



RODRIGO EDUARDO PREDOLIN

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM
UTILIZANDO AQUECIMENTO SOLAR**

Bauru
2022



**UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM
UTILIZANDO AQUECIMENTO SOLAR**

RODRIGO EDUARDO PREDOLIN

PROF. DR. VICENTE LUIZ SCALON

Tese apresentada a Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia mecânica.

**BAURU - SP
2022**

Predolin, Rodrigo Eduardo.

Desenvolvimento de um sistema de secagem
utilizando aquecimento solar / Rodrigo Eduardo
Predolin, 2022
125 f. : il.

Orientador: Vicente Luiz Scalon

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual
Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia, Bauru,
2022

1. Eficiência solar. 2. Placa solar
absorvedora. 3. Secador solar de convecção. 4.
secador solar indireto. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE RODRIGO EDUARDO PREDOLIN, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 13 dias do mês de julho do ano de 2022, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de RODRIGO EDUARDO PREDOLIN, intitulada **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM UTILIZANDO AQUECIMENTO SOLAR**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof^a. Dr^a. DAIANE MIEKO ICERI (Participação Virtual) do(a) Centro de Estudos de Energia e Petróleo / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Prof. Dr. ANDRÉ ISSAO SATO (Participação Virtual) do(a) Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa / Universidade Federal do Oeste da Bahia - UFOB - Bom Jesus da Lapa, Prof. Dr. ELSON AVALLONE (Participação Virtual) do(a) Departamento de Indústria / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) - Câmpus de Catanduva/SP, Prof. Dr. ISMAEL DE MARCHI NETO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON

Aos meus pais que apoiaram os meus estudos
A minha esposa que me acompanhou nesta jornada com paciência
Aos meus amigos que ajudaram nos momentos difíceis

Agradecimentos

Ao meu orientador por acreditar no trabalho e por dedicar o seu tempo e conhecimento para me guiar.

À Faculdade de Engenharia de Bauru e a Seção Técnica de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru por fornecer condições e incentivar o estudo contínuo ao longo da minha carreira.

Ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de São Paulo, local que com muito orgulho trabalho, por me fornecer tempo e recursos para concluir essa importante etapa da minha carreira.

Abstract

Many foods have an accelerated deterioration process. In order to reduce this speed of deterioration, several conservation techniques have been developed over time; such as, for example, the food dehydration process, which is comparatively highly effective. The benefits of food dehydration are the preservation of the product and the reduction of its weight, which results in a reduction in the cost of transport and storage, in addition to creating unfavorable conditions for the development of microorganisms. Focusing on product dehydration, an indirect solar dryer with natural convection was developed and analyzed. The equipment consists of 3 main parts: the absorber plate with a surface area of 0.5 m^2 , the drying chamber and the gas outlet duct, noting that the absorber plate has two working positions. The analysis of the equipment used an instrumentation, which consisted of temperature, humidity and atmospheric pressure sensors, positioned at the inlet and outlet of the air in the equipment, in addition to the turbine-type anemometer in the air outlet and the load cell in the chamber. Drying process to record the removal of moisture, which is also determined by the mass balance performed with the data from the sensors at the inlet and outlet of the air in the equipment. The thermal analysis of the absorber plate is performed with the presence of 3 temperature sensors positioned on the underside of the plate spaced along its length. In order to visualize the velocity and temperature field inside the equipment, a numerical simulation was elaborated, using the real dimensions of the equipment in the generation of the mesh. The data recorded by the sensors for the day under analysis in the experiment were used as boundary conditions in the simulation and the analysis of their results took place for the temperature and air flow at the outlet of the equipment, comparing the values obtained in the experiment with the simulation. The change in the position of the absorber plate increased the moisture removal rate from 0.47 g/min to 0.56 g/min and the total moisture removal throughout the day changed from 185 g to 220 g , with the efficiency daily average temperature changing from 8.5% to 19.8% .

Keywords: Indirect solar dryer, Solar absorber panel, Convective solar dryer, Thermal efficiency.

Resumo

Muitos alimentos apresentam um acelerado processo de deterioração. Visando reduzir esta velocidade de deterioração, diversas técnicas de conservação foram desenvolvidas ao longo do tempo; como, por exemplo, o processo de desidratação de alimentos, que apresenta comparativamente uma alta eficácia. Os benefícios da desidratação dos alimentos são a preservação do produto e a redução do seu peso, que tem como consequência a redução no custo de transporte e no armazenamento, além de criar condições desfavoráveis para o desenvolvimento de micro-organismos. Com foco na desidratação de produtos, foi desenvolvido e analisado um secador solar indireto com convecção natural. O equipamento é composto por 3 partes principais: a placa absorvedora com $0,5 \text{ m}^2$ de área superficial, a câmara de secagem e o duto de saída de gases, destacando que a placa absorvedora tem duas posições de trabalho. A análise do equipamento se utilizou de uma instrumentação, que foi constituída dos sensores de temperatura, umidade e pressão atmosférica, posicionados na entrada e na saída de ar no equipamento, além do anemômetro tipo turbina na saída de ar e a célula de carga na câmara de secagem para registrar a remoção da umidade, a qual é determinada também pelo balanço de massa realizado com os dados dos sensores na entrada e na saída do ar no equipamento. A análise térmica da placa absorvedora é realizada com a presença de 3 sensores de temperatura posicionados na face inferior da placa de forma espaçada ao longo de seu comprimento. Para visualizar o campo velocidade e temperatura no interior do equipamento, foi elaborada a simulação numérica, utilizando as dimensões reais do equipamento na geração da malha. Os dados registrados pelos sensores para o dia em análise no experimento foram utilizados como condições de contorno na simulação e a análise dos seus resultados ocorreram para a temperatura e vazão de ar na saída do equipamento, comparando os valores obtidos no experimento com a simulação. A alteração no posicionamento da placa absorvedora aumentou a taxa de remoção de umidade de $0,47 \text{ g/min}$ para $0,56 \text{ g/min}$ e a remoção total de umidade ao longo do dia se alterou de 185 g para 220 g , com a eficiência térmica média diária se alterando de $8,5\%$ para $19,8\%$.

Palavras-chave: Eficiência solar, placa solar absorvedora, secador solar de convecção, secador solar indireto.

Sumário

Dedicatória	v
Agradecimentos	vi
Nomenclatura	xiv
1 Introdução	1
2 Objetivos	5
3 Revisão Bibliográfica	7
4 Materiais e Métodos	20
4.1 Anemômetro	22
4.2 Célula de carga	27
4.3 Sensor de umidade e temperatura - BME280	32
4.4 Sensor de temperatura DS18B20	33
4.5 Radiômetro	35
4.6 Processador e registrador de dados	36
4.6.1 Conexão dos sensores e dispositivos no Arduino Uno	38
4.7 Construção da bancada de ensaio	41
4.7.1 Sensor de umidade, pressão atmosférica e temperatura	42
4.7.2 Placa absorvedora	43
4.7.3 Sensor de radiação	45
4.7.4 Célula de carga	45
4.7.5 Sensores na saída do ar aquecido	46
4.7.6 Módulo de coleta de dados	47
4.8 Localização e orientação do secador solar	47
4.9 Metodologia dos ensaios	48
4.10 Eficiência térmica	51
4.11 Análise numérica	52
4.11.1 Condições de contorno	56
5 Resultados	58
5.1 Vazão de ar	58
5.2 Temperatura da placa absorvedora	60
5.3 Temperatura do ar de saída da chaminé	61

5.4	Umidade relativa do ar	61
5.5	Característica de secagem	64
5.6	Eficiência térmica	66
5.7	Utilização do termoacumulador	66
5.7.1	Temperatura da placa absorvedora com o uso do termoacumulador . . .	67
5.7.2	Temperatura do ar de saída com o uso do termoacumulador	68
5.7.3	Vazão de ar com o uso do termoacumulador	69
5.7.4	Umidade relativa com o uso do termoacumulador	70
5.7.5	Remoção de umidade com o uso do termoacumulador	71
5.8	Resultados das análises numéricas	73
5.8.1	Temperatura	75
5.8.2	Fluxo de ar	76
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	80
6.1	Análise do secador	80
6.2	Análise numérica	81
6.3	Instrumentação	81
6.4	Trabalhos Futuros	83
	Referências	84
	APÊNDICE A Programação módulo de coleta de dados	91
	APÊNDICE B Código GNU Octave	108
	APÊNDICE C Estrutura de pastas OpenFoam	118
	APÊNDICE D Incerteza na instrumentação	119
D.0.1	Velocidade e vazão de ar	120
D.0.2	Sensor de temperatura	121
D.0.3	Radiômetro	121
D.0.4	Área da placa absorvedora	122
D.0.5	Eficiência Térmica	122
	APÊNDICE E Curva calibração radiômetro	124
	APÊNDICE F Curva calibração anemômetro	125

Lista de Figuras

1.1	Consumo global de energia em teraWatts-horas por ano.	1
1.2	Investimento nas tecnologias de energias renováveis por país.	2
1.3	Investimento nas tecnologias de energias renováveis.	3
3.1	Classificação dos secadores solares e técnicas de secagem apresentadas por Leon, Kumar e Bhattacharya (2002).	8
3.2	Representação do secador solar utilizado para análise de secagem de tomates. . .	11
3.3	Secador solar indireto com armazenador térmico.	12
3.4	Sistema híbrido para secagem de alimentos e aquecimento d'água.	14
3.5	Secador solar composto por 2 coletores.	16
3.6	Secador solar indireto integrado a unidade condensadora de ar condicionado. . .	18
4.1	Secador solar em fase inicial de construção: estrutura metálica e isolamento térmico.	20
4.2	Dimensões do secador solar indireto.	21
4.3	Representação do posicionamento da placa absorvedora.	22
4.4	Sinal típico de um sensor Hall digital.	22
4.5	Roda fônica veicular.	23
4.6	Sensor Hall: esquema elétrico de instalação.	23
4.7	Representação das etapas de confecção do anemômetro.	24
4.8	Instalação da coifa e do anemômetro.	25
4.9	Representação da calibração do anemômetro tipo turbina.	26
4.10	Projeto da balança.	28
4.11	Balança confeccionada.	28
4.12	Comportamento da balança com a temperatura.	29
4.13	Comportamento da balança com o aumento da temperatura.	30
4.14	Comportamento da balança com o decréscimo da temperatura.	30
4.15	Comportamento da balança com o decréscimo da temperatura.	31
4.16	Conjunto sensor de umidade e circuito eletrônico.	32
4.17	Análise do comportamento dos sensores de umidade.	33
4.18	Ligação dos sensores de temperatura DS18B20 a placa Arduino UNO.	34
4.19	Radiômetro instalado no secador.	36
4.20	Módulo de coletas de dados.	38
4.21	Diagrama elétrico do módulo de coletas de dados.	40
4.22	Diagrama com indicação da posição dos sensores.	41
4.23	Sensores na região 1 do secador.	42
4.24	Sensores na região 2: Placa absorvedora, face não exposta.	43
4.25	Reservatório térmico: a)Face externa. b)Detalhe interno.	44

4.26	Reservatório térmico: a) Sensor de temperatura selado. b) Reservatório instalado.	45
4.27	Sensor de radiação destacando a parte que sofre aquecimento e a parte que registra a temperatura ambiente. Fonte: Autor (2021).	46
4.28	Balança: a) Em operação, vista traseira. b) Fase de instalação, vista lateral.	46
4.29	Sensores da região 5 e 6, duto de saída do ar aquecido.	47
4.30	Proteção do módulo de coleta de dados das intempéries.	48
4.31	Imagem de satélite com a latitude e longitude do local do experimento.	48
4.32	Secador solar em operação.	49
4.33	Fluxograma do algoritmo implementado no módulo de coleta de dados.	50
4.34	Superfícies formadas pelos arquivos STL.	53
4.35	Representação da malha do modelo na seção central do secador, plano XY.	54
4.36	Representação da malha do modelo em estudo.	54
4.37	Variação da vazão de ar em função do número de elementos da malha.	55
5.1	Vazão mássica de ar quente no secador indireto.	59
5.2	Diferença de temperatura entre a placa absorvedora e o ar ambiente.	60
5.3	Temperatura do ar na entrada e na saída do secador.	62
5.4	Umidade relativa do ar na entrada e na saída do secador.	63
5.5	Umidade removida (acumulado do dia) computada pelo sensor de umidade e pela célula de carga. a) configuração 1, b) configuração 2. Fonte: autor (2022).	64
5.6	Umidade removida método da diferença da umidade absoluta e célula de carga, registrado a cada 15 minutos. (a) configuração 1, (b) configuração 2. Fonte autor (2022).	65
5.7	Eficiência térmica média a cada 15 minutos em função da radiação solar incidente. a) configuração 1, b) configuração 2. Fonte: autor (2022).	66
5.8	Temperatura da placa absorvedora com termoacumulador. Fonte: autor (2022).	68
5.9	Temperatura do ar na entrada e na saída do secador quando acoplado à placa absorvedora o termoacumulador. Fonte: autor (2022).	69
5.10	Vazão de ar do secador solar quando acoplado o termoacumulador à placa absorvedora. Fonte: autor (2022).	70
5.11	Umidade relativa do ar na entrada e na saída do secador solar quando acoplado à placa absorvedora o termoacumulador. Fonte: autor (2022).	71
5.12	Remoção de umidade com uso do termoacumulador.	72
5.13	Representação do campo temperatura.	75
5.14	Representação do campo Velocidade.	77
5.15	Fluxo de ar sobre a placa absorvedora na configuração 2.	78
5.16	Fluxo de ar sobre a placa absorvedora na configuração 2. Visão de perfil.	78
5.17	Fluxo de ar sobre a placa absorvedora na configuração 2. Visão superior.	79
C.1	Estruturação das pastas e arquivos do software OpenFoam	118
E.1	Curva de calibração do radiômetro. Fonte Rafael Paiva Garcia (2019)	124
F.1	Curva de calibração do anemômetro tipo turbina.	125

Lista de Tabelas

3.1	Tempo de secagem em função da vazão de ar	15
4.1	Ficha técnica da célula de carga de 2 kg de capacidade	27
4.2	Estatística da balança.	31
4.3	Ficha técnica do sensor BME280.	32
4.4	Ficha técnica da placa Arduino UNO.	37
4.5	Principais protocolos de comunicação usado entre dispositivos e o arduino. Fonte RoboCore (2020).	39
4.6	Portas do módulo de coleta de dados. Fonte: autor (2021).	40
4.7	Dados técnicos da parafina. Fonte QUIMIDROL	44
4.8	Transcrição arquivo <i>thermophysicalProperties</i> do software OpenFOAM [®]	56
4.9	Condições de contorno com a placa absorvedora na configuração 1.	57
5.1	Comparativo entre dados experimentais da placa absorvedora sem termoacumulador e com termoacumulador em 2 cenários.	73
5.2	Comparativo entre dados experimentais e simulados para a placa absorvedora na configuração 1.	74
5.3	Comparativo entre dados experimentais e simulados para a placa absorvedora na configuração 2.	74

Nomenclatura

Siglas

3D	Três Dimensões
DC	Direct Voltage - voltagem continua
DPSC	Dual Purpose Solar Colector
EP	Erro padrão
EPS	Expanded Polystyrene -poliestireno expandido
PCM	Phase Change Material
PWM	Pulse With Modulation
RX	Receive data - porta entrada de dados
SIMPLE	Semi-implicit for Pressure linked Equations
STL	Stereolithograhpy - formatos de arquivos
TX	Transmit data - porta saída de dados

Símbolos Gregos

η	Eficiência térmica
ω	Taxa especifica de dissipação turbulenta
ρ	Densidade do ar úmido
σ	Desvio padrão

Símbolos Romanos

$\dot{m}$	Vazão mássica do ar úmido
A	Área
C	Comprimento
$Freq$	Frequência do sinal

G	Energia
h	Entalpia do ar
K	Energia cinética turbulenta
L	Largura
Q	Energia
T	Temperatura
U	Velocidade média do ar

Subscrito

a	Anemômetro
abs	Atribuída a placa absorvedora
amb	Ambiente
ar	Atribuído ao ar
bot	Face inferior
c	Placa absorvedora (coletor)
$glass$	Atribuído ao vidro
in	Superfície de entrada
out	Superfície de saída
S	Incerteza
t	Incidente
top	Face superior
u	Útil
w	Atribuído a face d'água

Outros Símbolos

CV1	Constante angular curva de calibração anemômetro
CV2	Constante linear curva de calibração anemômetro

Capítulo 1

Introdução

O acesso à energia é essencial para o desenvolvimento econômico, o bem-estar humano e redução da pobreza. No entanto, os sistemas de energia antigos e atuais são dominados por combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) que produzem dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa. Para cumprir as metas climáticas globais e evitar mudanças climáticas perigosas, o mundo precisa de uma transição significativa e ajustada as suas fontes de energia.

Equilibrar o desafio entre desenvolvimento e meio ambiente, fornece um objetivo final de garantir que todos tenham acesso a energia sustentável suficiente para manter um alto padrão de vida. Visualizando a Figura 1.1, observa-se que a produção global de energia mudou ao longo do tempo, (RITCHIE, H.; ROSER, M., 2020).

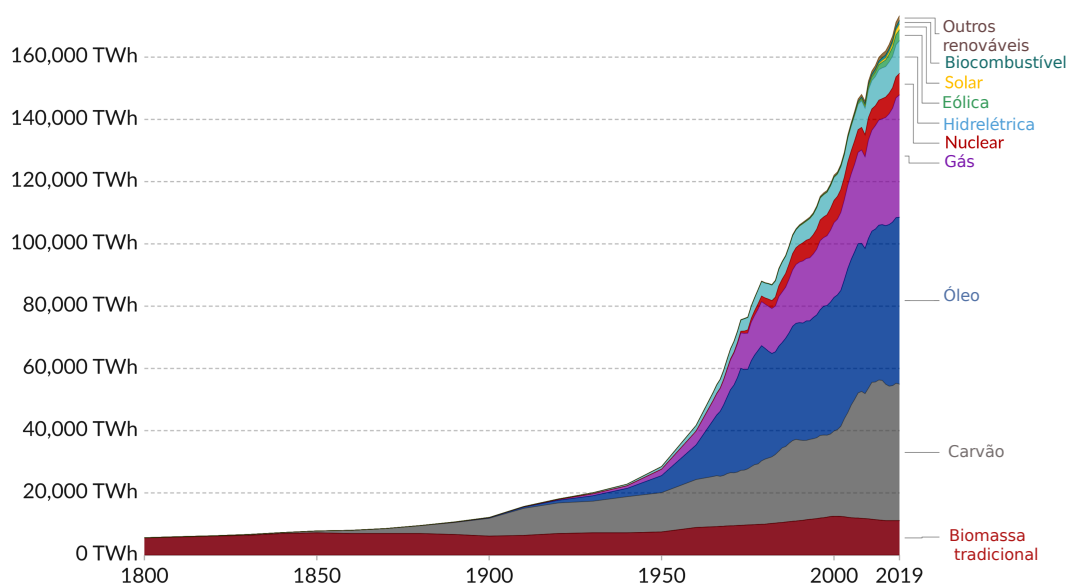


Figura 1.1: Consumo global de energia em teraWatts-horas por ano.

Fonte: H. Ritchie e M. Roser (2020).

Adaptado de <https://ourworldindata.org/energy>.

Nas ultimas duas décadas observa-se a participação de outras energias renováveis, além das hidroelétricas, na geração de eletricidade em aproximadamente 6% e no mesmo patamar ocorreu a redução da produção de energia provinda da tecnologia nuclear, (RITCHIE, H.; ROSER, M., 2020).

O aumento da produção de energia renováveis na ultima década ocorreu devido ao aumento dos investimentos nesse setor, que foi de 286 bilhões de dólares em 2015, aumento de 600% em relação a 2004, sendo que somente a China investiu 103 bilhões de dólares, se tornando o maior investidor neste setor, conforme visto na Figura 1.2. Comparado os investimentos em energias renováveis com o PIB do país, o Chile é o que mais dedicou seu PIB neste setor, com 1,4% do seu PIB, o mesmo que a Africa do Sul. A China está em terceiro lugar com 0,9%, em seguida está o Japão com 0,8%. Analisando o investimento do Brasil em 2015, foi investido 0,4% de seu PIB, valor porcentual maior que o da Alemanha (0,3%) e Estados Unidos (0,2%), (RITCHIE, Hannah; ROSER, Max, 2014).

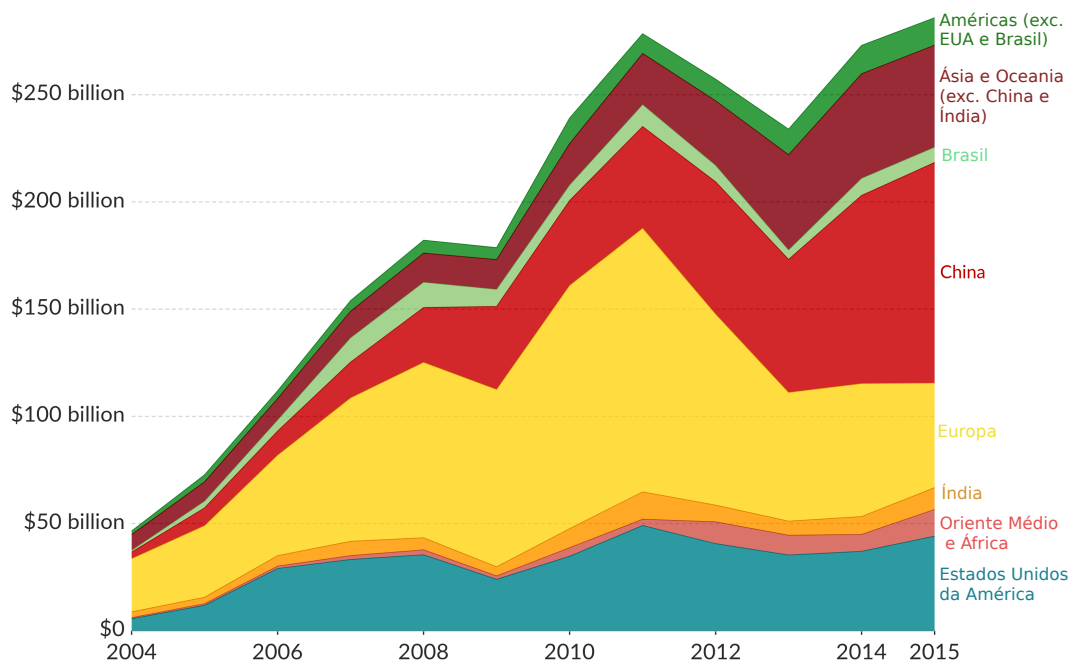


Figura 1.2: Investimento nas tecnologias de energias renováveis por país.

Fonte: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy.

Adaptado de OurWorldinData.org/energy.

A análise dos investimentos em energias renováveis em função do PIB, indica que as economias de renda baixa a média, como Chile e Africa do sul, investem uma porcentagem maior do seu PIB do que as nações de alta renda. Isso pode ser parcialmente explicado pelo fato dessas nações estarem investindo uma porcentagem maior de seu PIB na provisão e expansão da sua matriz energética, enquanto as nações de alta renda têm os seus sistemas energéticos estabelecidos.

Outro fator que deve ser observado, além do montante de investimento na tecnologia das energias renováveis, é quais são as tecnologias priorizadas por esses investimentos. Em 2016, a energia solar e eólica recebeu 47% dos investimentos, conforme mostra a Figura 1.3, tendo um crescimento uniforme na matriz energética mundial, especialmente nos últimos cinco anos. Em 2006, a biomassa e os biocombustíveis tiveram investimentos consideráveis, chegando a 36% do montante global, porém os investimentos recuaram na última década, recebendo menos de 4% dos investimentos globais. Essa tendência se mantém até 2020, conforme informado por Godoi (2020) e sugere que a energia solar e eólica serão as tecnologias renováveis dominantes do futuro.

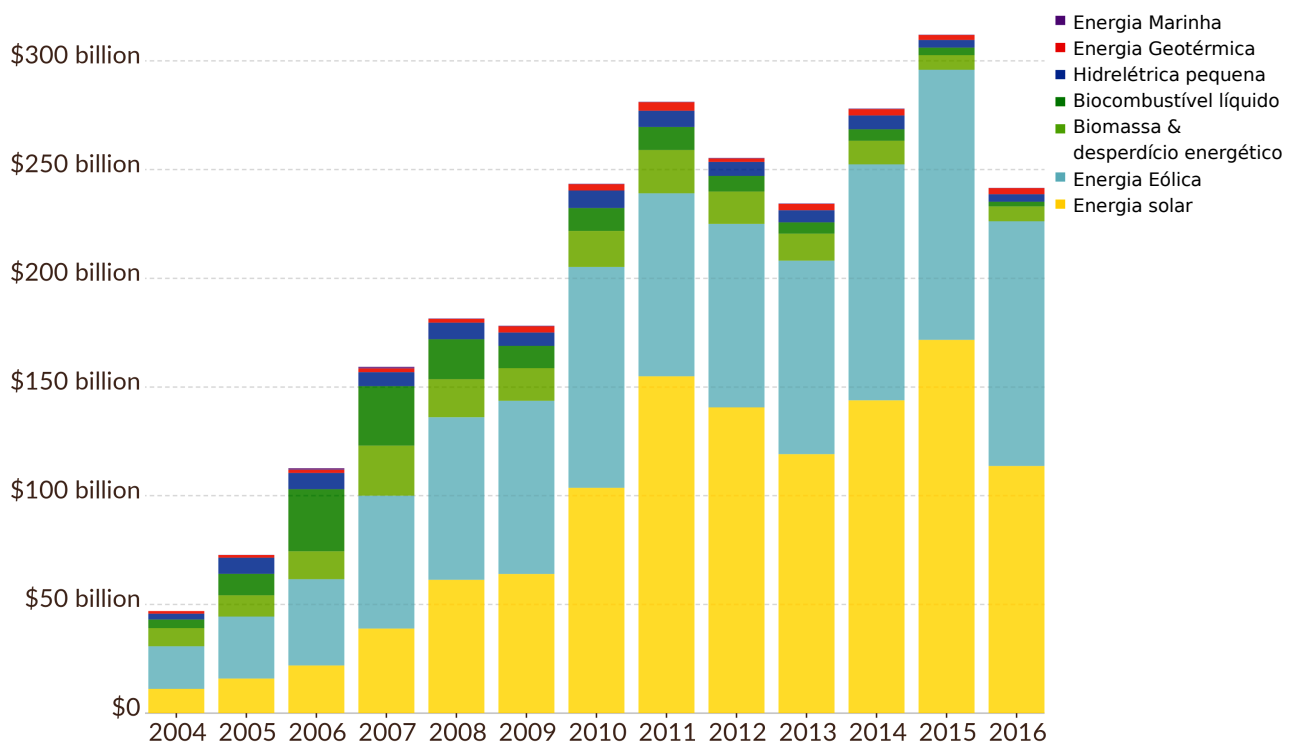


Figura 1.3: Investimento nas tecnologias de energias renováveis.

