd.print("Escrevendo no SD!");    // Mostra uma mensagem no
display LCD
    char header[] = "TEMPO | SENSOR 1 | SENSOR 2 | SENSOR 3 | SENSOR
4 | SENSOR 5 | SENSOR 6 |"; // String para o cabeçalho do arquivo de
texto
    file = SD.open(FILE_NAME, FILE_WRITE); //Abre o arquivo
sensors_date.txt no modo escrita
    lcd.setCursor(0, 3); // Posiciona o cursor na terceira linha e
primeira coluna do display LCD
    if(file){                            //se o arquivo existir,
escreve o cabeçalho
        file.println(header);
    }

    file.close();                        //Fecha o arquivo
    delay(1500);                          //Aguarda 5 segundos para seguir a execução
do programa
}

// Configura o módulo RTC, responsável pela data e hora

```

```

// Caso haja erro na configuração do RTC, é retornado "false",
retornando "true" caso não haja nenhum erro
bool setRTC(){
    lcd.clear();                // Limpa a tela do display LCD
    lcd.home();                 // Posiciona o cursor na primeira linha e
primeira coluna do display LCD

    bool isRTCInicialized = rtc.begin();
    if (!isRTCInicialized) {    // Confere se o módulo RTC foi
inicializado
        lcd.print("ERRO NO RTC!!!");    // Mostra uma mensagem de erro no
display LCD
        return !isRTCInicialized;
    }

    //PARA REALIZAR O AJUSTE DE DATA E HORA É NECESSÁRIO DESCOMENTAR A
LINHA ABAIXO, COMPILAR E ENVIAR AO DATALOGGER, COMENTAR A LINHA ABAIXO
E ENVIAR NOVAMENTE
    //rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));

    lcd.print("CONFIGURANDO RTC");    // Mostra uma mensagem no
display LCD
    delay(1 * SECOND);
    lcd.setCursor(0, 2);            // Posiciona o cursor na terceira
linha primeira coluna do display LCD
    lcd.print("RTC CONFIGURADO!!");    // Mostra uma mensagem no
display LCD

    return !isRTCInicialized;
}

// #####
// #          LOOPING          #
// #####

//Método pre-definido que é executado
void loop() {

    SD.begin(chipSelect);
    amostra++;                    //Incrementa o contador da
amostra

    //Exibe o numero da amostra atual, a data e a hora
    //Dura aproximadamente 12 segundos
    showAmostraAndData();

    lcd.clear();                // Limpa a tela do display LCD
    lcd.home();                 // Posiciona o cursor na primeira
linha e primeira coluna do display LCD
    float temperatures[SENSOR_QNT];
    float humidities[SENSOR_QNT];
    //Realiza a leitura dos sensores
    //Os valores lidos são exibidos no display. Caso haja algum erro
durante a leitura, uma mensagem de erro é exibida

```

```

//Dura aproximadamente 48 segundos
readAndCheckSensors(temperatures, humidities);

//Realiza a escrita dos valores lidos no cartão SD.
writeInSDCard(temperatures, humidities);
return;
}

//Lê e checa os valores do sensores.
//Caso retorne false, então algum sensor ficou com valor NaN
void readAndCheckSensors(float temperatures[],float humidities[]){
    int current_timer1 = TIMER_MEDICAO1;
    int current_timer2 = TIMER_MEDICAO2;
    for(int i = 0; i < SENSOR_QNT; i++){
        //Realiza a leitura dos sensores
        float temp = sensors[i].readTemperature();
        float humi = sensors[i].readHumidity();
        temperatures[i] = temp;
        humidities[i] = humi;

        //Realiza a checagem. Caso haja algum resultado Not a Number
        (Leitura inválida), exibe uma mensagem de erro no display
        bool invalidRead = isnan(temp) || isnan(humi);
        if(invalidRead){
            lcd.clear(); // Limpa a
            // Limpa a
            tela do display LCD
            lcd.home(); // Limpa a
            tela do display LCD
            lcd.print(" ERRO NO SENSOR " + String(i+1)); // Mostra uma
            mensagem de erro no display LCD

            //Diminui o tempo de exibição de tela do sensor que deu erro
            para compensar o tempo de escrita
            if (i <= 3){
                current_timer1 -= TIMER_ERRO_SENSOR;
            }else{
                current_timer2 -= TIMER_ERRO_SENSOR;
            }
            delay(TIMER_ERRO_SENSOR);
        }
    }
}

//Realiza a exibição dos valores de temperatura e humidade dos
sensores 1, 2 e 3
float t1 = temperatures[0];
float t2 = temperatures[1];
float t3 = temperatures[2];
float u1 = humidities[0];
float u2 = humidities[1];
float u3 = humidities[2];
lcd.clear(); // Limpa a tela do display LCD
lcd.home(); // Posiciona o cursor na primeira
linha e primeira coluna do display LCD
lcd.print("T1*C T2*C T3*C"); // Mostra uma mensagem na
primeira linha do display LCD
lcd.setCursor(0, 1); // Posiciona o cursor na segunda
linha primeira coluna do display LCD

```