Fonte: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy.

Adaptado de OurWorldinData.org/energy.

Analisando a disponibilidade de energia solar que incide sobre a atmosfera da Terra, $1,75 \times 10^5$ TW, e considerando que aproximadamente 60% dessa energia atravessa a atmosfera e incide na superfície, há disponível $1,05 \times 10^5$ TW. Utilizando 1% dessa energia em equipamentos com eficiência de somente 10%, seria possível atender a demanda mundial com folga, (KALOGIROU, 2013). As formas mais comuns de aproveitar essa energia é através da conversão em energia elétrica e térmica, sendo esta última amplamente empregada no uso em coletores e aquecedores solares.

Existem dois tipos principais de coletores solares, o concentrador e o de placa plana. Onde os coletores solares de placa plana são classificados com base no fluido de trabalho que flui

através do coletor, podendo ser a água ou o ar. Coletores solares tendo o ar como fluido de trabalho são de baixo custo e amplamente utilizados devido à sua construção simples. Esses coletores são amplamente utilizados para o aquecimento de ambientes, cozimento de alimentos, secagem dos produtos e processo industrial, (AL - NEAMA, 2018).

Uma das aplicações mais antigas e utilizadas da energia solar na atualidade é a secagem de alimentos visando a sua conservação. Podendo ocorrer em ambiente aberto ou isolado, com contato direto do alimento com a radiação solar (secador solar direto) ou em ambiente isolado da radiação solar (secador solar indireto), no qual o ar é aquecido pela placa absorvedora e flui até a câmara de secagem onde o alimento está armazenado, ocorrendo a transferência de massa, na forma de vapor, do alimento para o ar.

Como pode ser visto, há diversas técnicas para secagem dos alimentos utilizando energia renovável, na qual está inclusa a utilização dos secadores passivos, que ainda são economicamente relevantes e apresentam algumas vantagens para os países em desenvolvimento. Esse tipo de modelo é mais simples de construir e manter, o que o torna barato, além de ser independente da disponibilidade de energia elétrica. Devido a essas características, este modelo de secador é utilizado em um grande número de locais, contribuindo para a conservação e redução do desperdício de alimentos. Os secadores solares também podem ser usados para secar matéria orgânica para combustão, que minimiza as emissões de metano e reduz o efeito estufa. Assim, os secadores solares passivos permanecem economicamente viáveis e muito importantes para atividades agrícolas de pequena escala.

Este estudo se propõe a investigar um parâmetro diferente dos descritos na literatura citada: a influência da posição da placa absorvedora na mesma geometria do secador solar passivo. Mudanças na posição da placa absorvedora no interior do secador solar são avaliadas considerando o processo de secagem natural. O processo de secagem para diferentes configurações da placa absorvedora é avaliado experimentalmente e por simulações numéricas, usando um modelo CFD. A simulação numérica de secadores solares passivos, utilizando modelo computacional, é outra lacuna na literatura. Embora diversos estudos numéricos para escoamento forçado possam ser encontrados, este trabalho propõe desenvolver e implementar um novo modelo para tratamento de fluxo natural dentro do secador.

Capítulo 2

Objetivos

Para o desenvolvimento deste trabalho foi projetado, construído e instrumentado um secador solar indireto. Sua estrutura é composta de cantoneiras de aço, revestida por EPS, proporcionando o isolamento do exterior. A circulação do ar pelo equipamento ocorre por convecção natural e pode ser direcionada somente para a face superior da placa absorvedora ou em ambas as faces, inferior e superior, dependendo da configuração adotada. O equipamento foi instalado na plataforma de testes externos, no laboratório da faculdade de engenharia da UNESP, localizado na cidade de Bauru, SP.

Os objetivos primário deste trabalho são descritos como:

- A investigação do comportamento térmico do secador solar e da placa absorvedora em função da radiação solar;
- Comparar o seu desempenho em função das configurações da placa absorvedora para passagem de ar somente na superfície superior (passagem única) e passagem em ambas as superfícies, inferior e superior (passagem dupla);
- Investigação da vazão de ar quente em função da radiação solar e da configuração da placa absorvedora;
- Análise da umidade relativa e da temperatura do ar que circula pelo secador;
- Definição da taxa de evaporação proporcionada pelo equipamento em função da configuração da placa absorvedora;
- Análise do comportamento térmico do equipamento quando usado o acumulador térmico;
- Realizar simulações numéricas e comparar os seus resultados com os dados experimentais.

Com o propósito de atingir os objetivos primários desse trabalho, será necessário fazer a instrumentação do equipamento e definir o método de coleta de dados, o que conduz aos objetivos gerais, sendo eles:

- Instalação de um anemômetro que possibilite registrar a vazão de ar que circula pelo secador ao longo do dia, isto é, com variação da vazão de ar em função da radiação solar incidente na placa absorvedora;
- Definir um método que possibilite o registro da capacidade de remoção de umidade do secador solar;
- Instalação de sensores de temperatura na placa absorvedora, com o objetivo de acompanhar o seu comportamento térmico em função da radiação solar incidente sobre ela;
- Instalação de sensores de temperatura e umidade na entrada e na saída de ar do equipamento;
- Registrar a radiação incidente no secador solar ao longo do dia.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

A conservação dos alimentos provém da antiguidade, basicamente no período Paleolítico, onde o homem caçava e coletava alimentos para satisfazer sua fome imediata. A disponibilidade dos alimentos estava relacionada com a maneira na qual ele vivia, já que eram nômades e viviam em regiões onde a caça e a coleta eram mais favoráveis.

Conforme relatado por Silva et al. (2015), os primeiros registros do uso de secagem artificial na conservação de alimentos, são do século XVIII e o desenvolvimento dessa atividade relaciona-se estreitamente com a ida das tropas britânicas, na Guerra de Boer, para a Europa, durante a primeira guerra mundial. Nesta ocasião, desenvolveram-se os primeiros secadores artificiais.

A secagem dos alimentos é um processo de transferência de massa, onde a umidade é removida do alimento e transferida para o ar, proporcionando a sua conservação pela diminuição das condições para o desenvolvimento de micro-organismos.

Essa técnica de conservação é amplamente utilizada em alimentos como café, tabaco, chá, arroz, coco, sementes e grãos (VIJAYAVENKATARAMAN; INIYAN; GOIC, 2012).

Os secadores solares podem ser agrupados e analisados de diversas maneiras, por exemplo pelo tipo de produto que processa ou por fatores econômicos (EKECHUKWU; NORTON, 1999), mas basicamente são classificados em quatro grupos:

- Secador solar direto: é o método de secagem mais comum, envolvendo o espalhamento do produto em camadas sobre bandejas ou telas, expondo ao vento e ao sol (secadores diretos abertos). Pode ser utilizado uma cobertura transparente no intuito de reduzir a perda de calor e proteger o produto da chuva e da poeira, exigindo assim aeração para remover a umidade, porém o produto continua suscetível a infestações.
- Secador solar indireto: a radiação solar incide sobre uma superfície, normalmente coberta por vidro ou plástico transparente, identificada como superfície absorvedora, que por convecção aquece o ar que flui pela sua superfície e é direcionado para uma câmara isolada (câmara de secagem), onde ocorre a remoção da umidade do produto. Este mo-

delo de secador pode conter armazenador térmico, conforme apresentado pela Figura 3.3, objetivando melhoria no processo de secagem.

- Secador solar misto: semelhante ao secador solar indireto, com a coleta da energia solar realizada por uma superfície absorvedora, aquecendo e direcionando o ar para a câmara de secagem, diferentemente do secador solar indireto que não permite a passagem da radiação solar para ao interior da câmara de secagem, este modelo de secador possui a cobertura da sua câmara de secagem de material transparente, permitindo a incidência da energia solar diretamente sobre o produto.
- Secador solar híbrido: utiliza energia solar como fonte de energia para a secagem do produto em conjunto com outras fontes de energias, que podem ser elétrica, biomassa, GLP, fotovoltaica e outras. Tendo uma unidade auxiliar, que pode ser de armazenamento térmico ou um sistema de bomba de calor ou um sistema de desumidificação.

Leon, Kumar e Bhattacharya (2002) elaborou uma classificação sistemática dos secadores solares, baseado no projeto e no modo de utilização da energia solar, conforme apresentado pela Figura 3.1.

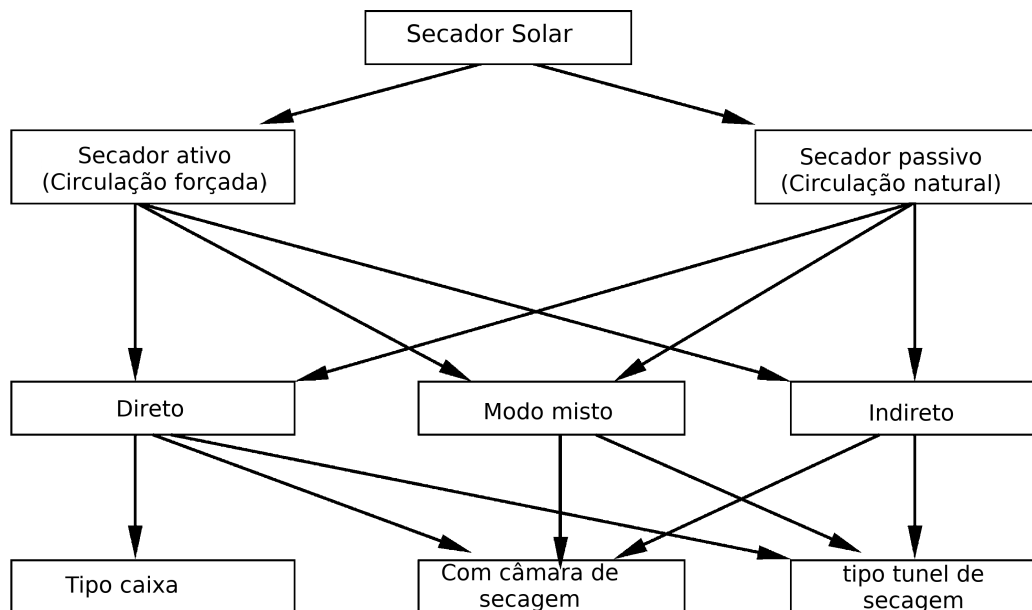


Figura 3.1: Classificação dos secadores solares e técnicas de secagem apresentadas por Leon, Kumar e Bhattacharya (2002).

O trabalho realizado por Sodha e Chandra (1994) informa que a análise do procedimento padrão visando avaliar o desempenho de componentes solares como coletores e aquecedores de água estão definidos, porém os procedimentos padrão para avaliar o desempenho de secadores solares não estão definidos. Essa indefinição perdura até os dias atuais e se deve em grande

parte às variações no design do secador, materiais de construção, condições operacionais, preferências do consumidor e interpretações de qualidade. Alguns autores, enquanto apresentavam os resultados dos seus estudos, seguiram um procedimento de avaliação com base nas variações de avaliação específica do equipamento em estudo, como eficiência térmica, temperatura do ar que circula pelo equipamento ou tempo necessário para um produto específico ser desidratado. Leon, Kumar e Bhattacharya (2002) caracterizaram os principais parâmetros avaliados por esses autores:

1. Características físicas:
 - (a) Tipo, tamanho e forma
 - (b) Capacidade de secagem
 - (c) Área e quantidade de bandejas
 - (d) Conveniência de carregamento e descarregamento
2. Performance térmica
 - (a) Tempo de secagem ou taxa de secagem
 - (b) Temperatura e umidade relativa do ar
 - (c) Vazão de ar
 - (d) Eficiência do secador
3. Qualidade do produto secado
 - (a) Qualidade sensorial (cor, sabor, textura, gosto, aroma)
 - (b) Atributos nutricionais
 - (c) Capacidade de re-hidratação
 - (d) Eficiência do secador (relacionado à remoção de umidade, energia disponibilizada e vazão de ar.)
4. Custo do secador e tempo de retorno
 - (a) Custo anual do investimento comparado com a economia de combustível

Apesar dos autores elencar os principais fatores avaliados nos secadores solares, eles destacam que alguns parâmetros extras devem ser considerados para sistematizar a avaliação desses equipamentos, como o espaço ocupado pelo equipamento, a temperatura máxima do ar com e sem carregamento de produto, tempo que o ar se mantém 10 °C acima da temperatura ambiente, facilidade de construção entre outros.

A posição e a inclinação dos coletores ou da placa absorvedora é de extrema importância para o desempenho do secador, este tema foi estudado por Shariah, Al-Akhras e Al-Omari (2002), com o auxílio do software TRNSYS (Transient System Simulation), investigou-se o ângulo de inclinação de coletores solares para aquecimento de água visando a otimização da fração anual de energia solar incidente nos coletores. O estudo foi realizado nas cidades de Aqaba e Amã, Jordânia. O ângulo base de estudo é a latitude local (θ) e a área absorvedora dos coletores é de 2, 3, 4 e 5 m² com o consumo de água quente fixado em 150 litros/dia a 55 °C. Os resultados do estudo mostraram que a inclinação ideal para maximizar a fração anual de energia é de $\theta + (0 \text{ a } 10^\circ)$ para a região norte (Amã) e de $\theta + (0 \text{ a } 20^\circ)$ para a região sul (Aqaba). Os autores destacam que esses valores são superiores (de 5 a 8°) dos valores para a máxima radiação solar incidente na placa e o ângulo ótimo depende da estratégia de operação do equipamento, variando de acordo com a área do coletor.

Com o propósito de auxiliar na secagem de alimentos, Devahastin e Pitaksuriyarat (2006) estudaram a viabilidade do uso de armazenador de calor latente, usando parafina como material de mudança de fase (PCM) para armazenar a energia excedente e descarregá-la quando necessário. O equipamento consiste de um compressor de ar, um controlador de temperatura, um aquecedor, um armazenador de calor latente e uma câmara de secagem carregada com batatas doces fatiadas. O armazenador é composto de um cilindro de acrílico e no seu interior há 18 tubos de cobre de 8 mm de diâmetro com aletas circulares e os espaçamentos entre os tubos são de 10 mm, os quais são preenchidos com parafina. O estudo usou a temperatura do ar na entrada do armazenador variando entre 70 a 90 °C e a velocidade do ar entre 1 e 2 m/s. O estudo mostrou o efeito da convecção natural na parafina fundida e as isotermas durante o processo de carregamento e descarregamento energético. Sobre o carregamento, o efeito da velocidade do ar influenciou no tempo, porém durante o descarregamento não foi significativo. Ainda sobre o descarregamento, o uso da velocidade do ar mais baixa (1 m/s) foi mais vantajosa, descarregando mais energia por período de tempo, permitindo uma economia de energia de 6% e a taxa de secagem acompanhou essa tendência, sendo mais vantajosa para as velocidades menores.

A análise de secagem de tomates fatiados em um secador solar, conforme ilustrado na Figura 3.2, foi realizada por Rajkumar et al. (2007), comparando os resultados obtidos com um secador solar aberto sob as condições climáticas de Montreal, Canada. Através dos resultados obtidos verificou-se que a temperatura na câmara de vácuo atingiu 48 °C, sendo 18 °C acima da temperatura ambiente e o tempo de secagem dos produtos, até obter 11,5% de umidade (base úmida), foi 20% menor se comparado com o secador solar aberto. Os autores destaca a qualidade superior do produto, obtida por este sistema, isto é, conservação da coloração, sabor e baixa oxidação.

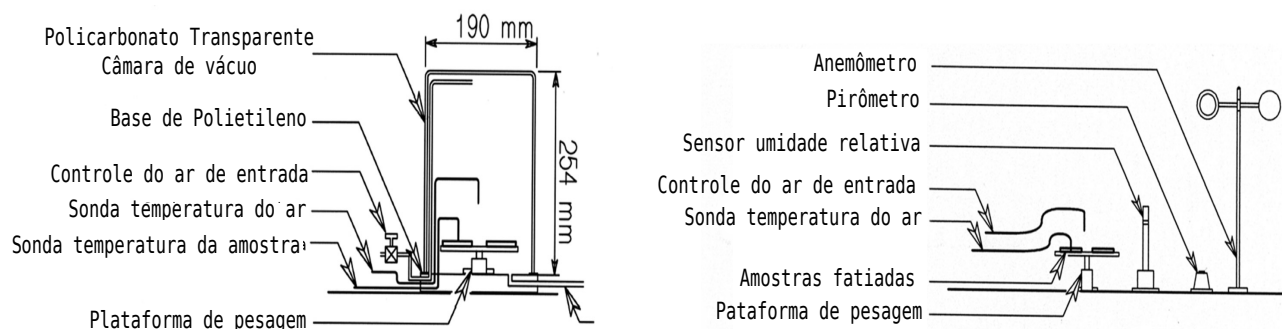


Figura 3.2: Representação do secador solar utilizado para análise de secagem de tomates.

a) Secador Solar direto a vácuo b) Secador solar direto aberto.

Fonte: Rajkumar et al. (2007). Imagem adaptada.

Mohanraj e Chandrasekar (2008) desenvolveram e analisaram um secador solar indireto destinado para produção de coco com foco na qualidade do produto seco e de seu óleo. Os autores destacam que o modo tradicional de secagem desse alimento ocorre em ambiente aberto com a incidência direta dos raios solares no produto, o que causa deterioração, contaminação com poeira e fuligem, além de requerer trabalho manual intenso durante a secagem. O equipamento consiste de uma placa absorvedora de 2 m^2 , tendo na sua face não exposta um reservatório térmico de espessura 100 mm, preenchido com areia, conforme ilustrado pela Figura 3.3. A câmara de secagem tem capacidade para 160 kg de produto e a circulação do ar é feita por um soprador com capacidade volumétrica de $300 \text{ m}^3/\text{h}$. O produto foi secado por 82 h, removendo 50 kg de umidade e o equipamento operou sobre radiação solar máxima de $932 \text{ W}/\text{m}^2$, com a umidade relativa do ar entre 55 a 72% (média de 68%) e temperatura média de $43 \text{ }^\circ\text{C}$. A análise do equipamento demonstrou que a temperatura máxima do ar interno durante a incidência de radiação solar foi de $63 \text{ }^\circ\text{C}$ contra $31 \text{ }^\circ\text{C}$ no período sem radiação solar. Sua eficiência térmica é de 24% e a porcentagem do produto final que obteve alto grau de qualidade conforme norma local, foi de 75%.

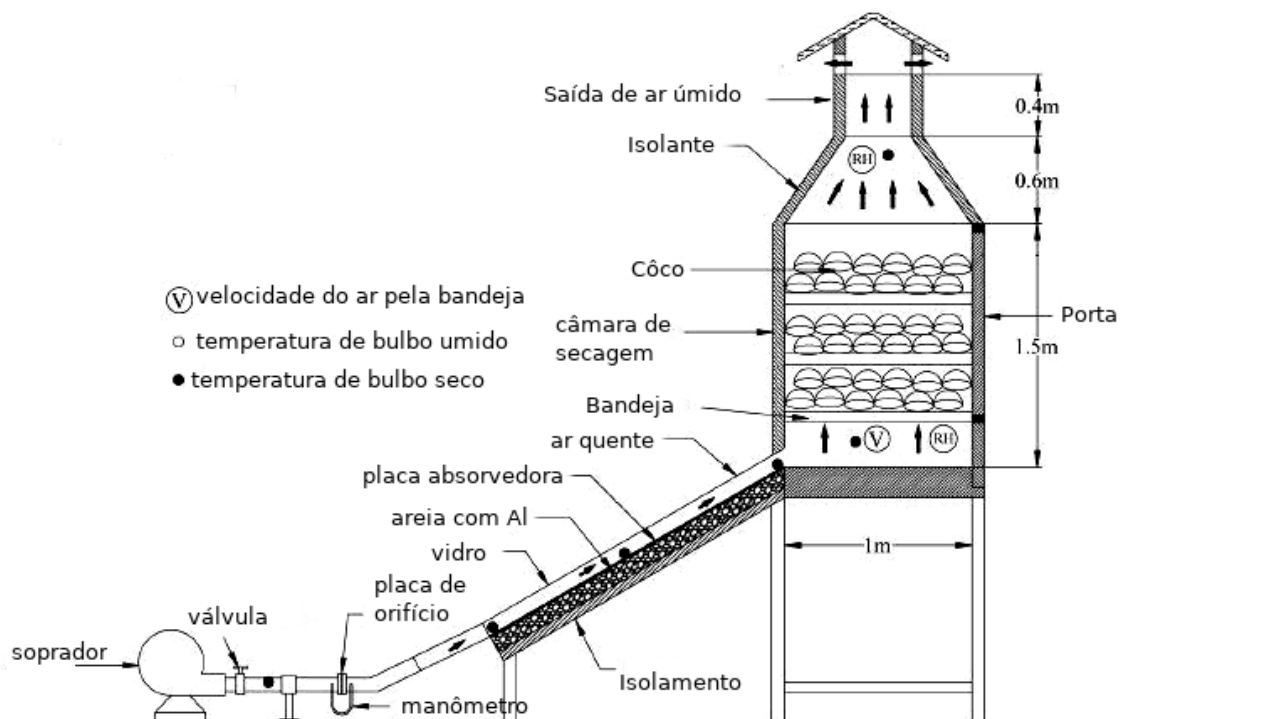


Figura 3.3: Secador solar indireto com armazenador térmico.
 Fonte: Mohanraj e Chandrasekar (2008). Imagem adaptada.

Tambunan, Manalu e Abdullah (2010) fizeram a análise de exergia durante o carregamento e descarregamento de um armazenador térmico, composto por seixos (diâmetro dos seixos de 4,4 cm, densidade do armazenador de $2,717 \text{ kg/m}^3$ com porosidade de 0,45), onde o ar aquecido passa através do armazenador antes de chegar a câmara de secagem. Para uma entrada de ar no acumulador com temperaturas entre $33,8$ e $53,3 \text{ }^\circ\text{C}$, observou-se que na saída as temperaturas ficaram entre $30,8$ e $42,5 \text{ }^\circ\text{C}$, proporcionando o acúmulo de energia no armazenador, o que permite a continuação do processo de secagem por períodos de 2 horas sem a incidência da radiação solar.

Singh e Kumar (2012) citam em seu trabalho que muitos agricultores em países em desenvolvimento adotam a convecção natural em secadores, por não necessitar de instalações elétricas e por ser de fácil construção. Neste trabalho é citado que muitas análises são realizadas com secadores *carregados* com produtos específicos e não há análise do mesmo sem carregamento. Diante disso foram propostos e analisados 3 modelos típicos de secadores: secador solar direto fechado (cabine) com convecção natural, secador solar misto com convecção natural e secador solar indireto com convecção natural. As análises ocorreram sem material alimentício no seu interior, sob condições controladas em laboratório, onde a placa absorvedora foi aquecida por aquecedores elétricos, simulando o aquecimento por radiação solar e o autor considera que toda a energia elétrica fornecida foi convertida em térmica. Diversas condições de operação foram simuladas, determinando o coeficiente de convecção da placa absorvedora em cada um dos

modelos, o qual segundo o autor, pode auxiliar trabalhos em simulações computacionais, análises matemáticas, previsão de desempenho nos secadores e parâmetro de comparação entre o desempenho dos diversos modelos existentes.

Com o propósito de eliminar o super aquecimento e as flutuações na temperatura do ar aquecido em secadores solares, emprega-se o uso de armazenadores térmicos e sobre esse dispositivo Esakkimuthu et al. (2013) investigaram a viabilidade do uso de sal inorgânico, HS 58 - temperatura de fusão de 58 °C, como material de mudança de fase (PCM). O sistema de armazenamento térmico foi composto por 500 esferas de 75 mm de diâmetro com 250 g de HS 58 em cada uma delas, permitindo o armazenamento de energia, na forma de calor latente, de 31,25 kJ. Os testes foram executados com a vazão de ar de 200, 300 e 400 kg/h, mostrando que a melhor eficiência térmica da placa absorvedora, com aproximadamente 60 %, ocorreu com o fluxo de ar de 400 kg/h e insolação de 800 W/m², porém a análise do armazenador térmico mostrou que o fluxo de ar mais baixo (200 kg/h) é mais vantajoso, permitindo o uso máximo da capacidade de armazenamento, com uniformidade no carregamento e descarregamento, pelo tempo de 2h e 4h.

Mohajer et al. (2013) realizaram no Iran, uma investigação experimental de um sistema híbrido para aquecimento de água e fornecimento de ar para o secador de alimentos, identificado como DPSC (Dual Purpose Solar Colector). O equipamento é similar aos modelos utilizados para aquecimento de água residencial, com modificação no coletor solar, onde foi introduzido abaixo da placa absorvedora dutos para circulação de ar, com seção triangular, conectados à câmara de secagem, conforme ilustrado pela Figura 3.4. A análise foi realizada com a circulação de ar forçada com vazão de 0,021 kg/s e circulação de água com vazão de 0,001 kg/s. Duas configurações foram analisadas: com e sem o auxílio de aquecimento de ar por resistência elétrica. Os parâmetros analisados foram a energia absorvida pelos fluidos, a temperatura do ar na câmara de secagem e a perda de massa de água nos alimentos desidratados ao longo do dia.

Os resultados demonstraram que com o auxílio do aquecedor elétrico, o ar na câmara de secagem ficou entre 20 a 30 °C mais quente se comparado com o sistema operando somente com energia solar, atingindo temperaturas próxima de 56 °C, o que reduziu a qualidade dos alimentos por estar próxima a temperatura de cozimento. Porém este modelo apresentou redução de custo e espaço ocupado de aproximadamente 50% se comparado com sistemas independente de aquecimento de água e de ar.

Reyes, Mahn e Vásquez (2014) analisaram um secador solar indireto híbrido com armazenador térmico destinado a secagem de cogumelos, com as seguintes características físicas: um painel solar com 3 m de comprimento por 1 m de largura, onde a placa absorvedora é composta por placas onduladas de zinco com 40 aletas. A cobertura é feita por vidro de espessura de 5 mm. O armazenador térmico é composto por 100 tubos de cobre aletados, preenchidos com 14

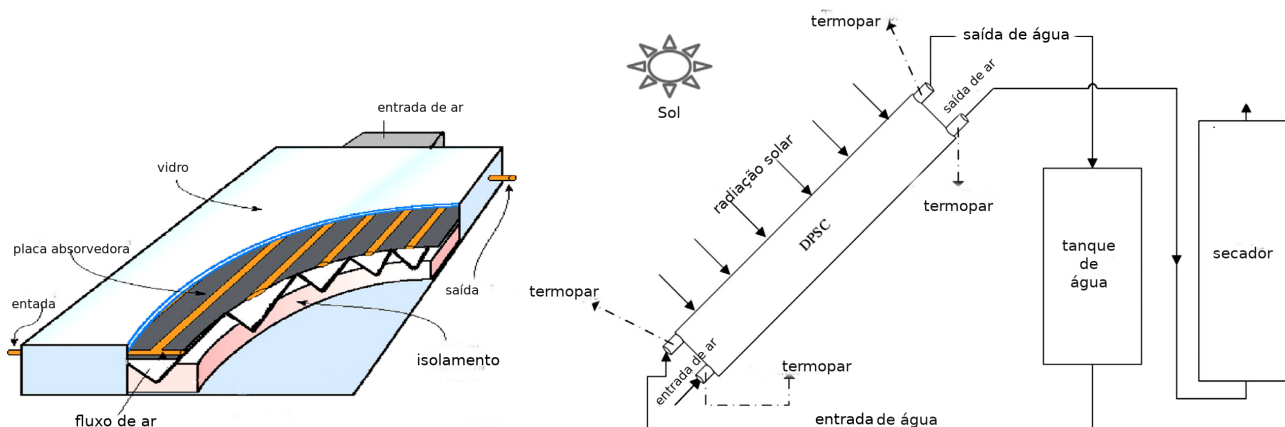


Figura 3.4: Sistema híbrido para secagem de alimentos e aquecimento d'água.

a) Coletor solar DPSC b) Secador híbrido integrado ao aquecimento de água.

Fonte: Mohajer et al. (2013). Imagem Adaptada.

kg de parafina. O equipamento opera através de ventiladores e válvulas que regulam a quantidade de ar provindo do painel solar ou do acumulador, dependendo da necessidade e da radiação solar incidente. Posteriormente o ar é direcionado para uma resistência elétrica de 5000 W que estabelece a temperatura do ar em 60 °C antes de entrar na câmara de secagem. Destacando que 70 a 80% do ar recircula pela câmara de secagem e a resistências elétrica. Nessas condições a eficiência térmica, definida pelos autores como a relação entre a energia absorvida pelo ar ambiente no painel solar e a energia necessária para continuar aquecendo esse ar até 60 °C, foi de 22 a 67% e a eficiência do acumulador, definida pelos autores como a relação entre a energia absorvida pelo acumulador e a energia disponível pela radiação solar, atingindo valores de 10 a 20%.

Um secador baseado em modelos comerciais foi projetado por Sekyere, Forson e Adam (2016) para ser testado e analisado em laboratório (*indoor*), com as características de um modelo misto, de convecção natural com a peculiaridade de ter a superfície absorvedora de concreto ($0,25 \text{ m}^2 - 0,63 \text{ m}^3$) pintado de preto e abaixo dela há uma camada de seixos rochosos ($0,00355 \text{ m}^3$), servindo como armazenador térmico. Possui uma resistência elétrica de 1800 W como energia auxiliar. A análise ocorreu com o uso de lâmpadas infravermelho (460 W/m^2) que simulou os cenários:

1. Radiação solar durante o dia e energia de *backup* (elétrica) a noite;
2. Somente usando a energia de *backup*;
3. Modo misto, com radiação solar e energia de *backup*;
4. Somente radiação solar.

A análise dos resultados focou na vazão de ar quente, taxa de secagem e tempo de secagem

até atingir a porcentagem de umidade desejada pelo autor, além da temperatura dos produtos durante a secagem. Os principais resultados podem ser observados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Tempo de secagem em função da vazão de ar

Cenário	Vazão(kg/s)	Tempo de secagem(h)
1	0,0140-0,0328	19
2	0,0141-0,0936	10
3	0,0140-0,0468	7
4	0,00663-0,00715	23

Fonte: Adaptado de Sekyere, Forson e Adam (2016)

A maior vazão foi atingida no cenário 2, porém a maior taxa de secagem foi obtida no cenário 3, levando 7 horas para secar os produtos. Apesar do cenário 4, somente radiação solar, ter obtido o maior tempo de secagem, foi o que teve maior uniformidade de secagem entra as 3 prateleiras nas quais o produto foi disposto.

Baniasadi, Ranjbar e Boostanipour (2017) analisaram em seu trabalho a performance de um secador solar com convecção forçada em duas configurações, com acumulador térmico e sem o acumulador térmico. O secador deste trabalho é composto basicamente de um coletor solar, de uma câmara de secagem, ventilador para circulação de ar, termopares e tem a característica de ser recoberto com material transparente (placas de acrílico e policarbonato nas laterais e na cobertura). O material desidratado no estudo foi o damasco e a ameixa. Os resultados mostraram que quando usado o acumulador térmico de parafina, a taxa de secagem dos alimentos ficaram constantes, diferente do modelo sem acumulador, e o tempo de secagem foi reduzido pela metade. Outra vantagem em usar o acumulador foi em relação a secagem dos alimentos em função das bandejas, isto é, amostragem da bandeja inferior comparada com a superior não houve grandes diferenças na taxa de secagem em relação a posição, algo que não se nota no modelo sem o uso do acumulador. Os autores compararam a eficiência de secagem do seu modelo com o proposto por Sekyere, Forson e Adam (2016), o qual usava um acumulador térmico de concreto aquecido por eletricidade, com obtenção de resultados semelhantes.

Na instituição Research and Technology Center of Energy (CRTE_n), no norte da Tunísia, El Khadraoui et al. (2017) desenvolveram, construíram e investigaram um secador solar indireto, composto por 2 coletores solares que fornece ar aquecido para a mesma câmara de secagem, onde um deles é utilizado durante o dia para aquecer o ar de entrada (ar ambiente) e o outro coletor é integrado ao armazenador térmico de parafina (PCM) para uso noturno, conforme demonstrado pela Figura 3.5. A circulação do ar pela câmara de secagem é impulsionado por dois sistemas elétricos de ventilação, um para cada coletor e uma válvula direcionadora que controla a origem do fluxo de ar que entra na câmara de secagem, seja provinda do coletor sem

o PCM durante o dia (das 6h as 16h) ou do coletor integrado ao PCM durante a noite (das 16h as 6h). Neste modelo de coletor foi detectado que durante o período da noite a temperatura do ar na câmara de secagem permaneceu entre 4 a 16 °C acima da temperatura ambiente e a umidade relativa se manteve de 17 a 34,5% abaixo da ambiente. Se não houvesse o sistema de armazenador térmico a umidade relativa e a temperatura na câmara de secagem no período noturno seria igual a ambiente.

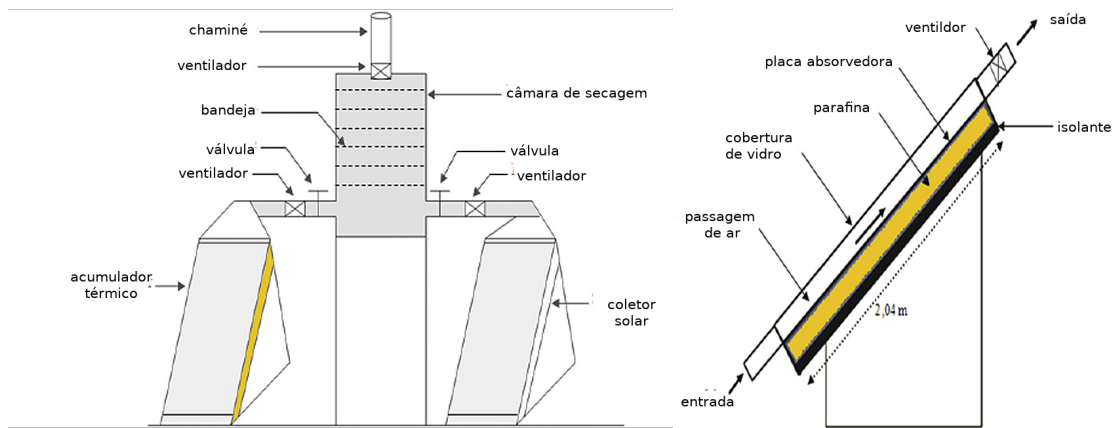


Figura 3.5: Secador solar composto por 2 coletores.

a) Secador com coletor solar e armazenador térmico b) Armazenador térmico em detalhe.

Fonte: Khadraoui et al., 2017. Imagem adaptada.

Ndukwu, Macmanus e Bennamoun (2018), realizaram um estudo com secador solar indireto com convecção natural voltado para a desidratação de pimenta vermelha no sul da Nigéria, região de alta umidade, com períodos intermitentes entre sol e chuva, condições que podem reidratar a pimenta durante o processo de secagem. No intuito de manter a taxa de remoção de umidade e evitar a reidratação, os autores propõem 3 configurações do secador:

1. Uso de sulfeto de sódio deca-hidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$);
2. cloreto de sódio (NaCl) como acumulador térmico;
3. sem acumulação térmica.

O sulfeto de sódio deca-hidratado é um produto de baixo custo, mas o seu uso em secadores é limitado há um ciclo, devido a sua irreversibilidade da fase líquida, por isso foi trocado diariamente. Os testes foram realizados até que os produtos, inicialmente com umidade de 70% (Base Úmida), atingissem 8 a 10% de umidade, o que levou entre 88 a 144 h, dependendo da configuração do equipamento. Quando usado $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, o tempo de secagem foi reduzido em 26,7% se comparado com o tempo de secagem com o uso de NaCl , mas se comparar com o equipamento sem armazenamento térmico, o tempo de secagem foi reduzido em 39%. Os autores também fizeram a análise das propriedades termofísicas da pimenta, assim como a retração e a cinética de secagem do produto.

Em sua tese de doutorado, Al - Neama (2018) analisou o secador solar indireto com dupla passagem de ar, sendo que o ar entra em contato com a placa absorvedora pela face exposta aos raios solares, percorre todo o comprimento desta face e através de orifícios localizados próximo a sua borda superior, altera sua trajetória para a face de baixo da placa, efetuando assim a troca de calor com as duas faces. O estudo analisou o desempenho do secador na configuração sem barreiras (aletas) e com barreiras na face não exposta da placa (parte inferior), nas seguintes configurações:

1. Barreiras na posição vertical;
2. Barreiras em 45°;
3. Barreiras na horizontal;
4. Barreiras na forma de helicóide na horizontal.

Para manter o fluxo de ar foi usado ventilação forçada com o uso de um soprador alimentado por uma placa fotovoltaica. Os resultados mostraram o relacionamento entre a eficiência térmica com a inclinação das barreiras, sendo eles:

- Sem barreira: a eficiência térmica é de 45,56%;
- Configuração 1 (com barreira na vertical): a eficiência térmica é de 46,53%;
- Configuração 2 (com barreiras em 45°): a eficiência é de 52,84%;
- Configuração 3 (com barreira na horizontal): a eficiência térmica é de 56,01%;
- Configuração 3 (Com barreiras helicoidais na horizontal): a eficiência térmica é de 63,43%.

A influência das configurações 1 a 3 na capacidade de remover umidade dos alimentos foi testada, com o uso de 2 kg de maçã fatiada, o secador com uma passagem de ar removeu menos umidade que o de dupla passagem. Sobre a relação das configurações com dupla passagem de ar, a ordem de eficiência na remoção de umidade seguiu a ordem da eficiência térmica, com exceção do uso de barreiras na vertical que se mostrou menos vantajoso que a configuração sem barreira.

Com o objetivo de eliminar o uso de energia elétrica como fonte auxiliar em secadores solares indiretos com circulação forçada, (CHANDRASEKAR et al., 2018), elaboraram um estudo deste modelo de equipamento em conjunto com a unidade condensadora de ar condicionado, modelo split, conforme ilustrado na Figura 3.6. O estudo ocorreu em Tiruchirappalli, Tamil Nadu, Índia e usou a unidade condensadora, que tem o ar atmosférico como refrigerante para dissipar o calor rejeitado, como fonte de ar aquecido que proporciona a circulação pelo secador solar, sendo uma fonte auxiliar de calor. O equipamento é composto por uma placa absorvedora

de alumínio, com espessura de 2 mm, pintada de preto, nas dimensões 0,6 m x 0,6 m, coberta por vidro e a câmara de secagem tem as dimensões de 0,5 m x 0,5 m x 0,7 m (C x L x A) e foi carregada com 0,5 kg uvas. Os resultados mostraram que este modelo de secador reduziu o tempo de secagem das uvas em 16,7 % se comparado ao secador aberto com radiação direta e com possibilidade de aumentar em 13 % a eficiência de coletores solares.

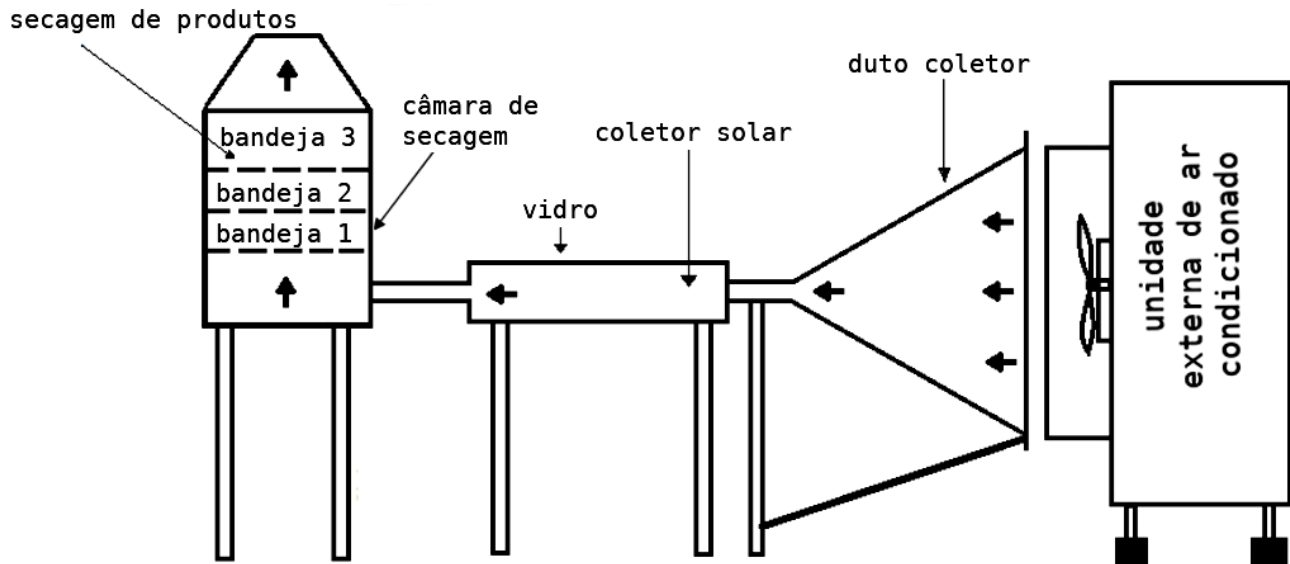


Figura 3.6: Secador solar indireto integrado a unidade condensadora de ar condicionado.
Fonte: Chandrasekar et al. (2018). Imagem adaptada.

O modelo de acumulador usado por Vásquez, Reyes e Pailahueque (2019) foi desenvolvido e analisado experimentalmente por Reyes, Negrete et al. (2014), o qual escolheu usar materiais com mudança de fases (*Phase Change Material-PCM*) na temperatura de operação do equipamento, objetivando o armazenamento do calor latente. Entre as 3 classes de PCM (materiais orgânicos, materiais inorgânicos e materiais eutéticos), foi usado o material orgânico pasta de parafina, por ser quimicamente estável, não ser corrosiva e ter alto calor latente por unidade de massa, porém a sua condutibilidade térmica é baixa. Para contornar essa desvantagem da baixa condutibilidade foi introduzido à parafina cavacos de alumínio por ter alta condutibilidade térmica, na proporção de 5% da massa de parafina.

O acumulador foi desenvolvido com 48 latas de alumínio de 350 ml, com pintura preta, dispostas perpendicularmente ao fluxo de ar e preenchidas com 0,2 kg/lata de parafina. O tempo de aquecimento e fusão da parafina foram analisados, apresentando que a fusão total com a presença dos cavacos, foi de 70 minutos e sem os cavacos foi de 140 minutos. A análise deste acumulador foi realizada em duas configurações: com as latas espaçadas em 2 cm e ar passando por esse espaço e com o espaço entre as latas preenchido por 0,5 kg de cavaco de alumínio. Os resultados mostraram que com o cavaco de alumínio entre as latas, o tempo de fusão da parafina foi de 100 minutos, contra 130 minutos sem o cavaco. A descarga de energia

térmica do acumulador, proporcionou aquecer por 2 horas o ar com vazão de $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$ entre 20 e 40°C acima da temperatura ambiente.

Vásquez, Reyes e Pailahueque (2019) elaboraram um modelo matemático baseado em equações diferenciais para um coletor solar de fluxo de ar forçado. Este era composto por 3 unidades: câmara de secagem, unidade absorvedora com área de aproximadamente $3,5 \text{ m}^2$, com 40 aletas para aumentar a transferência de calor e a unidade acumuladora composta por 300 latas de refrigerantes preenchidas com 56 kg de parafina e 4,8 kg de cavaco de alumínio, modelo este apresentado por Reyes, Negrete et al. (2014). O principal objetivo deste trabalho é elaborar um modelo matemático global, obtendo por simulação a eficiência térmica do coletor e do armazenador em função da vazão, demonstrando que a maior eficiência ocorre em maiores vazões, porém não significa maiores taxas de secagem. O modelo foi validado através dos dados experimentais coletados no equipamento, demonstrando a vantagem de usar acumuladores, o qual manteve a temperatura do ar na saída do acumulador acima de 310 K por aproximadamente 300 minutos, para a temperatura ambiente entre 290 e 300 K.

Na África foi analisado por NduKwu et al. (2020) um secador solar misto dotado de um sistema de ventilação ativa movida por energia eólica. Este modelo de secador foi comparado com outro secador semelhante, em duas condições: secador de mesmas proporções sem o sistema de ventilação ativa por energia eólica e secador com sistema de armazenamento térmico usando 2 kg de glicerina. Os resultados desse trabalho mostrou que o uso do dispositivo de ventilação não aumentou a quantidade de umidade removida do alimento utilizado, porém o uso do armazenador térmico aumentou a remoção em 5,6% e a combinação do dispositivo de ventilação com o armazenador aumentou a remoção de umidade em 9,4%.

Baseado nos trabalhos analisados na revisão bibliográfica e visando contribuir para o desenvolvimento de equipamentos sustentáveis que utilizam a energia solar, foi projetado, construído e instrumentado um secador solar indireto com alteração da posição da placa absorvedora, que é apresentado com detalhes no capítulo 4, incluindo a sua forma construtiva e os materiais usados na sua elaboração, assim como o modelo de instrumentação usada e o método de coleta de dados. Após analisar experimentalmente o secado solar, foi elaborado o seu modelo numérico e simulado no software OpenFOAM[®], os resultados obtidos das simulações foram comparados com os dados experimentais.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento desse trabalho foi projetado, construído e instrumentado um secador solar indireto por convecção natural. A sua estrutura é composta por cantoneiras de abas iguais de 1” de largura, recoberto por placas de EPS de espessura de 30 mm, com a finalidade de isolante térmico, conforme apresentado pela Figura 4.1.



Figura 4.1: Secador solar em fase inicial de construção: estrutura metálica e isolamento térmico.
Fonte: Autor (2021).

O equipamento finalizado tem as seguintes dimensões: largura de 500 mm, comprimento de 1700 mm e altura 2400 mm e podem ser vistas com maiores detalhamento na Figura 4.2.

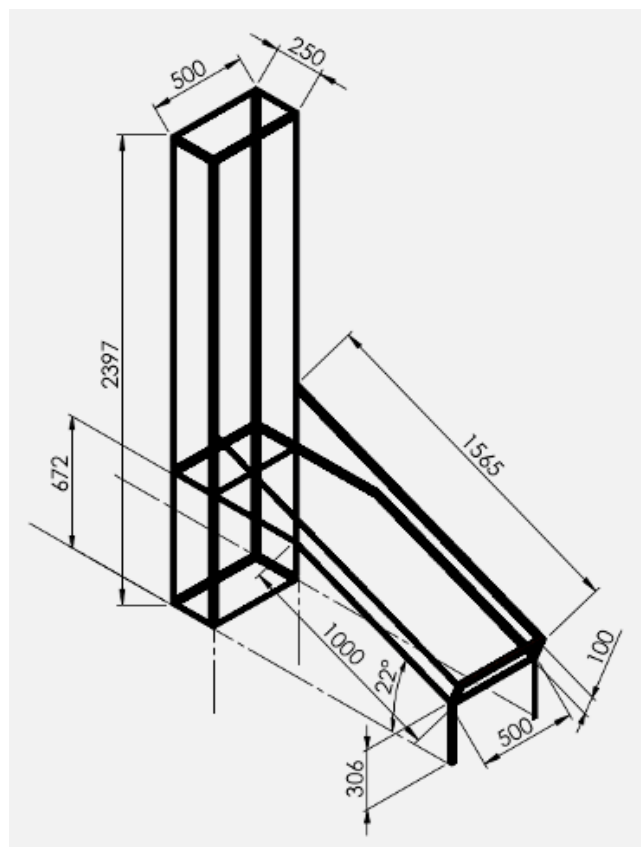


Figura 4.2: Dimensões do secador solar indireto.
Fonte: Autor (2021).

A circulação do ar pelo equipamento ocorre por convecção natural devido ao aquecimento da placa absorvedora pela radiação solar. Essa placa é feita de aço com 2 mm de espessura, largura de 500 mm e comprimento de 1000 mm, pintada na cor preta com uma tinta de alta absorvidade e sobre a placa há uma cobertura de vidro comercial de 3 mm de espessura.

O posicionamento da placa absorvedora pode ser alterado, pois o equipamento foi projetado para possibilitar 2 posições, conforme ilustrado na Figura 4.3, sendo elas:

- Configuração 1: a placa absorvedora é posicionada de forma a ficar alinhada com a estrutura metálica do equipamento, tendo a sua superfície inferior isolada (superfície que não está exposta aos raios solares). A circulação de ar ocorre apenas na face superior que está exposta a radiação solar. A distancia do vidro de cobertura em relação a placa é de 100 mm;
- Configuração 2: A placa é elevada em relação a configuração 1 em 50 mm, permitindo a circulação de ar em ambas as faces, inferior e superior. Nessa posição, a placa fica à 50 mm de distância do vidro de cobertura.



Figura 4.3: Representação do posicionamento da placa absorvedora.

(a) configuração 1: placa com a superfície inferior isolada; (b) configuração 2: passagem de ar por ambas as superfícies da placa absorvedora.

Fonte: Autor (2021).

4.1 Anemômetro

Um parâmetro importante na definição do comportamento do secador é o mapeamento das características do ar que circula pelo equipamento, isto é, a sua temperatura, umidade relativa e a velocidade ou vazão mássica. O mapeamento da vazão de ar foi realizada com o uso de um anemômetro modelo turbina, porém para atender os requisitos de operar em ambiente externo, com umidade e temperatura variada e que permitisse o registro dos dados em um *dataloger*, foi necessário o desenvolvimento de um equipamento com os requisitos específicos para esse projeto.

O princípio de operação do anemômetro desenvolvido neste trabalho foi baseado no uso do sensor tipo Hall, que é sensível a campo magnético e ao ser atingido por este, emite um sinal de nível baixo, 0 V, caso contrário o sinal será de nível alto, 5 V, conforme mostrado na Figura 4.4.

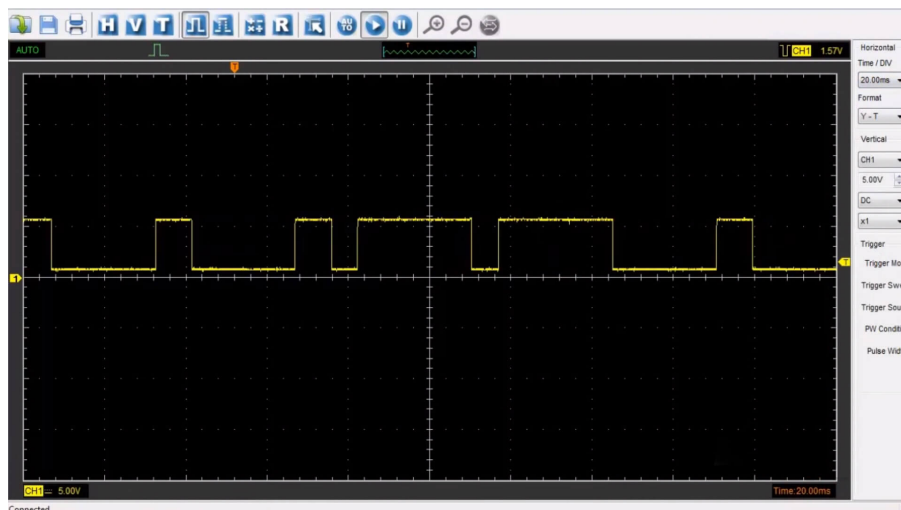


Figura 4.4: Sinal típico de um sensor Hall digital.

Fonte: Blog Doutor-IE.

Este sensor é amplamente utilizado para determinar a rotação de eixos girantes e empre-

gado no setor automobilístico para determinar a rotação do motor, a velocidade do veículo, o sensoramento do freio ABS, etc. Um exemplo de uso é na roda fônica em veículos (Figura 4.5) que determina a rotação do motor e a posição do motor, auxiliando a operação do sistema de injeção.