```

    lcd.print(String(t1) + " " + String(t2) + " " + String(t3));
// Mostra o valor da variável T1 no display LCD
    lcd.setCursor(0, 2); // Posiciona o cursor na terceira
linha primeira coluna do display LCD
    lcd.print("U1%    U2%    U3%"); // Mostra uma mensagem na
terceira linha do display LCD
    lcd.setCursor(0, 3); // Posiciona o cursor na quarta
linha primeira coluna do display LCD
    lcd.print(String(u1) + " " + String(u2) + " " + String(u3));
// Mostra o valor da variável U1 no display
    delay(current_timer1);

//Realiza a exibição dos valores de temperatura e humidade dos
sensores 1, 2 e 3
    float t4 = temperatures[3];
    float t5 = temperatures[4];
    float t6 = temperatures[5];
    float u4 = humidities[3];
    float u5 = humidities[4];
    float u6 = humidities[5];
    lcd.clear(); // Limpa a tela do display LCD
    lcd.home(); // Posiciona o cursor na primeira
linha e primeira coluna do display LCD
    lcd.print("T4*C    T5*C    T6*C"); // Mostra uma mensagem na
primeira linha do display LCD
    lcd.setCursor(0, 1); // Posiciona o cursor na segunda
linha primeira coluna do display LCD
    lcd.print(String(t4) + " " + String(t5) + " " + String(t6));
// Mostra o valor da variável T1 no display LCD
    lcd.setCursor(0, 2); // Posiciona o cursor na terceira
linha primeira coluna do display LCD
    lcd.print("U4%    U5%    U6%"); // Mostra uma mensagem na
terceira linha do display LCD
    lcd.setCursor(0, 3); // Posiciona o cursor na quarta
linha primeira coluna do display LCD
    lcd.print(String(u4) + " " + String(u5) + " " + String(u6));
// Mostra o valor da variável U1 no display LCD
    delay(current_timer2);
}

//Exibe o numero da amostra, data e hora atual
void showAmostraAndData(){
    lcd.clear(); // Limpa a tela do display LCD

    lcd.setCursor(0, 1); // Posiciona o cursor na
segunda linha primeira coluna do display LCD
    lcd.print("    AMOSTRA " + String(amostra)); // Mostra uma
mensagem na segunda linha do display LCD
    delay(TIMER_AMOSTRA);

    lcd.clear(); // Limpa a
tela do display LCD
    lcd.setCursor(0, 1);
    tempo = rtc.now(); // Atualiza o valor da variável tempo
com a data e hora atual
    lcd.print("DATA: "); // Mostra
a data no display LCD

```

```

        lcd.print(tempo.day());    lcd.print("-");    //
Mostra a data no display LCD
        lcd.print(tempo.month());  lcd.print("-");    //
Mostra a data no display LCD
        lcd.print(tempo.year());   lcd.print(" ");    //
Mostra a data no display LCD
        lcd.setCursor(0, 3);      lcd.print("HORA  ");    //
Posiciona o cursor na terceira linha primeira coluna do display LCD
        lcd.print(tempo.hour());   lcd.print(":");    //
Mostra a hora no display LCD
        lcd.print(tempo.minute()); lcd.print(":");    //
Mostra a hora no display LCD
        lcd.print(tempo.second());
        delay(TIMER_DATA);
    }

```

```

//Realiza a escrita dos dados lidos pelos sensores no arquivo
SENSORS_DATE do cartão SD no formato abaixo:
//HH:SS | XXC - YY% |
XXC - YY% |
void writeInSDCard(float temp[], float humi[]){
    File secadorHistory = SD.open(FILE_NAME, FILE_WRITE);
        // Abre o arquivo SENSORS_DATE do tipo txt no cartão SD
    if (secadorHistory) {
        // Pular linha
        secadorHistory.print(String(tempo.hour()) + ":" +
String(tempo.minute()) + ":" + String(tempo.second()) + " | ");    //
Escreve no arquivo a hora atual
        secadorHistory.print(String(temp[0]) + "C - " + String(humi[0]) +
"% | ");    // Escreve no arquivo a temperaturada e humidade
do sensor 1
        secadorHistory.print(String(temp[1]) + "C - " + String(humi[1]) +
"% | ");    // Escreve no arquivo a temperaturada e humidade
do sensor 2
        secadorHistory.print(String(temp[2]) + "C - " + String(humi[2])
+ "% | ");    // Escreve no arquivo a temperaturada e humidade
do sensor 3
        secadorHistory.print(String(temp[3]) + "C - " + String(humi[3])
+ "% | ");    // Escreve no arquivo a temperaturada e humidade
do sensor 4
        secadorHistory.print(String(temp[4]) + "C - " + String(humi[4])
+ "% | ");    // Escreve no arquivo a temperaturada e humidade
do sensor 5
        secadorHistory.println(String(temp[5]) + "C - " +
String(humi[5]) + "% | ");    // Escreve no arquivo a
temperaturada e humidade do sensor 6
    }
    secadorHistory.close();
        // Fecha o arquivo SENSORS_DATE
}

```