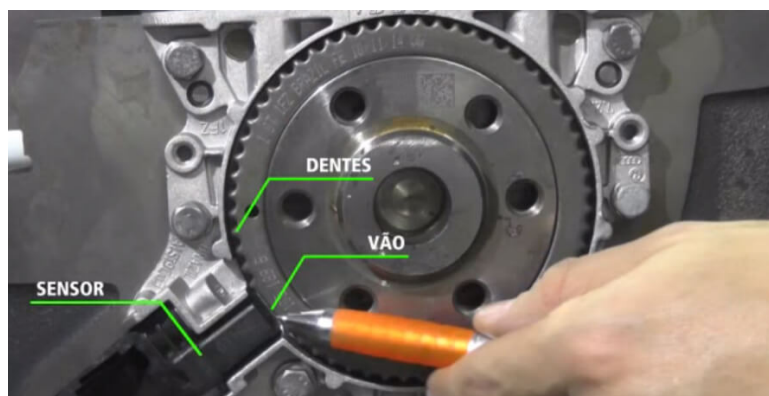


Figura 4.5: Roda fônica veicular.
Fonte: Blog Doutor-IE.

O uso e a implementação do sensor tipo Hall é simples e necessita somente de 3 conexões, sendo duas destinadas a alimentação e um para a saída do sinal (Figura 4.6) e dependendo do fabricante do sensor, é necessário o uso de capacitor e de resistor, com a finalidade de manter o sinal de saída estável no nível alto, evitando má interpretação de dados pelo processador de sinais.

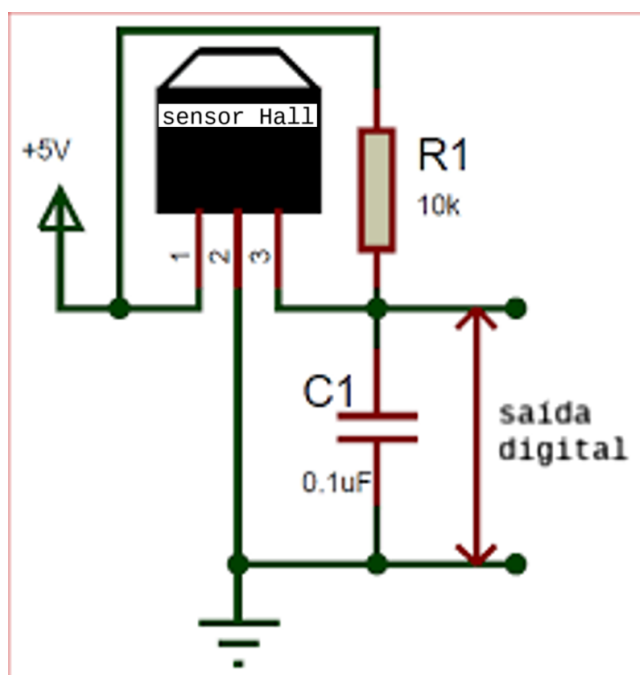


Figura 4.6: Sensor Hall: esquema elétrico de instalação.
Fonte: Autor (2021).

Com o entendimento do funcionamento do sensor Hall, a confecção do anemômetro se deu a partir de um *cooler* de computador, com diâmetro de 80 mm. A primeira modificação foi a remoção do sistema elétrico original, Figura 4.7a, após isso as trilhas elétricas existentes na placa eletrônica do *cooler* foram adaptadas para a forma indicada na Figura 4.6, com a adição do resistor de 10 K Ω , conforme indicado na Figura 4.7b.

As últimas alterações foram a instalação do sensor Hall, Figura 4.7c, a troca das buchas dos mancais por micros rolamentos de baixo atrito para melhorar o desempenho do anemômetro e a fixação de ímãs para acionar o sensor, que neste equipamento foram 2, Figura 4.7d, gerando a cada volta 2 sinais altos e dois sinais baixos, determinando assim a velocidade e a frequência de giro das hélices.

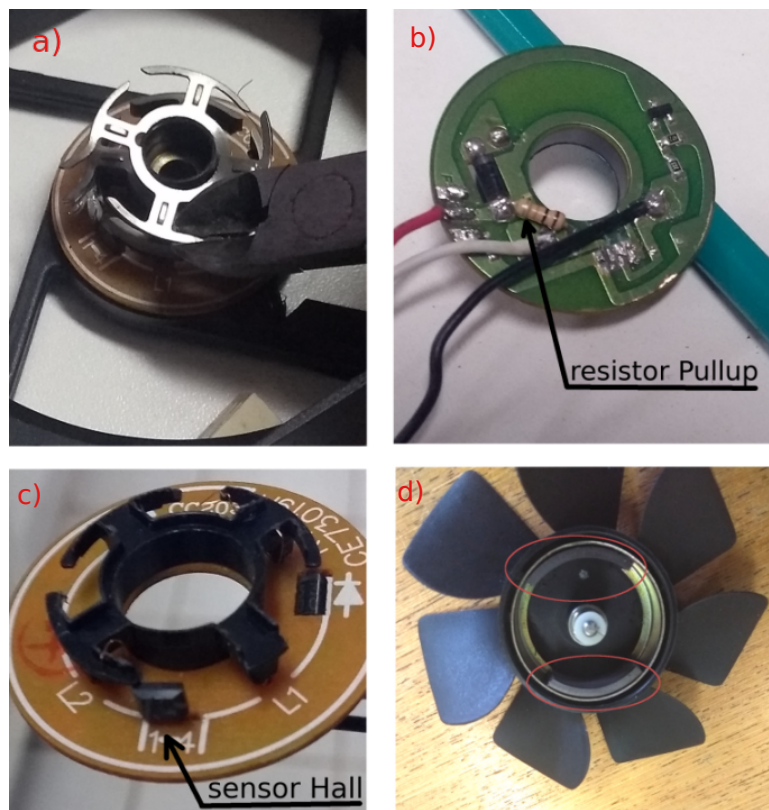


Figura 4.7: Representação das etapas de confecção do anemômetro.

a) Remoção da bobina elétrica; b) Adaptação da placa impressa; c) Instalação do sensor Hall; d) instalação dos ímãs de acionamento do sensor. Fonte: Autor (2021).

A verificação de operação e a calibração do anemômetro se deu no próprio secador, simulando as condições de operações. Para a instalação do anemômetro foi necessário a estricção da vazão de ar, no intuito de aumentar a velocidade e atingir um valor mensurável, para isso foi fixado na saída do ar aquecido do secador solar uma coifa que reduz a área do duto de saída para a área da hélice do *cooler*, conforme apresentado pela Figura 4.8.

A calibração foi feita com o auxílio do anemômetro de fio quente, fabricante OMEGA, modelo HHF-SD1, resolução: 0,01 m/s, exatidão: $\pm 5\% + 0,1$ m/s. A Figura 4.9c mostra o

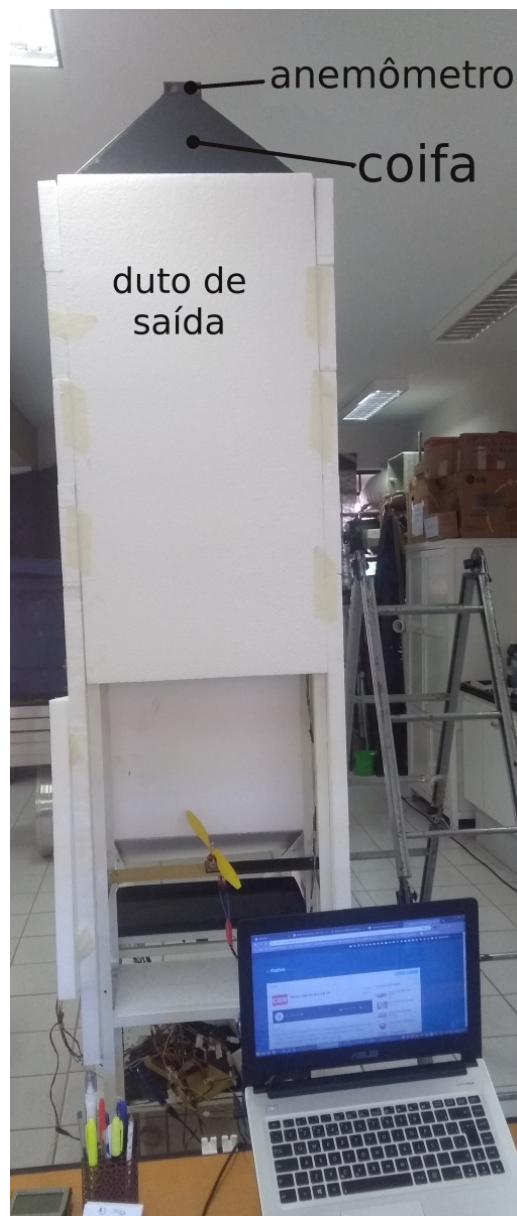


Figura 4.8: Instalação da coifa e do anemômetro.
Fonte: Autor (2021).

anemômetro de fio quente em operação, o qual a sua haste de leitura foi instalada acima do anemômetro, conforme apresentado pela Figura 4.9a. Para proporcionar a circulação do ar durante a calibração, foi empregado um motor brushless de 12 V, com uma hélice de 250 mm de diâmetro e passo de 45°, posicionada logo após a placa absorvedora, conforme apresentado pela Figura 4.9d.

A rotação do motor foi controlada por um dispositivo eletrônico elaborado exclusivamente para auxiliar a calibração, o qual relaciona a condição de um potenciômetro, ajustado pelo operador, à rotação do motor, permitindo o ajuste da rotação de 0 a 9000 rpm. A faixa de velocidade do ar usada para a calibração foi de 0,77 m/s a 2,04 m/s com vazão de 0,003

m^3/s a $0,0078 \text{ m}^3/\text{s}$. A curva de calibração é apresentada no Apêndice F, com o coeficiente de determinação (R^2) de 0,9989, erro padrão (EP) de 0,0123 e desvio padrão (σ) 0,0799.



Figura 4.9: Representação da calibração do anemômetro tipo turbina.

- a) destaque para a haste do anemômetro de fio quente acima do anemômetro de turbina,
- b) forma de introdução da haste do anemômetro de fio quente no duto de passagem de ar,
- c) processador, *display* e *datalogger* do anemômetro de fio quente, d) destaque para hélice responsável pela circulação de ar durante a calibração.

4.2 Célula de carga

A quantidade de umidade removida dos alimentos ou a taxa de evaporação depende da mensuração da massa dos produtos que estão sendo desidratados em intervalos de tempos determinados. Conforme observado nos trabalhos de autores variados sobre este tema Reyes, Mahn e Vásquez (2014), Rajkumar et al. (2007), Mohanraj e Chandrasekar (2008), NduKwu et al. (2020), Pourbagher, Rahmati e Alizadeh (s.d.), Sharma, Colangelo e Spagna (1993), Şevik et al. (2019), Natarajan et al. (2017), Erick César et al. (2020), Vijayan, Arjunan e Kumar (2020), Hidalgo et al. (2021) e Veeramanipriya e Umayal Sundari (2021), a determinação da massa dos produtos é realizada através de uma balança externa ao secador, tendo de remover o produto do interior do secador em intervalos de tempos definidos para fazer a pesagem, sendo tipicamente adotado o intervalo de tempo de 15 minutos.

A remoção do alimento do interior do secador, provocaria resfriamento na câmara de secagem. Para evitar esse inconveniente, foi construída uma balança para medição dinâmica da massa, de acordo com os seguintes requisitos:

1. Permitir a obtenção de dados sem interferir no processo;
2. Esteja instalada no interior do secador;
3. Resista as variações de temperatura e umidade características do processo de secagem;
4. Forneça os dados de forma que seja possível o seu processamento e armazenamento em *dataloger* externo ao secador.

O sensor utilizado para a confecção da balança foi a célula de carga com capacidade de 2 kg, corpo em alumínio nas dimensões 80 mm x 12,7 mm, composta por *strain gauges*, na qual a ficha técnica está apresentada na tabela Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Ficha técnica da célula de carga de 2 kg de capacidade

Descrição	Valor
Faixa de operação	2 kg
Erro	0.03% F. E.
impedância de saída	$1000 \pm 10 \Omega$
impedância de entrada	$1000 \pm 10 \Omega$
Temperatura de operação	-10 a 50 °C
Sobrecarga de segurança	120%
Limite de sobrecarga	150%
Tensão de excitação	9-12 VCC
Atraso	0.02% F.S.
Sensibilidade	$2.0 \pm 0.2 \text{ mv/v}$

Com o propósito da balança não interferir na dinâmica de secagem, sendo rígida e estável, ela foi confeccionada de metalon de seção 20 mm x 20 mm e espessura de 1,2 mm, com formato que a permita ser posicionada na câmara de secagem, conforme apresentado em detalhes na Figura 4.10 e Figura 4.11.

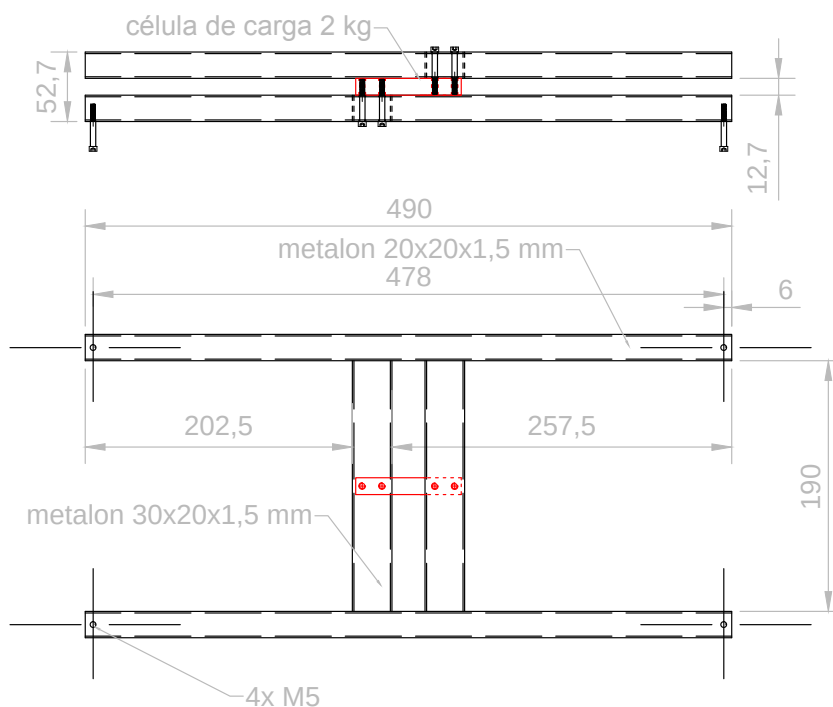


Figura 4.10: Projeto da balança.

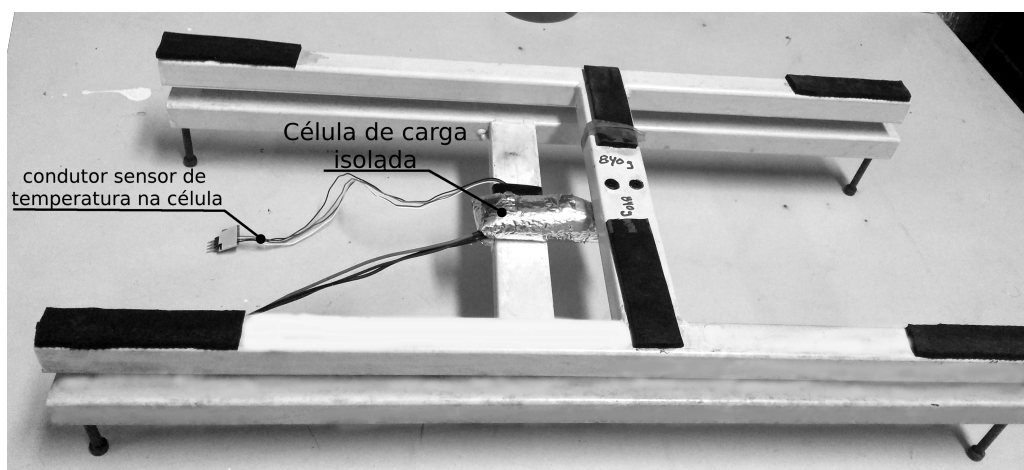


Figura 4.11: Balança confeccionada.

A balança foi calibrada utilizando como referência uma balança de precisão, fabricante Toledo, modelo AV2102CP, com capacidade de 2100 g, sensibilidade de 0,1 g, classe de exatidão

III. Foram utilizados pesos variados de 100 em 100 g para determinar o fator de calibração, que é utilizado na programação para ajustar o valor do sinal recebido da célula de carga.

Após calibrada em condições controladas de temperaturas, a balança foi instalada no secador, com o propósito de analisar o seu comportamento operacional em função da temperatura, pois o ar aquecido pela placa absorvedora flui para a câmara de secagem, circunda a balança e a aquece. Para obter a temperatura da célula de carga da balança, foi instalado um sensor digital de temperatura (DS18B20, Maxim Integrated Products, Inc.) em seu corpo de alumínio. O comportamento da célula de carga com a variação da temperatura pode ser observado na Figura 4.12.

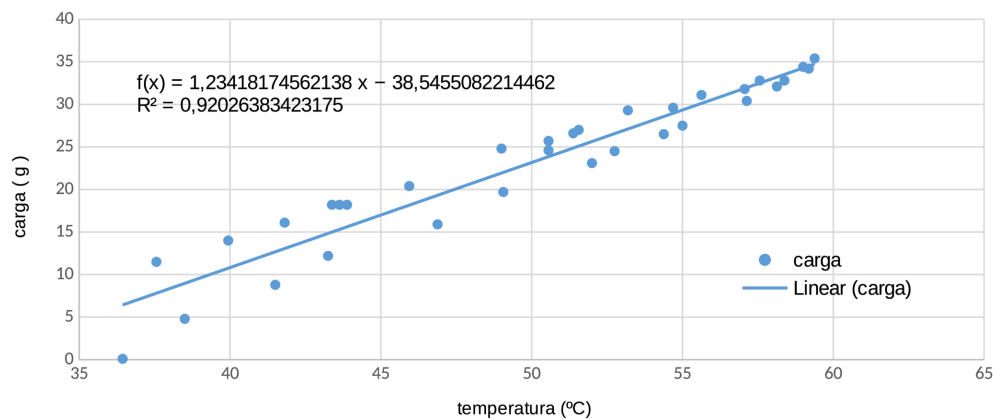


Figura 4.12: Comportamento da balança com a temperatura.

Na curva de calibração da balança, analisada pela Figura 4.12, verifica-se que o valor fixo de 400 g foi utilizado e tarado para o valor zero, apesar da linearidade, há uma pequena discrepância entre os valores das regiões superior e inferior da linha de tendência, indicando comportamentos diferentes no aquecimento e no resfriamento. Os pontos experimentais foram colhidos entre as 09:00h e 17:00h, onde o aquecimento ocorreu até às 13:00h e a partir desse horário, iniciou-se o resfriamento.

Sabendo que a célula de carga da balança tem um comportamento ao aquecer e outro ao se resfriar e objetivando maior precisão na obtenção dos dados coletados, foram elaborados dois gráficos do comportamento da célula de carga com a temperatura, um referente ao período de aquecimento, Figura 4.13, e outro referente ao período de resfriamento, Figura 4.14, tornando possível definir as equações das linhas de tendência para estes dois regimes comportamentais.

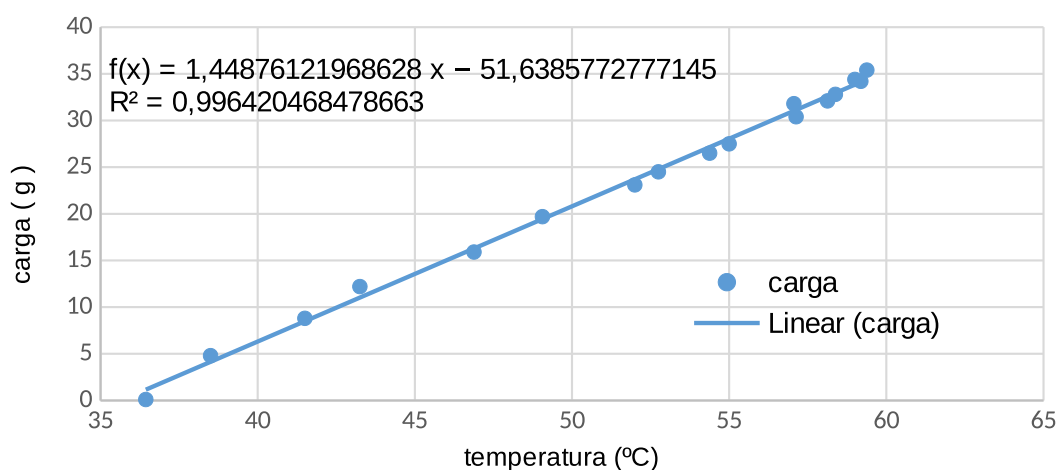


Figura 4.13: Comportamento da balança com o aumento da temperatura.

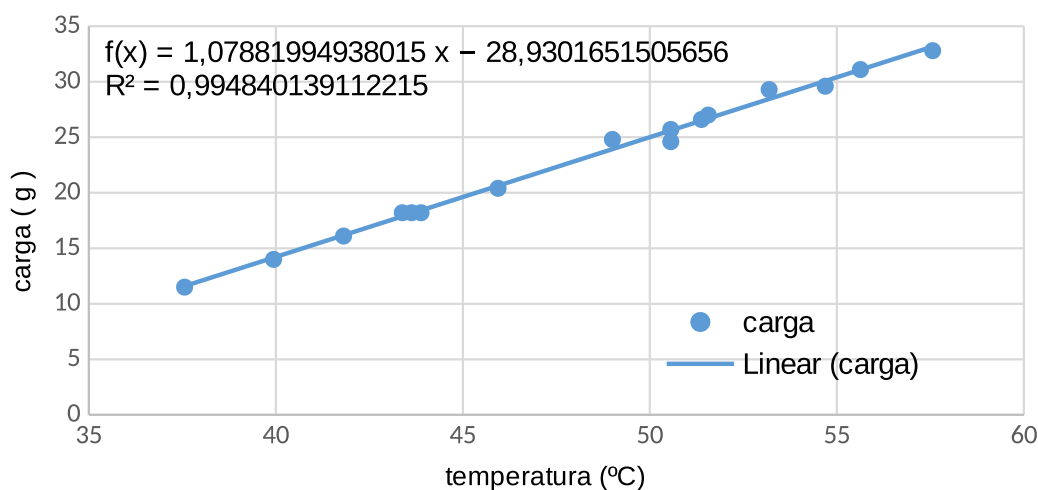


Figura 4.14: Comportamento da balança com o decréscimo da temperatura.

A balança apresenta um comportamento bem definido, visualizado através das equações, linhas de tendência e fator de calibração, sendo assim possível analisar os dados obtidos após diversos ajustes, de acordo com a variação da temperatura. A Figura 4.15 apresenta a variação de uma carga de valor fixo em função da temperatura em um período de 8 horas, coletados a cada 15 minutos.

Variações de valores obtidos da balança ainda ocorrem, porém em pequena escala, com intervalo entre -1g e 1,17g e erro padrão $EP = 0,0989$. Os dados estatísticos referentes aos dados coletados são apresentados na Tabela 4.2. Outros fatores que influenciam na estabilidade dos dados coletados é a oscilação na voltagem de excitação da célula de carga, mais especificamente na Ponte de Wheatstone formada pelos *strain gauges*, que apesar de ser pequena, é amplificada pelo amplificador de sinal, necessário para a leitura da célula de carga pelo processador do *datalogger*. Sobre este amplificador pode-se afirmar que é extremamente sensível a interferência

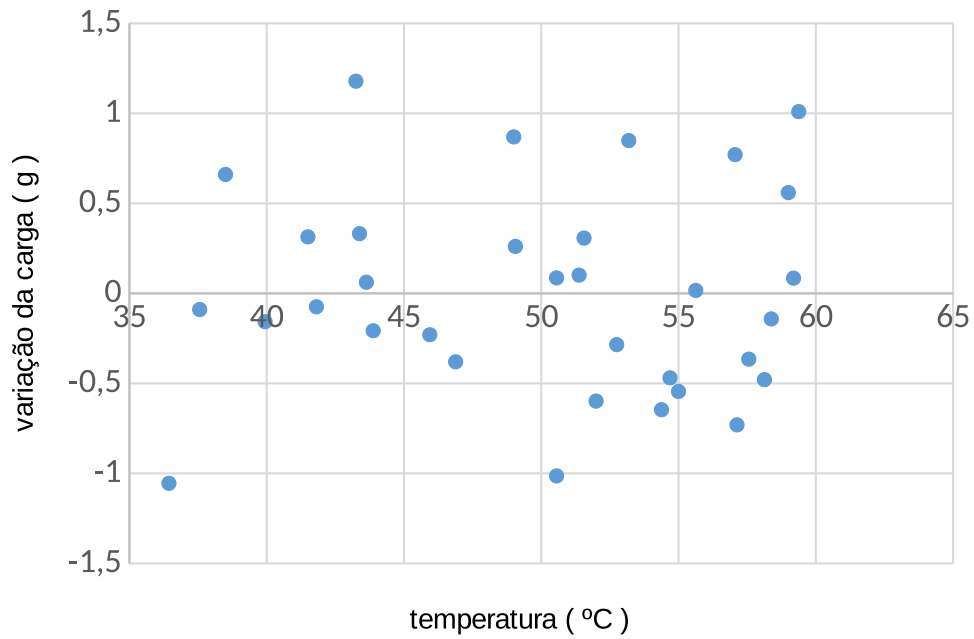


Figura 4.15: Comportamento da balança com o decréscimo da temperatura.

de sinais de radio frequência, como os disponibilizados pela rede wifi, por isso ele e os seus condutores foram blindados para minimizar as interferências externas.

Tabela 4.2: Estatística da balança.

descrição	valor
Média	-4,28E-4
Erro Padrão	9,8953E-2
Mediana	-7,4628E-2
Desvio Padrão	5,68442E-1
Variação da Amostra	3,23126E-1
Variação	2,233672
Mínimo	-1,055272
Máximo	1,1784
Soma	-1,4140E-2
Amostragem	33
Nível de confiança (95,0%)	2,01561E-1

4.3 Sensor de umidade e temperatura - BME280

O sensor BME280 é uma combinação dos sensores de umidade relativa, de temperatura e pressão atmosférica absoluta, alojados de forma compacta e coberto por uma proteção metálica nas medidas 2,5 x 2,5 mm e altura de 0,93 mm, Figura 4.16, tendo a característica de obter a resposta em da umidade relativa em curtos intervalos de tempo e em condições diversas de temperatura.

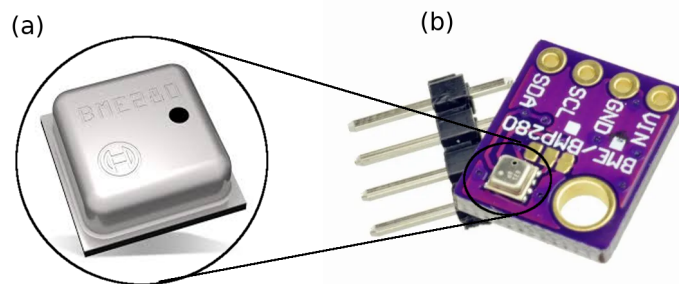


Figura 4.16: Conjunto sensor de umidade e circuito eletrônico.

a)Sensor BME280, b)Sensor BME280 integrado ao circuito eletrônico. Fonte: Autor (2021).

As principais características desse sensor assim como a acuracidade e a faixa de operação estão presente na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Ficha técnica do sensor BME280.

parâmetro	valor
Comunicação	I ² C (3,4 MHz) e SPI (3 e 4 fios - 10 MHz)
Alimentação	1,71 V a 3,6 V
Corrente	0,0018 A - umidade e temperatura 0,0028 A - pressão e temperatura 0,0036 A - umidade, pressão e temperatura 0,0001 A - <i>sleep</i> modo
Faixa de operação	-40 a 85 °C 0 a 100% umidade relativa 300 a 1100 hPa

Dois sensores de umidade foram instalados, um na entrada do ar ambiente e outro na saída do ar aquecido, possibilitando determinar a diferença de umidade relativa entre o ar de entrada e o de saída.

A verificação de operação dos sensores ocorreu de duas formas, ambas realizadas no próprio secador solar:

- Primeira verificação: verificação se existe diferença entre os valores de entrada (R_in_280) e saída (R_out_280), ambos instalados na saída de ar quente do secador, local em que as condições de temperatura e umidade sofrem alterações durante o experimento. A Figura 4.17 apresenta os dados coletados antes do tratamento matemático pela calibração. O sensor destinada à entrada de ar registra um valor de umidade relativava de 1% acima do esperado, porém esse valor se propaga de forma constante, não sendo afetado pelos valores de temperatura e umidade, facilitando quaisquer correções durante o tratamento dos dados coletados;
- Segunda verificação: verificação após tratamento matemática de calibração, a qual ajustou o sensor de umidade da entrada para apresentar os dados conforme o sensor da saída. Os sensores foram instalados em regiões diferentes, um na entrada e outro na saída de ar no secador, como não havia produto a ser desidratado no interior do secador, a quantidade de massa (vapor d'água) que entrou no secador foi igual a que saiu, sendo assim, verificou-se que os sensores estão operando em condições normais.

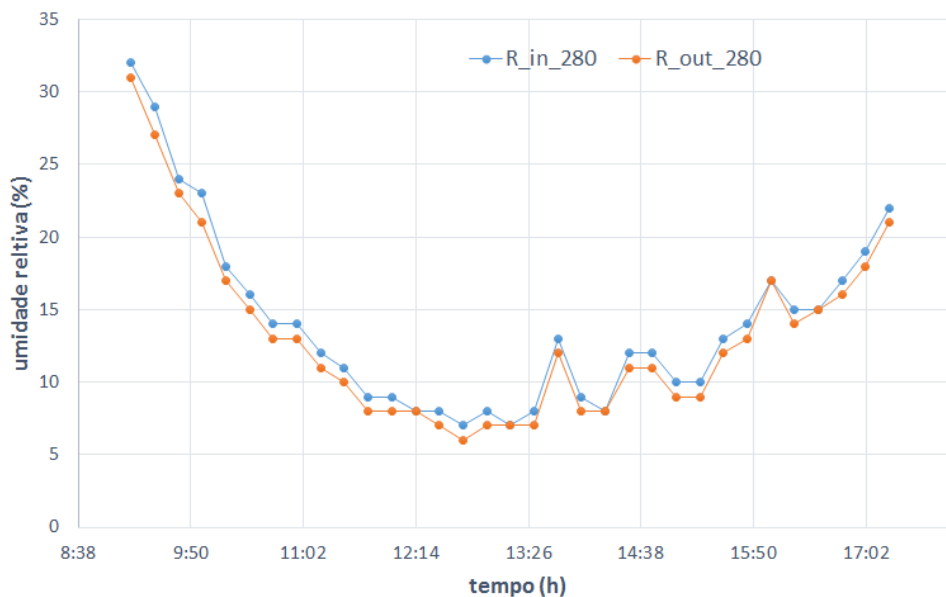


Figura 4.17: Análise do comportamento dos sensores de umidade.

4.4 Sensor de temperatura DS18B20

O sensor de temperatura usado neste trabalho foi o comercializado pelo fabricante MAXIM, identificado como Dallas DS18B20, que é um termômetro digital com sensibilidade de 0,5 °C, acurácia de $\pm 0,5$ °C entre -10 °C a +85 °C, erro de 0,5 °C e alimentação de 3 a 5,5 Volts. A resolução termométrica é normalmente selecionada entre 9 e 12 bits. A principal característica

deste sensor é a forma de ser identificado pelo *datalogger* ou pelo processador de dados, pois possui um código serial de 64 bits, permitindo que múltiplos sensores sejam usados no mesmo cabeamento e na mesma porta digital, isto é, um único condutor para a transmissão dos dados de todos os sensores, desde que, seja conhecido o código referente ao endereço de cada sensor. A instalação deste dispositivo se dá por meio de três condutores, sendo eles o "ground" (gnd ou alimentação de referência), a alimentação positiva de 3V a 5V com corrente contínua e o transmissor de dados. A Figura 4.18 ilustra a forma de conexão deste sensor com o Arduino, utilizando o protocolo ONE-WIRE[®] MAXIM (2008).

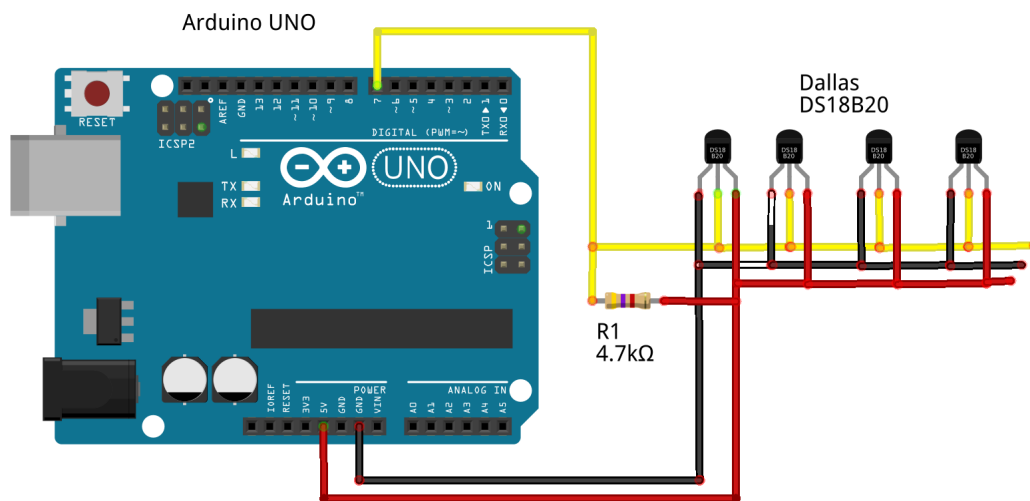


Figura 4.18: Ligação dos sensores de temperatura DS18B20 a placa Arduino UNO.
Fonte: o próprio autor, 2021.

Com a utilização dos sensores de temperatura (DS18B20) e umidade (BME280), foi realizado o balanço de massa entre o ar úmido que entra e o que sai do secador, determinando a quantidade de umidade removida do produto. A determinação da quantidade de umidade removida se dá pelo auxílio do *software* Coolprop, Bell et al. (2014), com uso da biblioteca CoolProp.HumidAirProp e das equações relacionadas ao comando HAPropsSI. Este conjunto de equações foi integrada ao *software* GNU Octave, que é uma ferramenta de cálculo numérico. A seguir é demonstrado o comando usado para obter a umidade absoluta e a entalpia do ar úmido no *software* GNU Octave:

```

for i=1:length(horas_str) %i=numero da amostra
    Win(i)=CoolProp.HAPropsSI('W', 'T', Tind(i)+273.15, 'P', Pin(i), 'R', Rin(i)
        /100);
    hin(i)=CoolProp.HAPropsSI('H', 'T', Tind(i)+273.15, 'P', Pin(i), 'R', Rin(i)
        /100);
    Wout(i)=CoolProp.HAPropsSI('W', 'T', Tout(i)+273.15, 'P', Pout(i), 'R', Rout
        (i)/100);
    hout(i)=CoolProp.HAPropsSI('H', 'T', Tout(i)+273.15, 'P', Pout(i), 'R', Rout
        (i)/100);
end

% W = Umidade absoluta fornecida e armazenada em Win e Wout,
% T = temperatura (K) da amostra que foi armazenada em Tind(i) e Tout(i),
% P = Pressao Absoluta da amostra que foi armazenada em Pind(i) e Pout(i),
% R = Umidade relativa que foi armazenada em Rind(i) e Rout(i),
% H = Entalpia fornecida e armazenada em hin(i) e hout(i).

```

O código completo da programação usada no *software* GNU Octave para fazer o tratamento matemático dos dados obtidos, está apresentado no Apêndice B.

4.5 Radiômetro

O radiômetro utilizado foi elaborado em estudos anteriores no laboratório de pesquisa em Termodinâmica, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru (UNESP-FEB).

Os trabalhos precursores foram Avallone, Mioralli, Scalon et al. (2018) e Pansanato et al. (2018) e mais recentemente verificado o seu funcionamento, calibrado com base em outros dois radiômetros comerciais e utilizado em seu trabalho por Rafael Paiva Garcia (2019). A curva de calibração do anemômetro é apresentada no Apêndice E.

O radiômetro utilizado contém 2 sensores de temperatura DS18B20, com um deles arranjado de forma a registrar a temperatura ambiente e o outro está em contato físico com a superfície inferior de uma pequena placa de alumínio na cor preta (20 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura), que tem a sua superfície superior exposta a radiação solar. Para diminuir a perda térmica por convecção do sensor e da placa enegrecida para o meio ambiente, foi instalado um vidro logo acima dela, de 53 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, mantendo uma câmara com ar confinado, o qual se comporta como um isolante térmico (AVALLONE et al. (2021)).

A Figura 4.19 mostra o radiômetro instalado no secador solar.



Figura 4.19: Radiômetro instalado no secador.

4.6 Processador e registrador de dados

Nos capítulos anteriores foram apresentados os sensores e suas características principais, porém a forma de conectá-los ao processador e registrador de dados não foi informada, pois o intuito é resumir essas informações neste capítulo para facilitar a compreensão.

No entanto, previamente à interpretação das conexões dos sensores, será abordado a confecção do processador e registrador de dados (*datalogger*), composto pelo Arduino UNO, dispositivo com a vantagem de ser de baixo custo, ser amplamente comercializado, ter ampla quantidade de bibliotecas disponíveis, ter diversos dispositivos compatíveis que possam ser integrados a ele, ser compatível com a linguagem de programação C++, que é amplamente utilizada pelos programadores, devido a sua facilidade de escrita e ter estabilidade no processamento, evitando com isso travamento do sistema ou atraso no processamento dos dados.

As características técnicas do dispositivo UNO são apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Ficha técnica da placa Arduino UNO.

Dados	Valores
Microcontrolador	ATmega328P
Tensão de operação	5V
Tensão de entrada Recomendada	7-12V
Tensão de entrada Máxima	20V
Pinos I/O Digitais	14 (onde 6 são saídas PWM)
Pinos Digitais I/O PWM	6
Pinos entrada Analógicos	6
Corrente DC por Pino I/O	20 mA
Corrente DC para Pino 3.3V	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) 0.5 KB para bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
<i>Clock Speed</i>	16 MHz
Altura	68.6 mm
Comprimento	53.4 mm
Peso	25 g

Para a confecção do módulo de aquisição de dados que atendesse os requisitos desse trabalho, foram necessários acoplar alguns dispositivos, sendo eles:

- Módulo RTC DS1302 que fornece e mantém atualizado, mesmo sem o fornecimento de energia no arduino UNO, a data e hora que são vinculadas aos dados coletados;
- Módulo de leitura e escrita dos dados no cartão SD;
- Módulo HX711 amplificador e conversor de sinais analógico para digital, usado para amplificar o sinal recebido pela célula de carga da balança e enviar para o arduino;
- Borne e pinos extras para facilitar a conexão e evitar mau contato;
- Resistores necessários para a perfeita comunicação entre o arduino e os dispositivos, desempenhando a função PullUp e PullDown.

O arranjo físico e a ligação elétrica desses dispositivos com o arduino seguiu o modelo elaborado por Predolin (2017) com a adaptação de pinos extras e bornes de alimentação para os sensores e dispositivos utilizados neste trabalho, conforme mostrado na Figura 4.20. A conexão do módulo com o secador solar se dá por conectores, tipicamente usado no setor automobilístico, por ser robusto fisicamente e ter uma grande área de contato se comparado a outros conectores tipicamente utilizados em eletrônica, além de ter a opção de ser montado com 1, 2, 3 e 4 vias, evitando conectar erroneamente os sensores ao módulo.

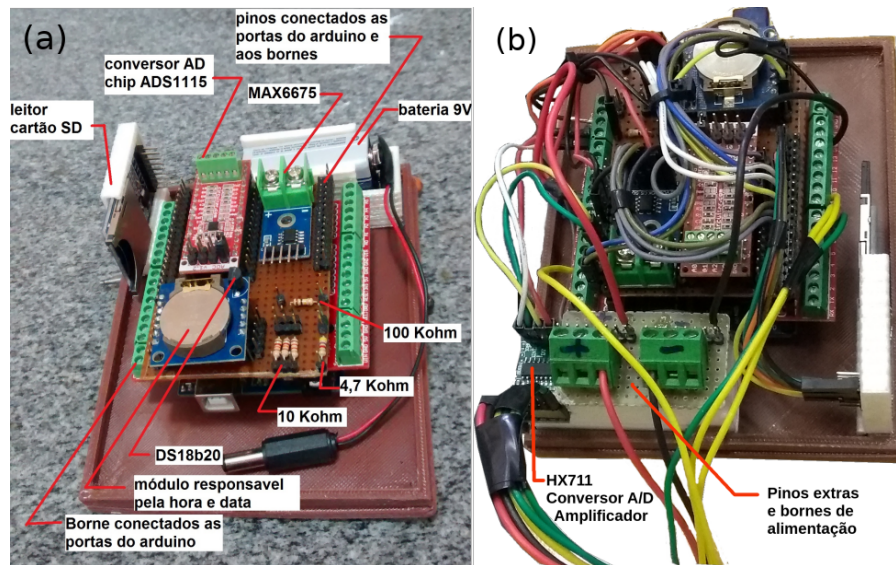


Figura 4.20: Módulo de coletas de dados.

a) Elaborado por Predolin (2017). b) Adaptado ao projeto deste trabalho.

4.6.1 Conexão dos sensores e dispositivos no Arduino Uno

Os dispositivos e sensores podem ser conectados ao arduino através das portas:

- Analógicas: fazem a leitura da voltagem de 0 a 5 V sobre a porta e retorna um valor equivalente a essa voltagem que é de 0 a 1023,
- Digitais: fazem a comunicação através de códigos binários com nível lógico baixo de 0 V e nível lógico alto de 5 V. Para a interpretação dos dados binários recebidos torna-se necessário o uso de um programa específico identificado como biblioteca, que geralmente é fornecida pelo fabricante do equipamento, mas também pode ser elaborada, desde que conhecido o protocolo de comunicação adotado pelo dispositivo.

Algumas das portas digitais da placa arduino UNO são dotadas de funções especiais, como as portas 0 e 1, que tem a função identificada como TX (transmissor) e RX (receptor), responsável pela comunicação do arduino com outra máquina, que geralmente é um computador ou outro arduino. Outras portas desse grupo que tem outras funções são as portas 3, 5, 6, 9, 10 e 11 que podem fornecer um sinal de saída PWM (*Pulse Width Modulation*), muito usado no controle de velocidade de motores DC através da geração de onda quadrada. As portas 2 e 3 acumulam mais uma função, que é a interrupção, isto é, quando ocorre alguma alteração de voltagem sobre essas portas (nível alto para o baixo ou vice-versa) uma tarefa específica definida pelo programador é executada, essa característica é bastante usada nos sensores de vazão, de rotação, de velocidade, anemômetro, etc, (PREDOLIN, 2017).

Sobre os protocolos de comunicação, pode-se dizer que são responsáveis pelo transporte de informações entre dispositivos, estabelecendo regras e convenções que regem o funcionamento

de diferentes comunicações. Por serem utilizados em muitas áreas, diversos protocolos foram desenvolvidos ao longo dos anos para atender diferentes aplicações, (RoboCore (2020)). Alguns exemplos são os protocolos I²C, UART e SPI, a diferença entre elas é o número de conectores necessários, se a informação é transmitida de forma paralela ou serial e a velocidade de transmissão. A Tabela 4.5 apresenta os principais protocolos de comunicação e suas características.

Tabela 4.5: Principais protocolos de comunicação usado entre dispositivos e o arduino.
Fonte RoboCore (2020).

Protocolo	Taxa de comunicação (bps)	Sentido de Transmissão	Método	Nº Fios	Tensão (V)	quantidade de dispositivos
UART	1200 a 115200	FullDuplex	Assíncrono	2	0 a 5	1
SPI	0 a 10M	FullDuplex	Síncrono	3+(1) para cada slave	0 a 5V	não há
I²C	100k ou 400k a 115200	HalfDuplex	Síncrono	2	0 a 5V	127 ou 1024
RS 232	1200	FullDuplex	Síncrono ou Assíncrono	2	-25 a +25	1
onewire	0 a 16,3k ou 0 a 142k	HalfDuplex	Assíncrono	1	2,8 a 6,0	2 ⁵⁶
USB	1,5M a 4,8G	HalfDuplex(2.0) ou FullDuplex(3.0)	Assíncrono	2	0 a 20	127

Neste trabalho foi adotado o uso dos seguintes meios de comunicação:

- Protocolo USB entre o computador e o módulo;
- Protocolo I²C para o dispositivo RTC DS1302(responsável em manter o calendário atualizado) e para o sensor de umidade e pressão BME280;
- Protocolo SPI para o leitor e escrita do cartão de memória SD;
- Protocolo ONEWIRE para os sensores de temperatura DS18B20;
- Portas analógicas para o módulo HX711 (responsável em enviar os dados da célula de carga) e para o anemômetro;

A Tabela 4.6 apresenta as portas do módulo de coleta de dados usadas para conectar os sensores e os dispositivos, assim como o protocolo usado. A Figura 4.21 representa a ligação dos dispositivos e sensores para a montagem do módulo de coleta de dados.

Tabela 4.6: Portas do módulo de coleta de dados.
Fonte: autor (2021).

Porta	tipo	dispositivo	protocolo -função
A0	analógica	balança HX711	Serial-clock
A1	analógica	balança HX711	Serial -data out
A2	analógica	anemômetro	interrupção
A3	analógica	disponível	
A4 A5	analógica	disp. calendário	I ² C -DQ -clock
13 12 11 10	digital	sensor umidade leitor SD	SPI -clock -MISO -MOSI -CS
9	digital	disponível	
8	digital	disponível	
7	digital	sensor temperatura	ONEWIRE
6	digital	disponível	
5	digital	disponível	
4	digital	disponível	
3	digital	disponível	interrupção
2	digital	disponível	interrupção
1	digital	USB	UART para USB
0	digital	USB	UART para USB

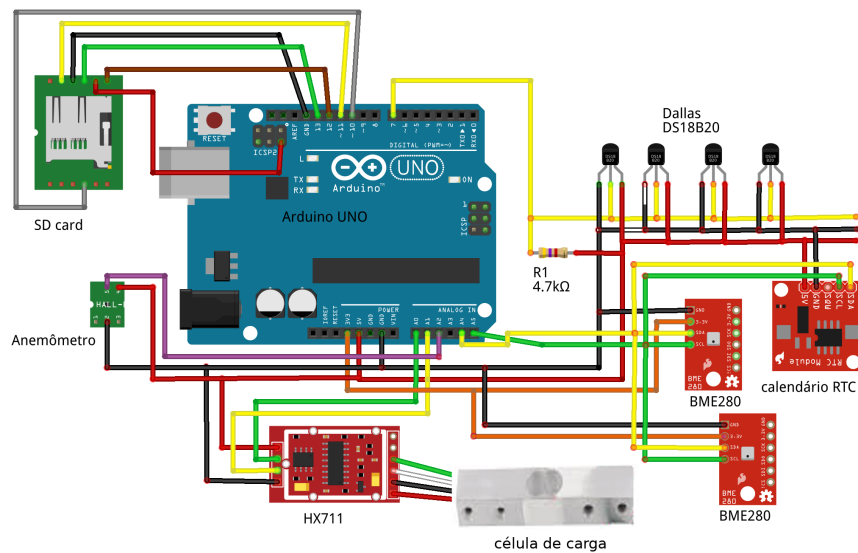


Figura 4.21: Diagrama elétrico do módulo de coletas de dados.
Fonte: Autor (2021).

4.7 Construção da bancada de ensaio

A estrutura do secador é composta por cantoneiras metálicas soldadas, dispostas conforme indicação Figura 4.2. O isolamento térmico do equipamento com o meio ambiente é composto por placas de poliestireno de 30 mm de espessura. Para essas placas não serem deterioradas pelos raios solares UV, foi utilizado sobre elas uma camada de tinta látex.

A instrumentação do equipamento era composta por diversos sensores instalados em 6 regiões no secador, as quais são identificadas na Figura 4.22. Para evitar mau contatos e interferências eletromagnéticas, os sensores foram soldados em conectores de alta qualidade, garantindo precisão nas conexões e os condutores elétricos utilizados têm seção de 0,52 mm² AWG 20, muito acima do mínimo necessário para fornecimento de energia.

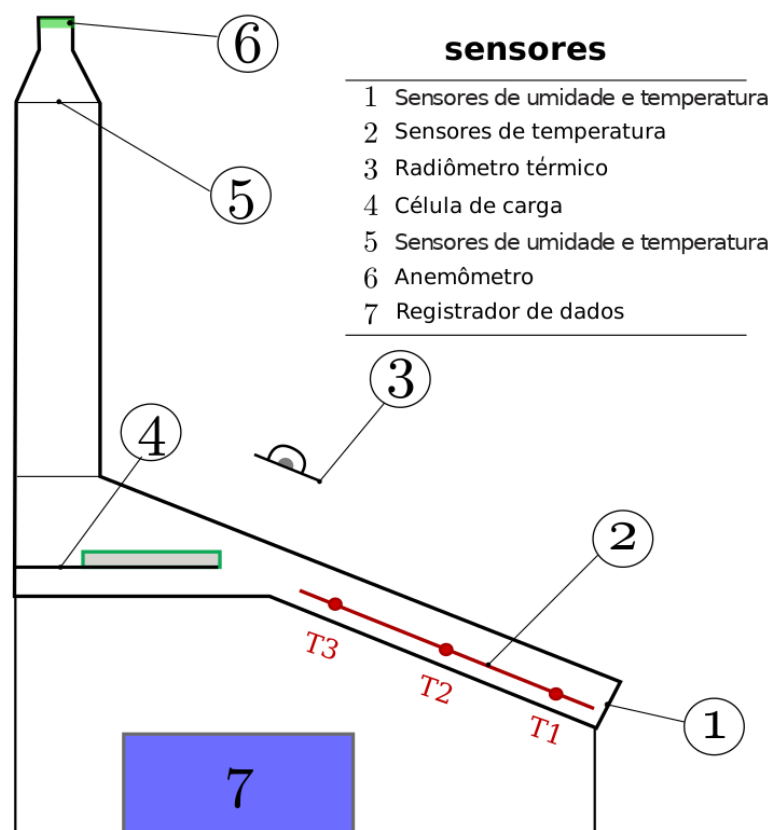


Figura 4.22: Diagrama com indicação da posição dos sensores.

Fonte: Autor (2021).

4.7.1 Sensor de umidade, pressão atmosférica e temperatura

A localização dos sensores responsáveis pelos dados do ar ambiente que flui para o secador está identificado na Figura 4.22 com o número ① e o detalhamento da instalação é mostrada pela Figura 4.23, onde está em destaque o conector dedicado ao sensor de temperatura. Nessa região há a possibilidade de se manter 3 sensores: o sensor de umidade e temperatura DHT22, o sensor de umidade, temperatura e pressão atmosférica BME280 e o sensor somente de temperatura DS18B20.

Os testes com o sensor de umidade DHT22 em ambiente aberto não foram satisfatórios, pois quando a umidade relativa do ar atingiu valores acima de 90% (períodos de chuva e orvalho no amanhecer), o seu elemento sensor ficou saturado, registrando dados com valores alterados, acima do valor real. Por este motivo esse sensor de umidade foi substituído pelo sensor BME280 (fabricante: Bosch sensors), que possui maior qualidade e tem o diferencial de não se saturar em ambientes de elevada umidade, além de fornecer mais 2 dados: a pressão atmosférica e a temperatura do ar. Com relação a temperatura do ar, optou-se em adotar o sensor dedicado a isso, o DS18B20, pois os seus dados refletem com maior fidelidade os valores reais e ao usá-los no cálculo da umidade absoluta, os valores obtidos foram mais satisfatórios do que o cálculo realizado com a temperatura fornecida por outros sensores.

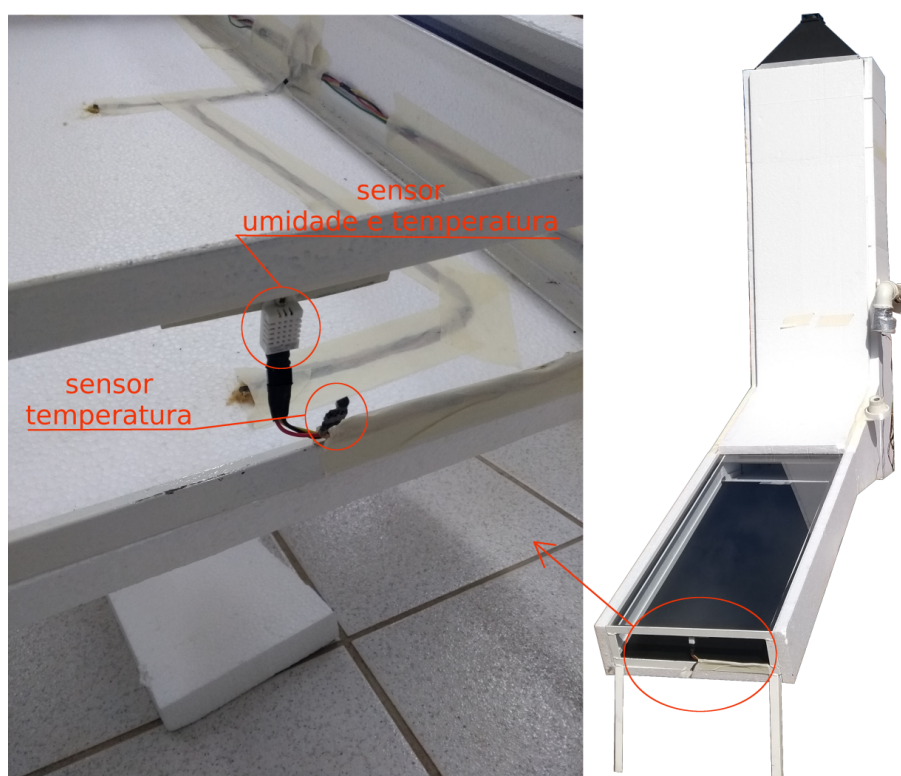


Figura 4.23: Sensores na região 1 do secador.

4.7.2 Placa absorvedora

A placa absorvedora é constituída de uma chapa de aço 1020 de 2 mm de espessura, largura de 500 mm e comprimento 1000 mm, recoberta com tinta da marca *SUMATERM*®, com absorvidividade de 95%. Na região inferior da placa, ou seja, não exposta ao sol, foram instalados 3 sensores de temperatura, conforme Figura 4.24, para analisar a distribuição de temperaturas na superfície da placa durante a ação solar diária. A referida placa absorvedora foi instalada no interior do secador, identificada com o número ②, conforme Figura 4.22.

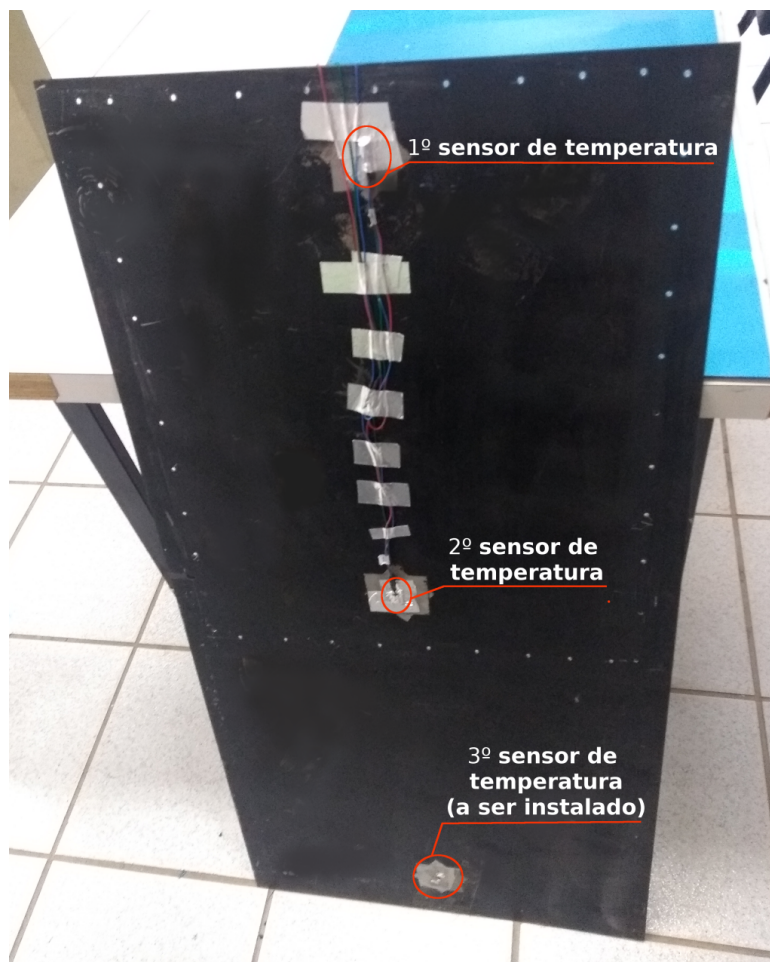


Figura 4.24: Sensores na região 2: Placa absorvedora, face não exposta.

Durante os testes do secador, após analisar a placa absorvedora com as configurações 1 e 2, foi instalado um reservatório térmico na região onde a temperatura é superior a 60 °C, ou seja, da metade do seu comprimento até a borda superior. O referido reservatório tem dimensões de 42 cm de largura, 2 cm de espessura e comprimento de 60 cm. Sua capacidade é de 3,5 kg de parafina, com características térmicas indicadas na Tabela 4.7. Para compensar a baixa condutividade térmica da parafina e melhorar o desempenho do reservatório, foram introduzidos tiras de alumínio em formato espiral, conforme sugerido por Reyes, Negrete et al. (2014). Os

detalhes do reservatório térmico são apresentados na Figura 4.25.

Tabela 4.7: Dados técnicos da parafina. Fonte QUIMIDROL

Propriedades	valor(sólido)	valor(líquido)
Temperatura de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	59 - 62,8	
Calor Latente (kJ/kg)	200 - 220	
Condutividade térmica ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)	0,4	0,15
Densidade (kg/m^3)	0,9	0,7

Os sensores de temperatura não são apropriados para operação em ambientes líquidos e como dois dos três sensores de temperatura sob a placa absorvedora irão operar imerso na parafina (sensores 1 $^{\circ}$ e 2 $^{\circ}$ da Figura 4.24), foi necessário fazer o encapsulamento deles, sendo elaborado por tubo de cobre preenchido com pasta térmica e selado nas extremidades com cobre e estanho, conforme indicado na Figura 4.26.

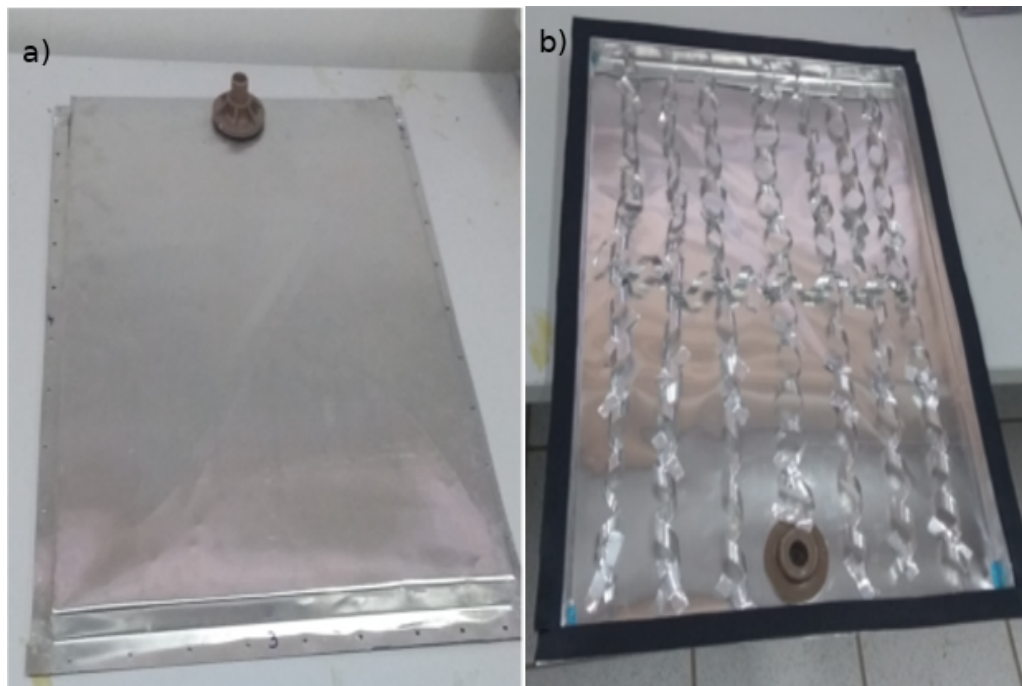


Figura 4.25: Reservatório térmico: a)Face externa. b)Detalhe interno.

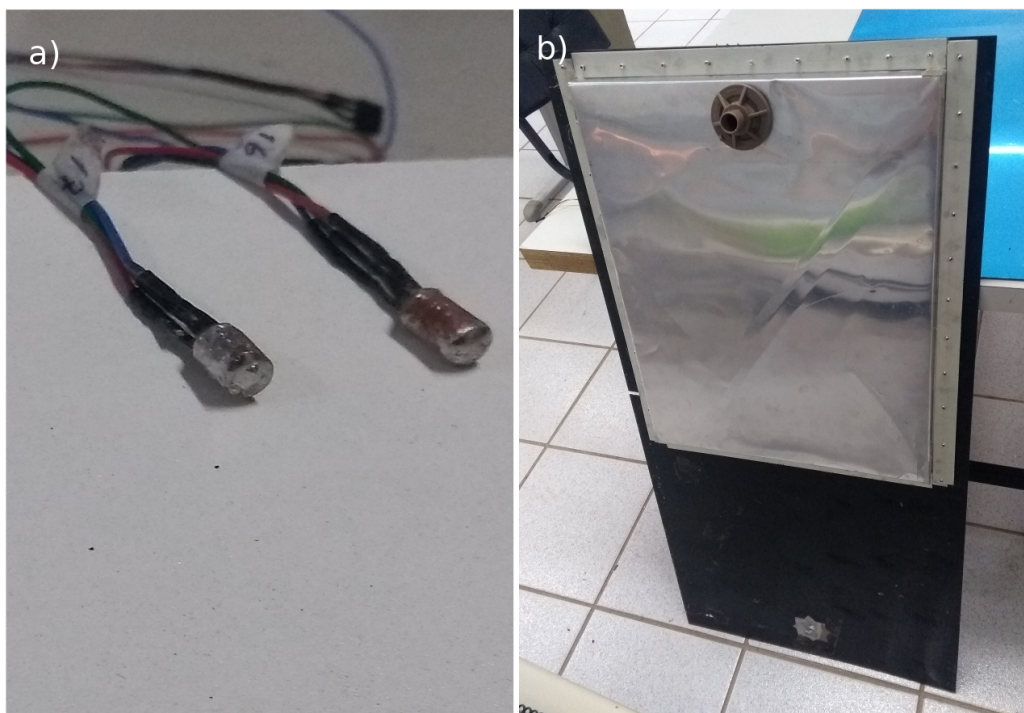


Figura 4.26: Reservatório térmico: a)Sensor de temperatura selado. b)Reservatório instalado.

4.7.3 Sensor de radiação

A Figura 4.22 número ③, indica a região onde o sensor de radiação está instalado, mais precisamente ao lado do secador e ao nível do vidro que cobre a placa absorvedora, conforme visualizado na Figura 4.27. Na lateral superior do secador solar há o complemento deste sensor, o qual registra a temperatura ambiente e tem a circulação do ar imposta por um ventilador *cooler*, garantindo assim que a temperatura registrada seja a ambiente.

4.7.4 Célula de carga

A balança, utilizando a célula de carga, foi instalada no fluxo de saída do ar aquecido pela placa absorvedora e sobre a referida balança, foi instalada uma bandeja contendo a água utilizada nos ensaios, fixando assim a área úmida exposta, apresentada na Figura 4.28.

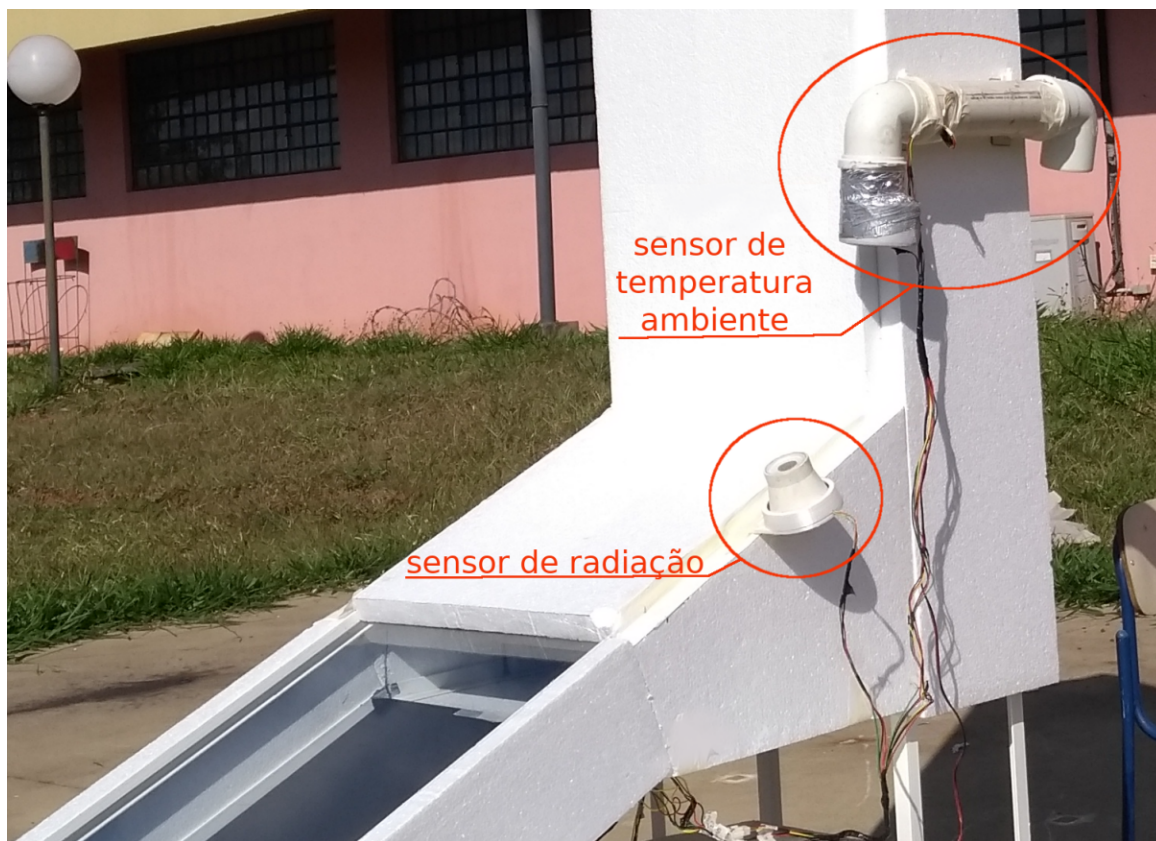


Figura 4.27: Sensor de radiação destacando a parte que sofre aquecimento e a parte que registra a temperatura ambiente. Fonte: Autor (2021).

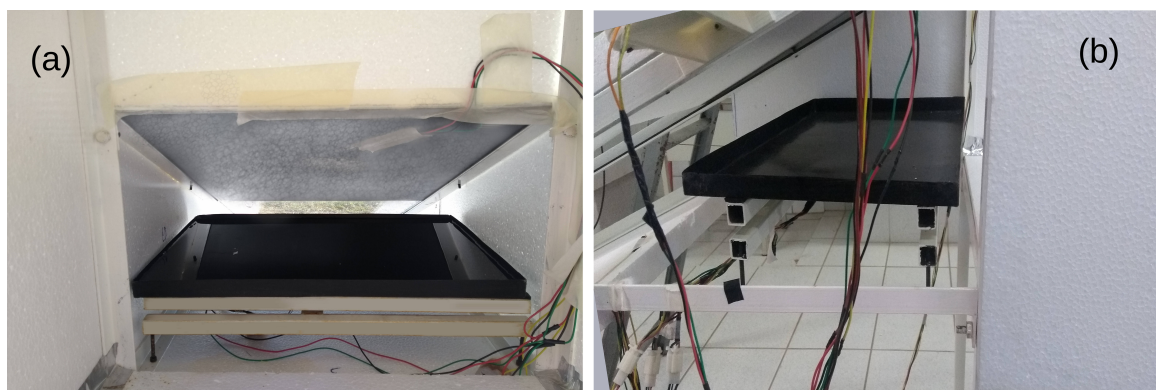


Figura 4.28: Balança: a) Em operação, vista traseira. b) Fase de instalação, vista lateral. Fonte: Autor (2021).

4.7.5 Sensores na saída do ar aquecido

Na região de número 5, superior do duto de saída do ar aquecido, foram instalados sensores de temperatura, umidade relativa e pressão, apresentados na Figura 4.22 e na região 6, o anemômetro foi instalado. O conjunto montado é apresentado na Figura 4.29.



Figura 4.29: Sensores da região 5 e 6, duto de saída do ar aquecido. Vista do interior, sentido do fluxo de ar saindo da câmara de secagem para a saída do equipamento. Fonte: Autor (2021).

4.7.6 Módulo de coleta de dados

Para evitar aquecimento, umidade excessiva, interferências eletromagnéticas e temperatura elevada, o módulo de coleta de dados foi instalado em um receptáculo de proteção em chapa de aço galvanizada, recoberta externamente por manta térmica aluminizada de polietileno expandido (5 mm de espessura), provida de um sistema de ventilação, igualando as temperaturas interna e externa e evitando assim as intempéries. O referido módulo de coleta de dados foi instalado abaixo do secador, conforme apresentado pela Figura 4.30, sendo este local de maior sombreamento no período de maior incidência solar.

4.8 Localização e orientação do secador solar

O experimento foi conduzido nos laboratórios da faculdade de engenharia da UNESP, nas coordenadas geográficas 22,35° sul e 49,03° oeste, conforme apresentado pela Figura 4.31. Seguindo a recomendação dos autores Duffie e Beckman (2009) e Kalogirou (2013), a placa absorvedora foi direcionada para o norte magnético e livre de árvores ou construções que gerariam o fator de sombra, prejudicando significativamente o desempenho do equipamento.

O secador com todos os componentes anteriormente citado, instalado e em operação na localização informada pode ser visto na Figura 4.32.

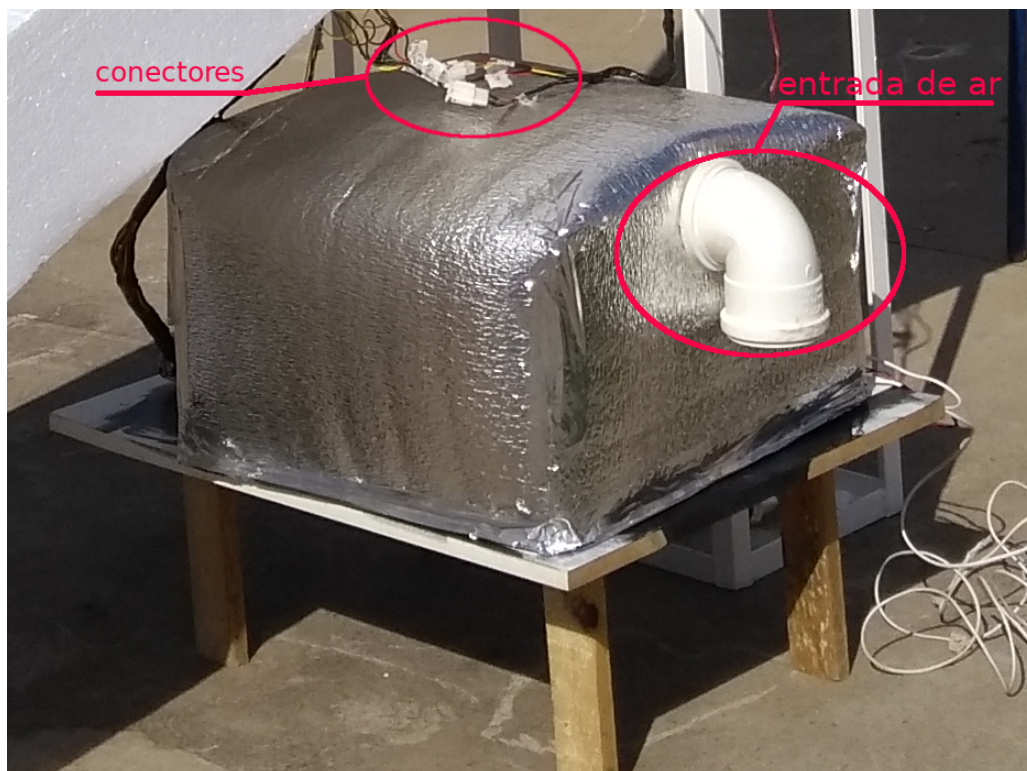


Figura 4.30: Proteção do módulo de coleta de dados das intempéries.
Fonte: Autor (2021).



Figura 4.31: Imagem de satélite com a latitude e longitude do local do experimento.
Fonte: Google Maps, acessado em junho de 2021.

4.9 Metodologia dos ensaios

O objetivo deste trabalho é avaliar o secador solar em condições de uso com alterações na placa absorvedora. Para a análise, foi necessário dedicar 6 meses para avaliação e instalação dos sensores, o que inclui a programação do módulo de dados de forma a integrar os sensores



Figura 4.32: Secador solar em operação.

sem ocorrer conflitos entre eles.

A lógica de operação do algoritmo implementado no módulo de coleta de dados é apresentado através do fluxograma da Figura 4.33 e apresentado de forma completa no APÊNDICE A.

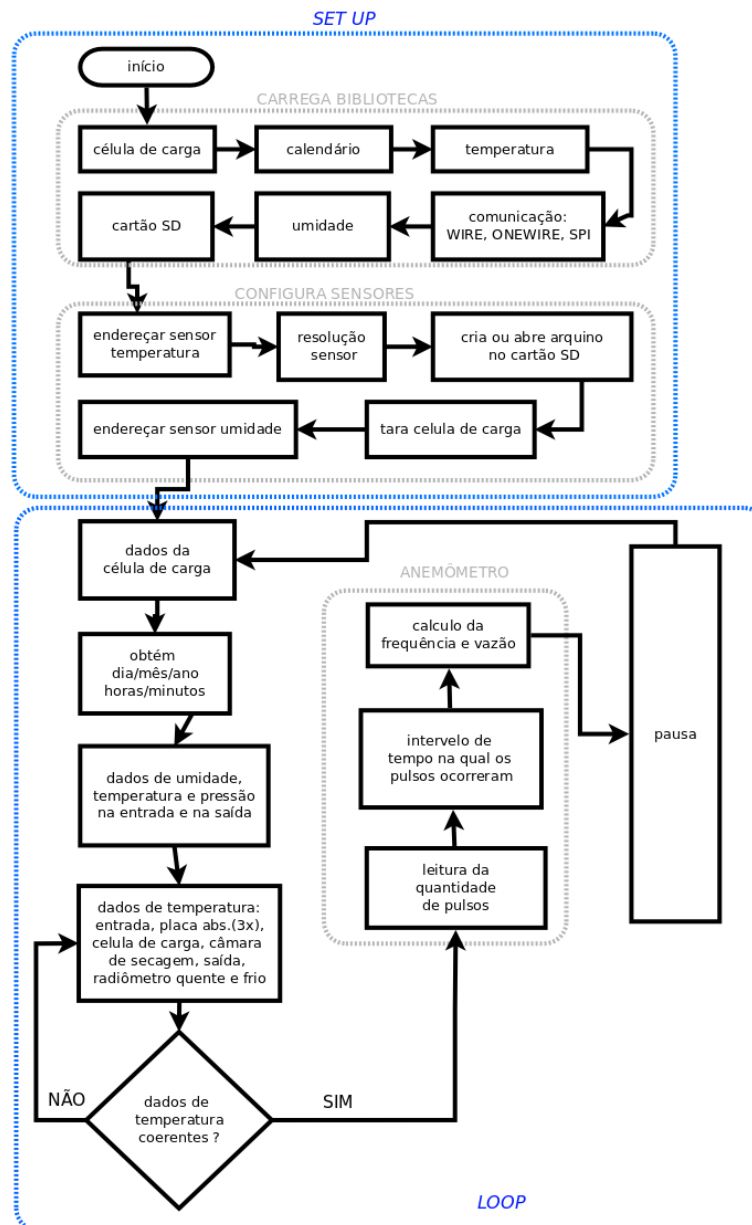


Figura 4.33: Fluxograma do algoritmo implementado no módulo de coleta de dados.

A avaliação do secador foi realizada com algumas configurações, sendo elas:

1. Análise com a placa absorvedora isolada na face inferior (face não exposta a radiação solar incidente) e com circulação de ar somente sobre a face superior.
2. Análise da placa absorvedora com fluxo de ar nas duas superfícies, a exposta e a não exposta à radiação solar incidente. Nesta configuração a placa absorvedora foi elevada em 50 mm, permitindo a passagem de ar pela superfície inferior.
3. Análise da placa absorvedora na posição e condições do item anterior (item 2) com a adição do reservatório térmico composto pelo material de mudança de fase (parafina);

Para que o experimento seja confiável, é necessário verificar o funcionamento dos sensores e analisar a eficácia da calibração. Operando o equipamento "em vazio", ou seja, sem a remoção de umidade na câmara de secagem, mantendo a mesma quantidade de massa úmida de entrada e de saída, é verificado se o balanço de massa é satisfeito, indicando que todos os sensores estão em operação ideal, pois o cálculo da quantidade de massa de água de entrada e saída depende dos referidos sensores de entrada e saída: umidade, temperatura, pressão atmosférica e vazão mássica.

A segunda verificação se refere a célula de carga, que obtém a massa de água que está sendo removida. O procedimento ocorre com a adição de uma massa padrão sobre a célula de carga, a qual deve informar de forma constante, o valor desta massa durante os testes.

A quantidade de umidade removida pelo secador foi avaliada por 2 métodos, sendo que o primeiro faz uso da balança, registrando os dados em intervalos de 15 minutos.

O segundo método utiliza a temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa na entrada e na saída do secador, determinando a umidade absoluta com o auxílio das bibliotecas *Coolprop*, integradas ao software *Octave*® que, associada a vazão mássica de ar, obtém-se a quantidade de umidade removida no intervalo de tempo analisado.

Durante a coleta de dados, a programação do módulo de aquisição verifica se os valores dos sensores de temperatura estão corretos, isto é, com temperatura entre 0 e 110 °C. Caso os valores estejam incoerentes, uma nova coleta de dados é realizada, antes de registra o aviso de erro.

4.10 Eficiência térmica

A eficiência térmica pode ser definida como a relação entre da energia pretendida e a energia fornecida (SHAPIRO, 2013). Neste trabalho, a energia fornecida se refere à incidente na placa absorvedora (G_t), (KALOGIROU, 2013), e a energia útil (Q_u) como a disponibilizada pelo secador.

$$\eta = Q_u / A_c \cdot G_t \quad (4.1)$$

onde η : eficiência térmica;

Q_u : energia útil;

A_c : área da placa absorvedora;

G_t : energia incidente.

A energia útil é obtida pela diferença entre a entalpia do ar úmido de entrada (h_{in}) e a entalpia do ar úmido de saída do secador (h_{out}):

$$Q_u = (h_{out} - h_{in}) \cdot \dot{m} \quad (4.2)$$

onde $\dot{m}$ é a massa de ar úmido que circula no equipamento e pode ser calculada pela Equação 4.3:

$$\dot{m} = \rho \cdot U_{air} \cdot A_a \quad (4.3)$$

onde ρ : densidade do ar úmido aquecido;
 U_{air} : velocidade média do ar úmido aquecido na saída do secador;
 A_a : área do anemômetro tipo turbina;

A entalpia citada na Equação 4.2 é calculada com o uso dos dados fornecidos pelos sensores de umidade, temperatura e pressão atmosférica e auxílio do software Coolprop, Bell et al. (2014), o qual usa a biblioteca HAPropSI, baseada nas equações propostas por Herrmann, Gatley e Kretzschmar (2009).

A análise do secador se baseia na instrumentação nele instalada, a qual está sujeita a incertezas nas medições realizadas. Ao usar esses valores no cálculo de outras grandezas, as incertezas são propagadas e podem ser avaliadas pelo critério de incerteza provável com o valor do RMS (Root Mean Square) dos valores obtidos. As incertezas relacionadas ao equipamento e instrumentação são apresentada no Apêndice D.

4.11 Análise numérica

A análise numérica foi elaborada neste trabalho com o intuito de analisar o comportamento térmico do secador e comparar os dados simulados com os experimentais. As equações que regem o modelo foram resolvidas com o software OpenFOAM[®], sendo que o modelo em estudo na simulação está em três dimensões (3D) e tem as mesmas características, formatos e dimensões do equipamento utilizado no experimento.

As simulações foram realizadas em regime estacionário com a placa absorvedora na configuração 1 e 2, usando como condições iniciais os dados experimentais obtidos às 13h do dia de ensaio.

Para a geração do domínio computacional foi usado um conjunto de arquivos de extensão .STL, representando as superfícies reais do equipamento experimental. Através desses arquivos foi possível separar as regiões de interesse e as regiões de controle, sendo elas: a região que representa a placa absorvedora, o vidro que isola o equipamento do meio externo e permite a passagem da radiação solar, a bandeja e a superfície d'água, a superfície de entrada e saída de ar que foram utilizadas para a obtenção do valor do fluxo e da temperatura do ar que atravessa essas superfícies. A Figura 4.34 ilustra o equipamento e as superfícies formadas pelos arquivos de extensão STL.

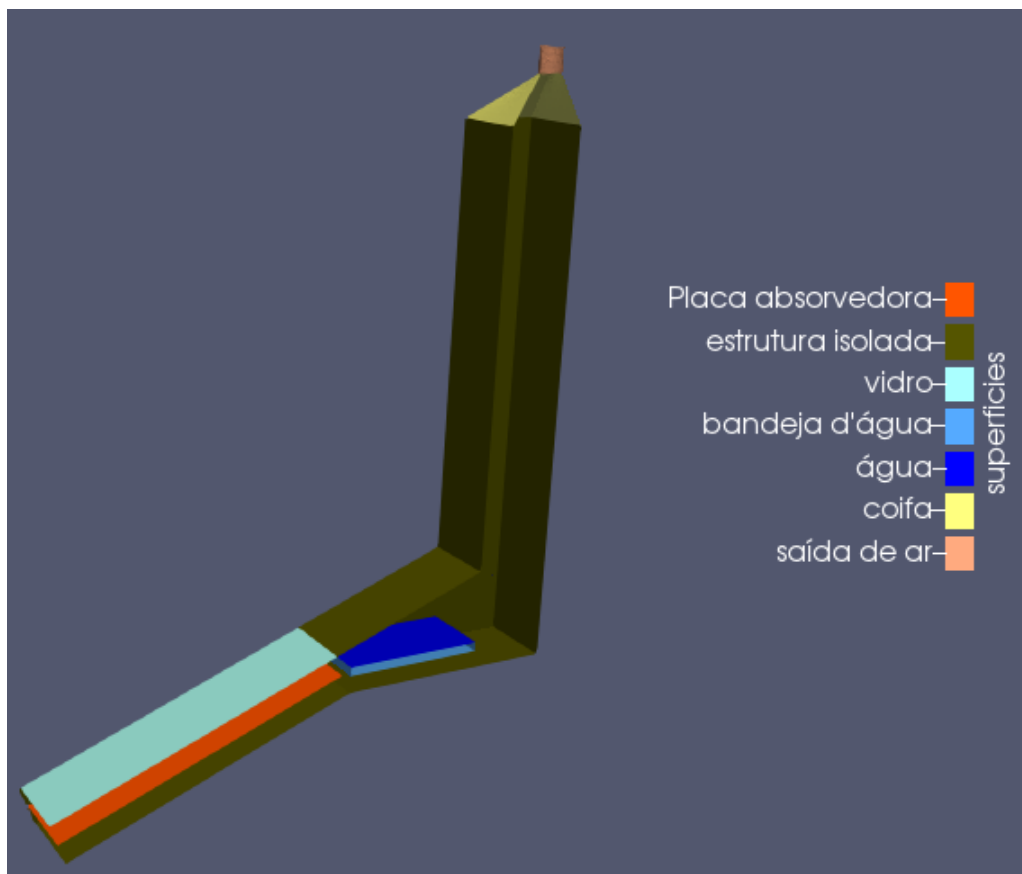


Figura 4.34: Superfícies formadas pelos arquivos STL.

Para a geração da malha 3D do domínio de ar na simulação, foi usado o recurso nativo do software, identificado como *blockMesh*. A razão de aspecto da malha foi mantida uniforme de razão 1 e a quantidade de elementos é de 10080. Para o refinamento da malha e o uso das superfícies de extensão .STL foi realizado através do recurso *snappyHexMesh*, com refinamento da malha ao redor das superfícies, pela adição de 4 camadas, conforme apresentada pela Figura 4.35, que representa a seção em corte no plano XY do secador e as células presente neste plano.

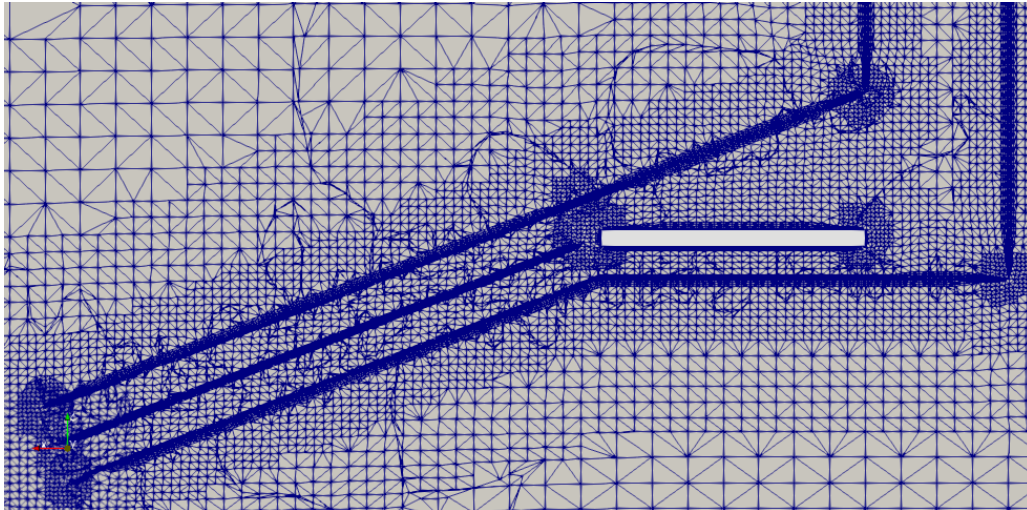


Figura 4.35: Representação da malha do modelo na seção central do secador, plano XY.

O refinamento da malha nas faces externas do secador pode ser visualizado através da Figura 4.36, onde é perceptível o contraste da malha mais ao fundo da fronteira do domínio, criada pelo comando *blockMesh*, e a malha ao redor das superfícies, em destaque a direita, posição inferior, da imagem. O refinamento final resultou em 972747 células, sendo 916743 de geometria hexaédrica e 56004 de geometria poliédrica.

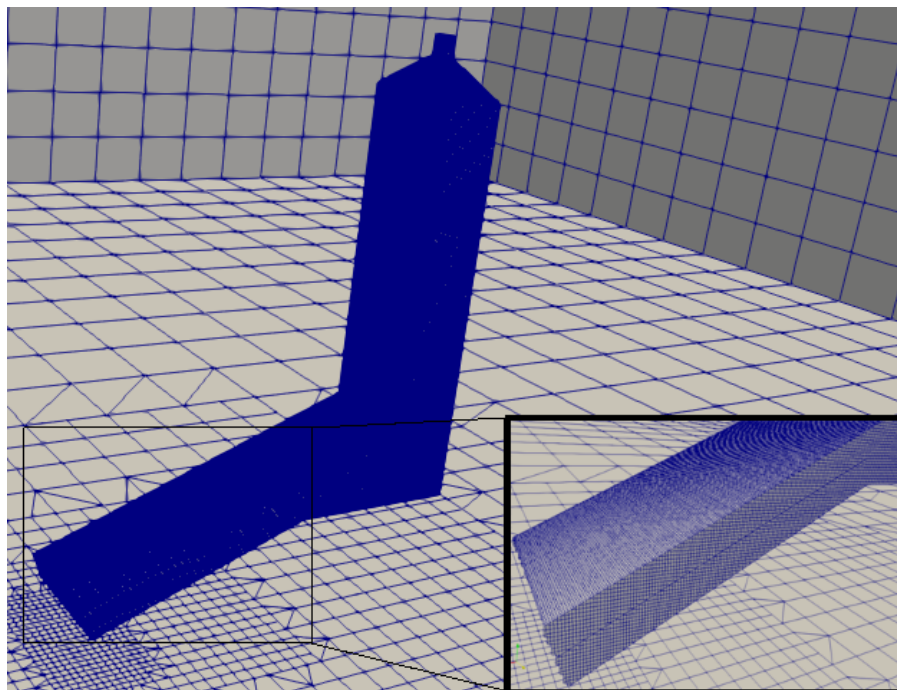


Figura 4.36: Representação da malha do modelo em estudo.

Análises de independência de malha foi realizada usando diferentes números de elementos, variando de $4,85 \cdot 10^4$ a $13,41^5$. A vazão foi selecionada como parâmetro principal na avaliação

da malha gerada, comparando o seu valor experimental com o valor obtido na simulação, conforme apresentado na Figura 4.37. A malha selecionada e que melhor representou o modelo experimental tem 9,73E5 elementos.

Para a análise numérica foi utilizado um *notebook* com processador *Dual core Intel Core i5-3317U* com velocidade de processamento 2600 MHz e 8GB de memória *RAM*. O tempo de processamento médio foi de vinte horas.

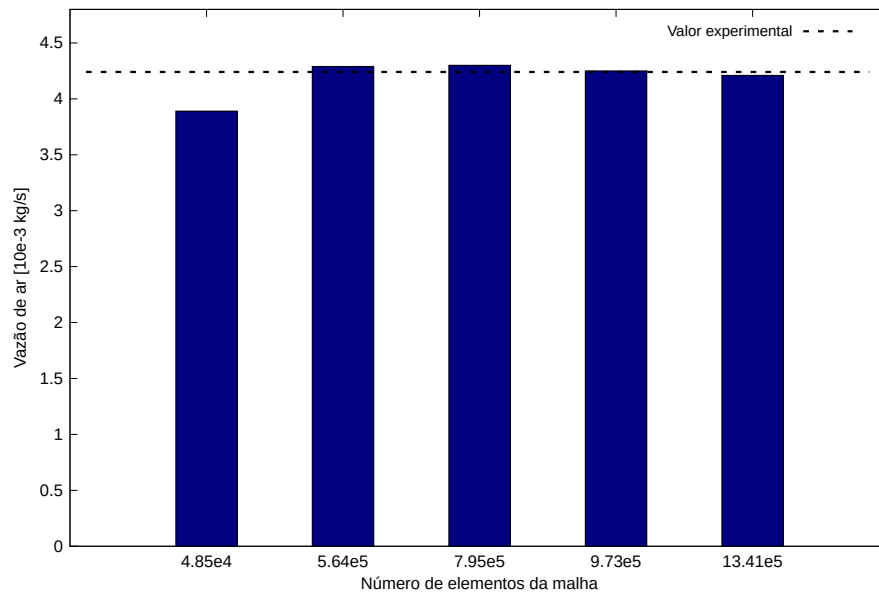


Figura 4.37: Variação da vazão de ar em função do número de elementos da malha.

Neste estudo simulado foi adotado o regime estacionário e o uso do algoritmo SIMPLE, Patankar (1980), sigla para *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*, solver amplamente utilizado para simulações em regime estacionário, acionado através do comando *buoyantSimpleFoam* no software, fazendo o acoplamento da pressão e das velocidades nas equações de conservação. Para o comportamento da turbulência foi adotado o modelo $k - \omega$ SST, o qual lida melhor com regiões próximas as paredes, onde existe a predominância do efeito da camada limite viscosa.

As propriedades termo-físicas fornecidas ao programa, através do arquivo *thermophysicalProperties*, foram tomadas na temperatura de entrada do fluido, conforme os dados obtidos do experimento e as configurações adotadas foram do ar como substância pura (no *software pureMixture* de composição fixa, baseada na densidade (*heRhoThermo*)). Os dados do arquivo *thermophysicalProperties* estão transcrito na Tabela 4.8, os quais são utilizados para a configuração da placa absorvedora com passagem de ar somente pela superfície superior, permitindo melhor compreensão das propriedades termofísicas adotadas.

Tabela 4.8: Transcrição arquivo *thermophysicalProperties* do software OpenFOAM[®].

```
thermoType
{
    type            heRhoThermo;
    mixture          pureMixture;
    transport        const;
    thermo            hConst;
    equationOfState  perfectGas;
    specie            specie;
    energy            sensibleEnthalpy; }
mixture {
    specie
    {
        molWeight      28.96;    }
    thermodynamics
    {
        Cp              1030;
        Hf              0;        }
    transport
    {
        mu              1.831e-05;
        Pr              0.705;    }}}
```

4.11.1 Condições de contorno

A condição de temperatura foi imposta com o valor obtido experimentalmente para a temperatura ambiente, sendo que para a placa absorvedora foi imposta a condição de energia útil, Equação 4.1, acrescida da energia referente a parcela de radiação que é emitida por esta placa e passa através do vidro para o meio externo (Q_{glass}). Um detalhe que deve ser observado é o fato desta simulação não considerar o efeito estufa desenvolvido entre a placa absorvedora e vidro, assim como o efeito da acumulação térmica da placa absorvedora que tem aproximadamente 7,8 kg de massa.

Na superfície que representa a água, também foi imposta a condição de energia referente a parcela transferida para a evaporação, conforme observado no experimento, e para a bandeja que contém a água, a temperatura foi ajustada conforme os valores experimentais, que tem o comportamento de se manter acima da temperatura ambiente e abaixo da temperatura de saída do ar aquecido, no período em que há acensão da radiação solar (período matutino).

Para a superfície que representa o vidro ser considerada transparente pelo *software* e permitir a passagem de radiação emitida pela placa aquecida, a condição de *wallTransmissivityModel* foi ajustada no arquivo *boundaryRadiationProperties* contido na pasta *constant*.

A Tabela 4.9 apresenta as condições de contorno da simulação numérica para a configuração 1 da placa absorvedora. Nesta tabela as superfícies que apresentam configurações iguais foram agrupadas em *external*, *internal*, *case* e *interface*, objetivando a simplificação na visualização e melhor compreensão.

As faces identificadas como *inlet* e *outlet* foram definidas como *cyclic* para não interferir no

Tabela 4.9: Condições de contorno com a placa absorvedora na configuração 1.

Properties	external ^a	internal ^b	case ^c	interface ^d
T [K]	fixedValue 310	externalWallHeat FluxTemperature $Q_{water} = -14W$ $Q_{abs_top} = 50W$ $Q_{abs_bot} = 0W$ T=310 K	zeroGradient	fixedValue 310
U [m/s]	slip	noslip	noslip	noslip
P_{rgh} [kg/m/s ²]	FixedFluxPressure 94205			
P [kg/m/s ²]	calculated 94205			
k [m ² /s]	kqRWallFunction 0.000375			
ν [m ² /s]	nutKWallFunction 0			
ω [1/s]	omegaWallFunction 0.16			
α [kg/m/s]	compressible::alphaWallFunction 0			

^a: surfaces: top, back, front, bottom, left, right.

^b: surfaces: water, absorber_top, absorber_bottom.

^c: surfaces: case, case_slave, topAbsorber, topAbsorber_slave, outletTube, outletTube_slave.

^d: surfaces: glass, glass_slave, plate, coil, coil_slave.

fluxo e na temperatura do ar, sendo utilizadas na obtenção de dados do campo escoamento, como temperatura da mistura e vazão de ar. Foi aplicada a condição de ajuste do gradiente de pressão nas superfícies onde as forças de campo nas equações de Navier-Stokes estão presente. O modelo de radiação adotado na simulação foi o de fator de forma (no *software*, *View Factor*), com os coeficientes *smoothing* e *constantEmissivity* ajustado para o modo *true* no arquivo *viewFactorsDict*. O valor da emissividade, absorvidade e transmissividade das superfícies são informadas no arquivo *boundaryRadiationProperties* no *software* *OpenFoam*. O Apêndice C apresenta os arquivos necessários para realizar a análise numérica. Para a configuração na qual a passagem de ar ocorre pela superfície inferior e superior da placa absorvedora (configuração 2), as condições iniciais são semelhantes, com alteração nos seguintes itens:

- Temperatura ambiente (domínio e superfícies externas ao secador): 311 K;
- Pressão atmosférica (domínio e superfícies externas ao secador): 94264 Pa;
- Energia da placa absorvedora (face superior): 81 W;
- Energia na face *water* (superfície d'água na bandeja): -17,1 W.

Capítulo 5

Resultados

Os ensaios no secador solar indireto iniciaram em 30 de agosto de 2019 e foram até 12 setembro de 2019, quando foi analisado o funcionamento do equipamento e da instrumentação, porém se verificou que o sensor de umidade identificado como DHT22, apresentou falhas após períodos de chuvas e orvalho no início do dia. Quando a umidade relativa do ar estava próximo de 100% o sensor se saturava e após a sua regeneração os valores apresentados não replicavam a condição real do ar ambiente. Esses sensores foram substituídos por outros de melhor qualidade e confiabilidade, com reinício das análises do equipamento em 29/10/2019 e término em 28/02/2020.

Os ensaios do equipamento foram realizados para a placa absorvedora na configuração 1 e 2. Os resultados em função da posição da placa absorvedora foram analisados e comparados, tomando como base de tempo um dia de teste. Os dias de testes apresentados neste trabalho foram escolhidos baseado nas condições climáticas, que são semelhantes para ambos os casos, incluindo a radiação solar média diária e a umidade relativa do ar, sendo que para a configuração 1, a radiação solar média foi de 613 W/m^2 e a radiação total diária incidente foi de $15,67 \text{ MJ/m}^2$. Para a configuração 2, a radiação solar média foi de 613 W/m^2 e a radiação total diária incidente foi de $15,84 \text{ MJ/m}^2$.

5.1 Vazão de ar

O primeiro fator a ser analisado com relação a alteração da placa absorvedora da configuração 1 para a 2, foi a vazão mássica de ar, que teve alteração em seu valor de $4,17 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ para $4,4 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$, acréscimo de 5,5%.

Outro fator que se destacou nas análises da vazão de ar foi o seu comportamento ao longo do dia de teste, que se mostrou mais estável na configuração 2, apresentando pequenas oscilações em função da variação da radiação incidente, quando comparado à configuração 1, conforme visualizado na Figura 5.1.

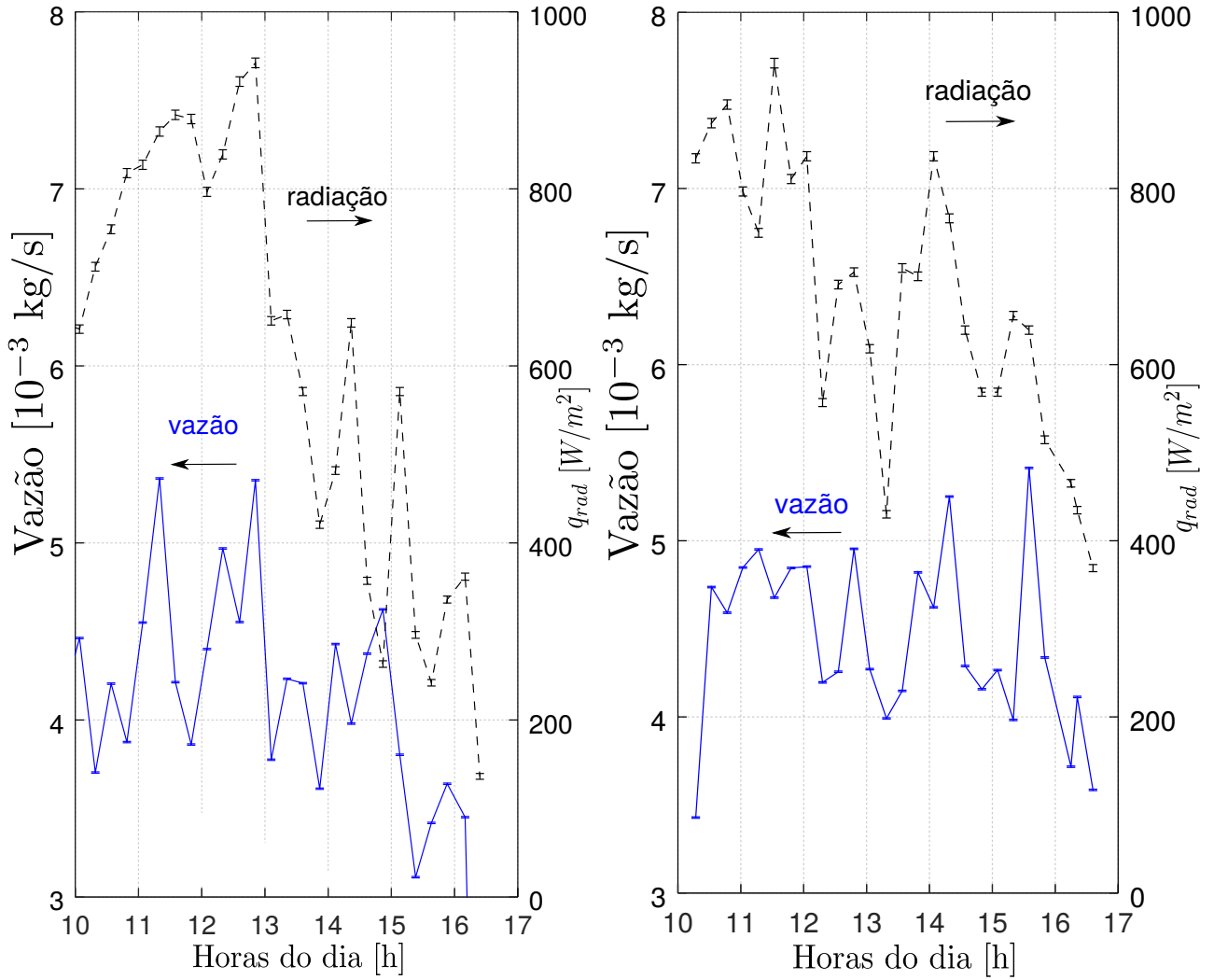


Figura 5.1: Vazão mássica de ar quente no secador indireto.
(a) configuração 1: placa absorvedora na posição inferior, (b) configuração 2: placa absorvedora elevada.

5.2 Temperatura da placa absorvedora

Com os dados coletados pelos três sensores de temperatura posicionados na placa absorvedora, 4.22, foi possível observar o efeito da radiação solar incidente sobre ela, através do aumento de sua temperatura em relação a temperatura ambiente ($T_{abs} - T_{amb}$).

Durante a operação do equipamento em ambas as configurações da placa, observou-se que a região próxima a entrada de ar se manteve mais fria que as demais regiões. Este efeito é devido a entrada do ar ambiente, que se encontra mais frio que o interior do secador, propiciando a troca de calor na placa. A região central e superior da placa absorvedora apresenta altas temperaturas em ambas as configurações, conforme observado na Figura 5.2.

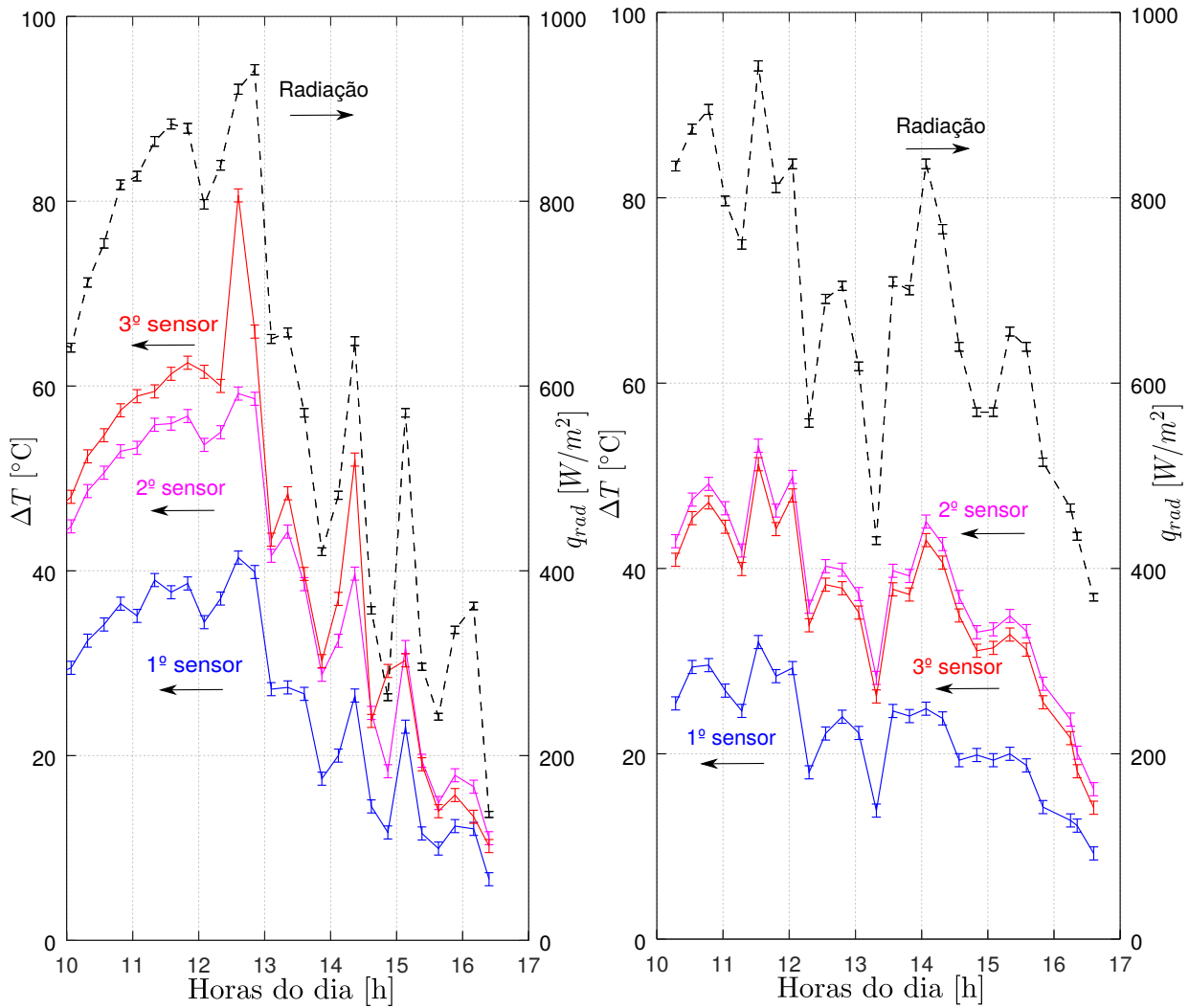


Figura 5.2: Diferença de temperatura entre a placa absorvedora e o ar ambiente. (a) configuração 1, (b) configuração 2. Fonte: autor (2022).

No entanto, para a configuração 2, a temperatura média da placa apresenta valores de 5 $^{\circ}\text{C}$ menor do que os valores de temperatura média da placa na configuração 1 e no ponto inferior,

sensor 1, a temperatura média ao longo do dia se alterou de 58 °C para 53 °C e na região central da placa alterou de 71,5 °C para 67 °C, indicando uma melhora na convecção natural quando a posição da placa absorvedora foi ajustada para a configuração 2.

5.3 Temperatura do ar de saída da chaminé

A elevação da temperatura do ar atmosférico que entra no secador é um dos principais fatores que determinam o desempenho do equipamento. Com o aquecimento do ar, a umidade relativa diminui, propiciando a retirada de umidade do produto que está em contato com o ar. As altas temperaturas favorecerem a retirada de umidade, mas são prejudiciais para alguns alimentos, diminuindo a qualidade do produto final, degradando-o ou cozinhando-o. Em ambas as configurações da placa absorvedora a temperatura máxima do ar obtida foi satisfatória para uma grande variedade de alimentos, isto é, abaixo da temperatura de cozimento (65 °C), (GARCIA, M., 2013). Comparando a elevação da temperatura do ar entre as configurações da placa absorvedora, a configuração 2, como observado na Figura 5.3, propiciou valores mais elevados. Observa-se que além da vantagem da elevação maior da temperatura, a configuração 2 propicia maior estabilidade de temperatura, não sofrendo variação imediatamente após variação da radiação solar incidente. Os dados coletados demonstram que a configuração 2 resultou na elevação média diária da temperatura de 7,3 °C com valor máximo de 11,7 °C. Para a configuração 1 o acréscimo médio diário da temperatura foi de 3 °C, com valor máximo de 4,9 °C.

5.4 Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar na entrada e na saída do secador pode ser mapeada devido a presença dos sensores de umidade, mostrando através dos dados coletados um comportamento distintos para as 2 configurações da placa absorvedora, conforme observado na Figura 5.4. O ar de saída é menos úmido, portanto mais vantajoso, quando adotada a configuração 2, com diferença média diária da umidade relativa do ar de entrada com o ar de saída de 6%. Enquanto que para a placa absorvedora na configuração 1, obteve uma diferença de 3,3% da média diária da umidade relativa.

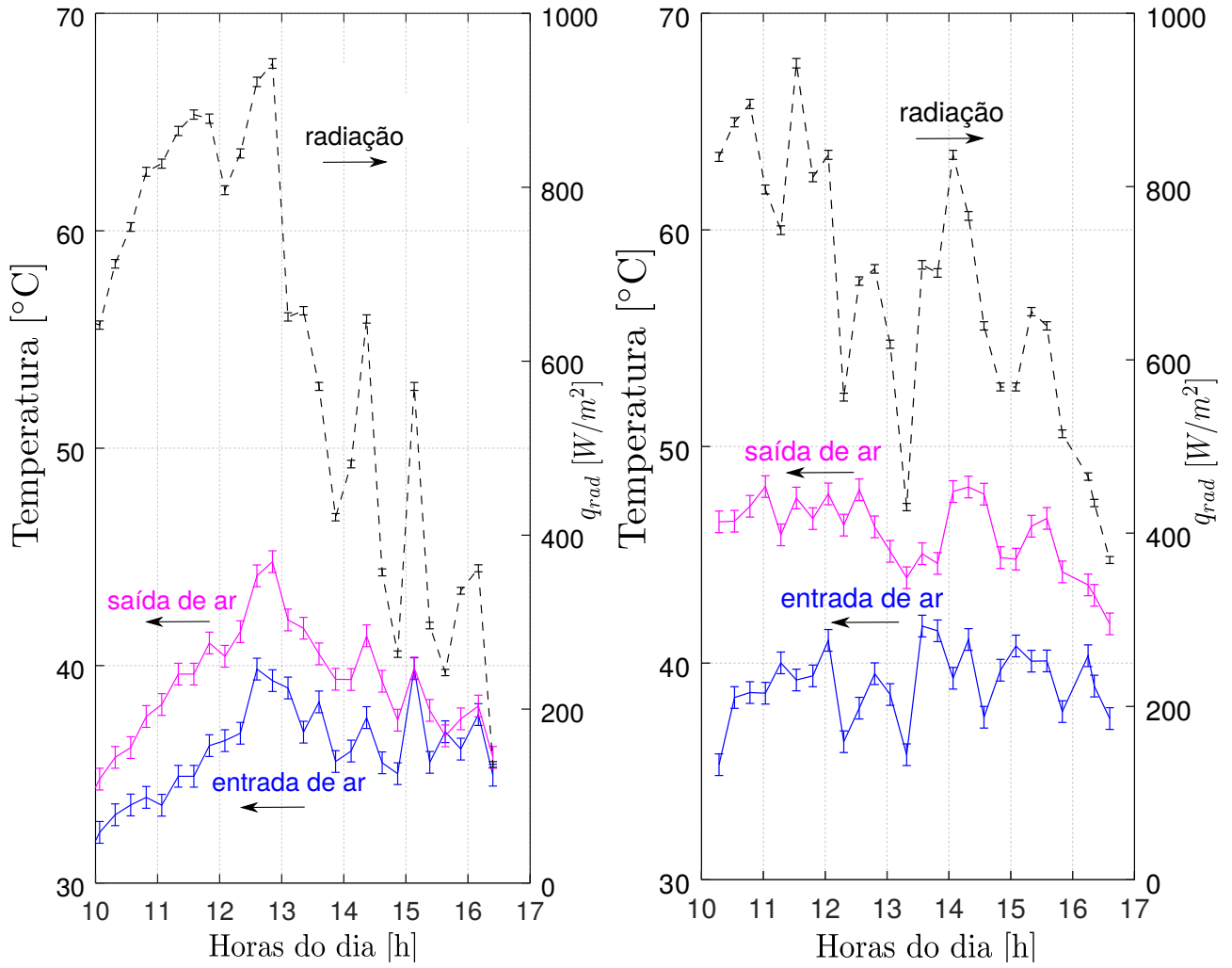


Figura 5.3: Temperatura do ar na entrada e na saída do secador.
(a) configuração 1, (b) configuração 2. Fonte: autor (2022).

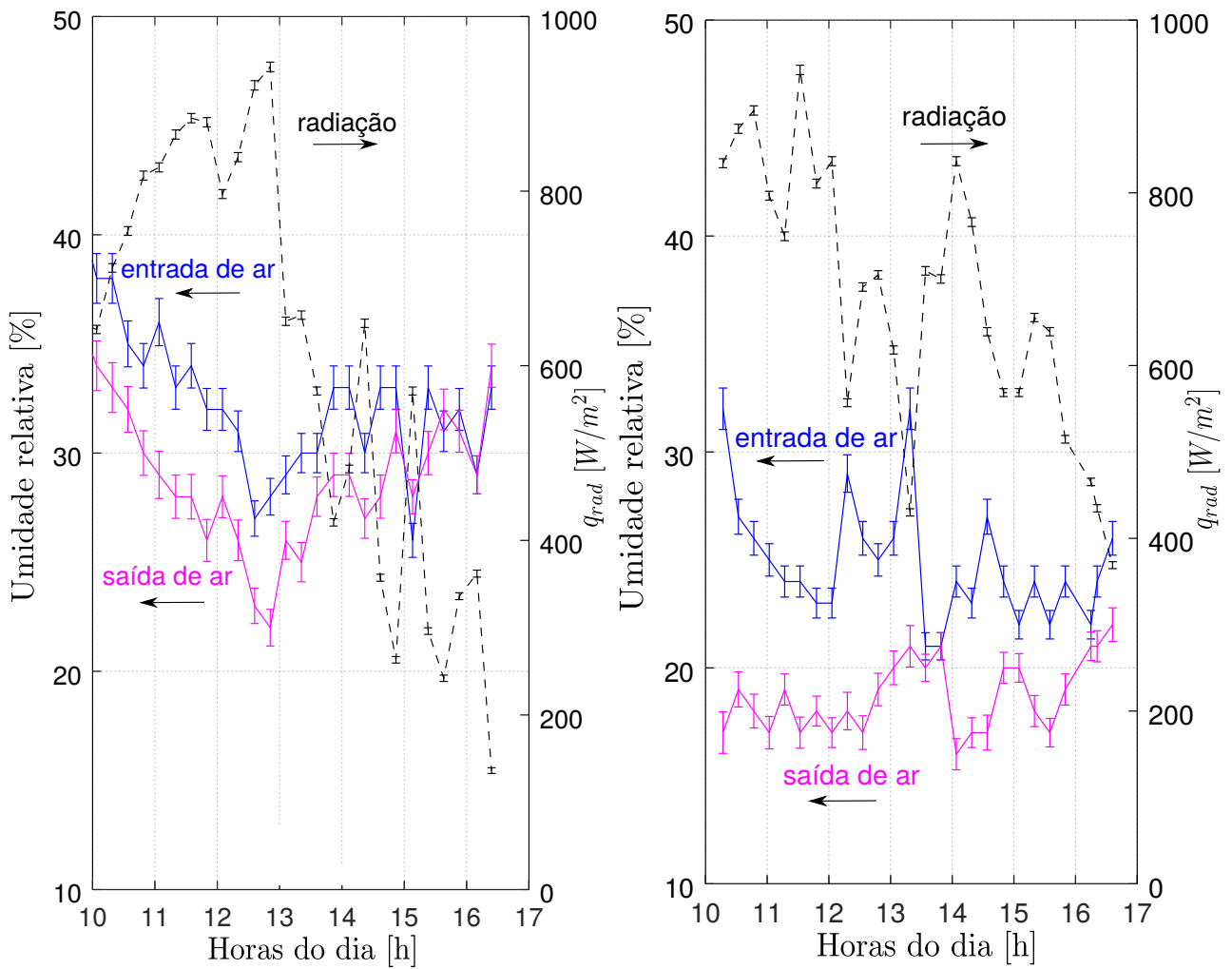


Figura 5.4: Umidade relativa do ar na entrada e na saída do secador.
(a) configuração 1, (b) configuração 2. Fonte: autor (2022).

5.5 Característica de secagem

A quantidade de umidade removida ao longo do dia, computada em intervalos de 15 minutos, pelos 2 métodos citados são apresentados na Figura 5.5. Observa-se que para a configuração 1 da placa absorvedora, Figura 5.5a, há diferença nos valores acumulados a longo do dia, quando comparado os dois métodos (célula de carga e umidade absoluta).

Esta diferença é atribuída à instabilidade na vazão de ar para a configuração 1, observado pela Figura 5.1a, uma vez que os dados são registrados a cada 15 minutos, variações na vazão de ar que ocorrem neste intervalo não são registradas.

Quando a vazão de ar tende a estabilidade, como ocorrido na configuração 2 da placa absorvedora, os valores da umidade removida ao longo do dia ficam semelhantes nos dois métodos, conforme observado na Figura 5.5b.

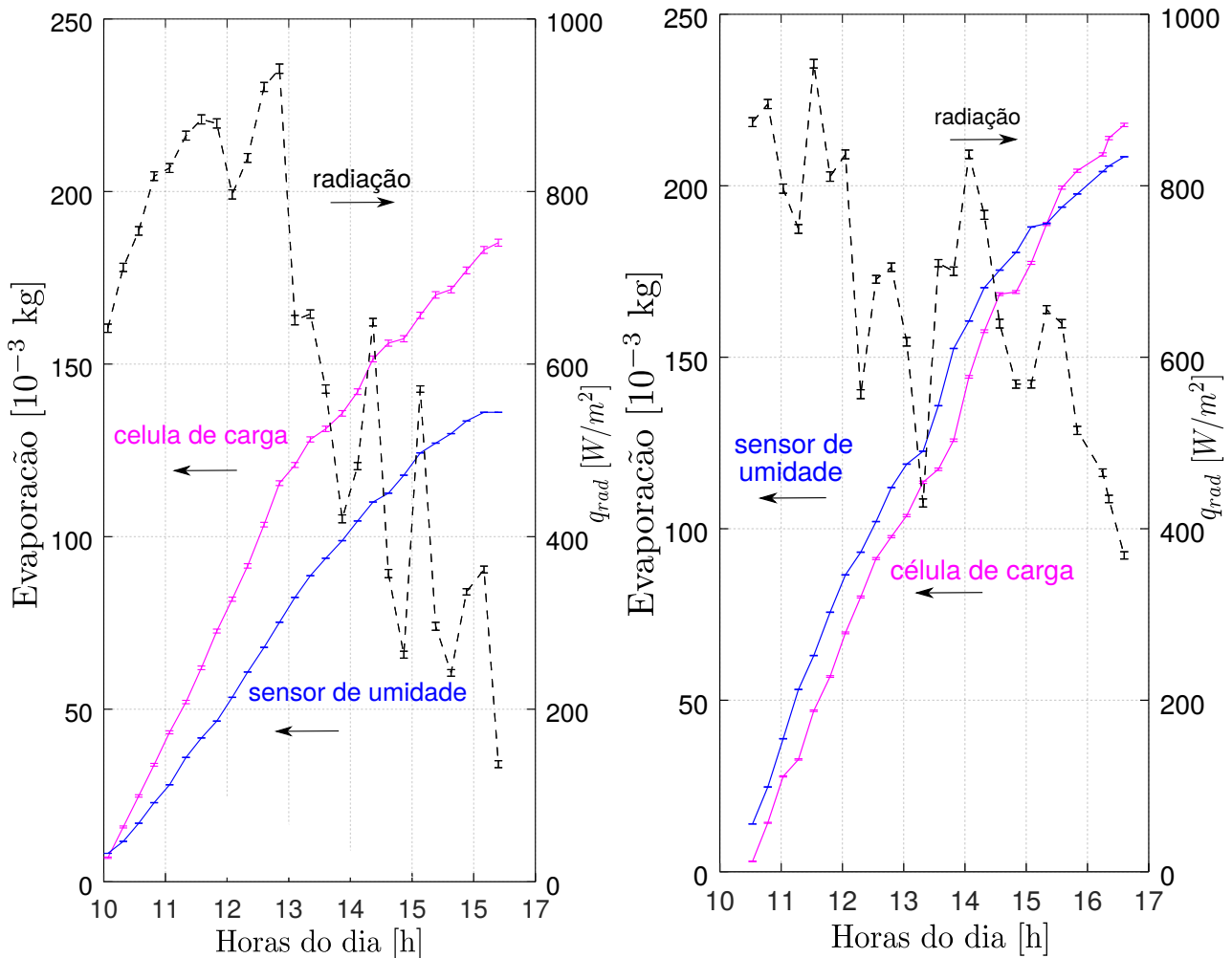


Figura 5.5: Umidade removida (acumulado do dia) computada pelo sensor de umidade e pela célula de carga. a) configuração 1, b) configuração 2. Fonte: autor (2022).

A Figura 5.6 apresenta a umidade removida pelo método da célula de carga e pelo método

da diferença da umidade absoluta para as duas configurações da placa absorvedora, mostrando a influência da radiação incidente na remoção de umidade. Quando utilizado a configuração 2, que propicia maior constância da vazão de ar, os valores registrados da umidade removida são próximos em ambos os métodos. A configuração 2 é mais vantajosa na remoção da umidade, obtendo valores 22,5% maior que os registrados para a configuração 1 da placa absorvedora.

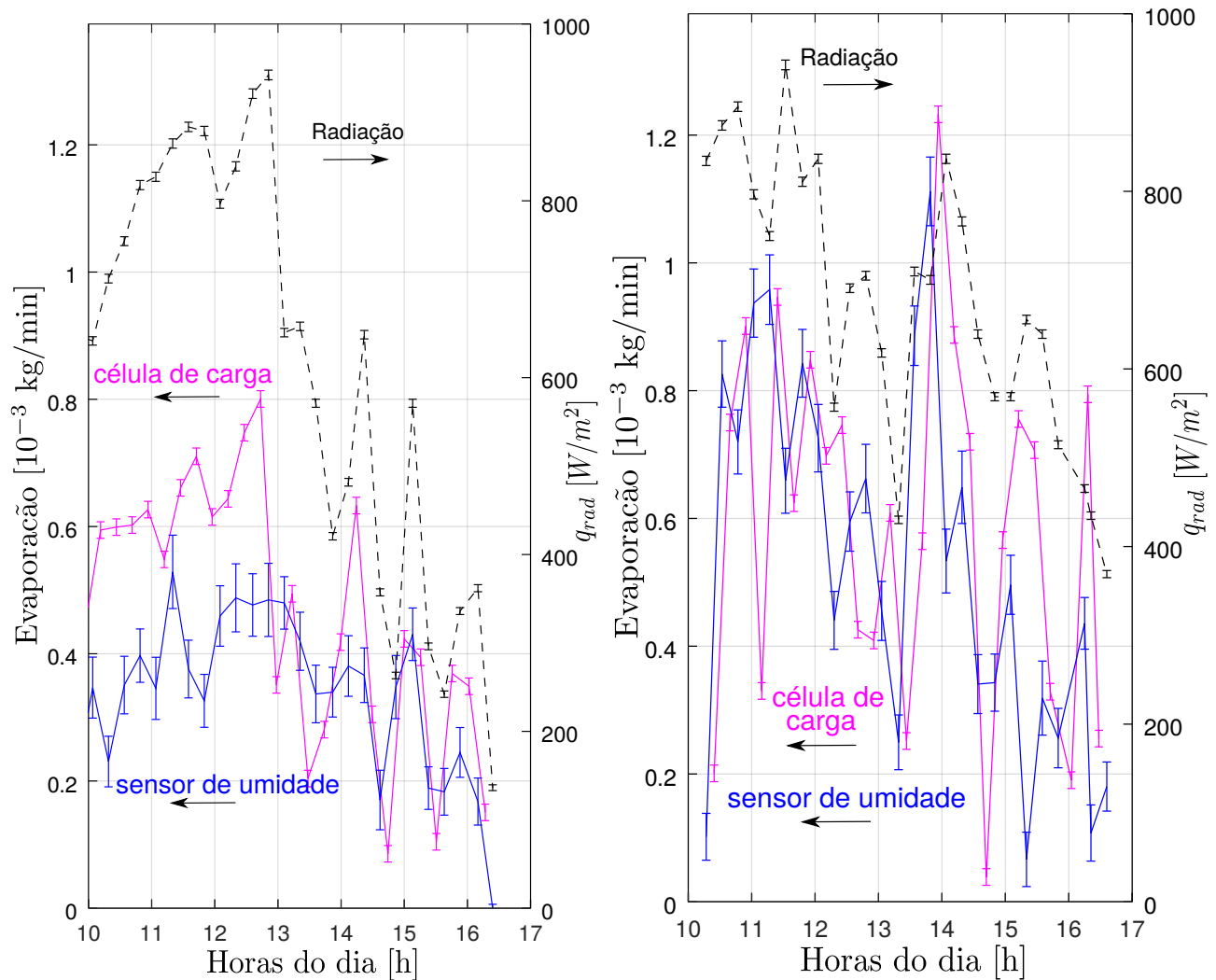


Figura 5.6: Umidade removida método da diferença da umidade absoluta e célula de carga, registrado a cada 15 minutos. (a) configuração 1, (b) configuração 2. Fonte autor (2022).

5.6 Eficiência térmica

Utilizando os dados de umidade, temperatura e pressão atmosférica, foi possível determinar o valor da entalpia do ar úmido e assim, determinar a eficiência térmica do secador em função da radiação solar incidente, conforme apresentado na Figura 5.7 para as configurações 1 e 2 da placa absorvedora. A eficiência térmica diária média foi de 19,8% para a configuração 2 e 8,4% para a configuração 1.

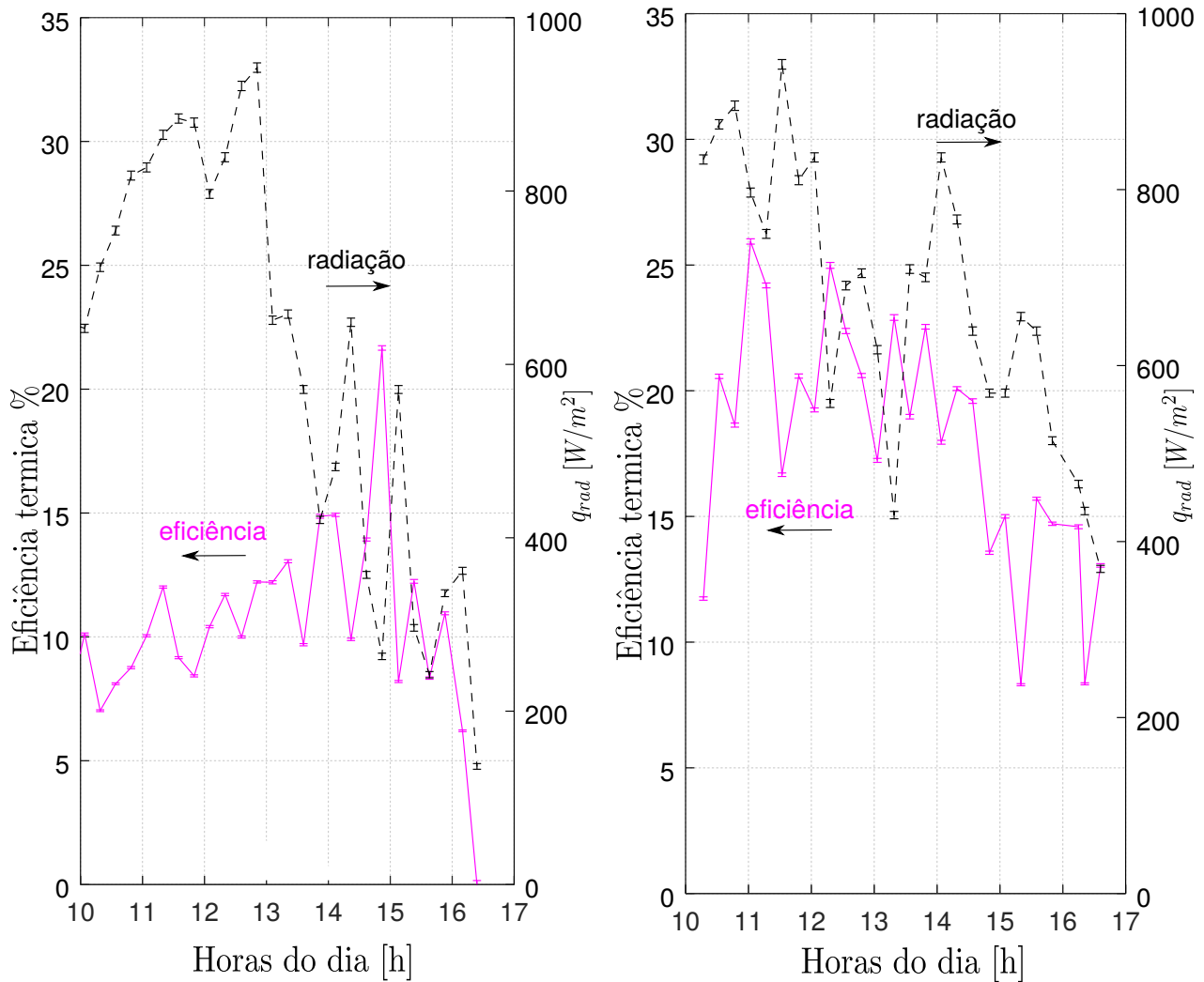


Figura 5.7: Eficiência térmica média a cada 15 minutos em função da radiação solar incidente. a) configuração 1, b) configuração 2. Fonte: autor (2022).

5.7 Utilização do termoacumulador

A análise ocorreu somente em 2 dias de testes, de forma contínua (dia e noite), portando os dados apresentados nesta sessão são preliminares, sendo prudente fazer mais testes e estudos

para consolidar os resultados.

5.7.1 Temperatura da placa absorvedora com o uso do termoacumulador

O perfil de temperatura da placa absorvedora, pode ser verificado na Figura 5.8, com clara diferenciação das temperaturas nos pontos dos 3 sensores posicionados ao longo da placa. O terceiro sensor, que está no ponto superior do comprimento da placa, mais distante da entrada de ar externo, registrou temperaturas maiores em relação aos demais sensores, indicando deficiência na troca térmica quando comparado com as configurações 1 e 2 da placa da placa absorvedora (sem o uso do termoacumulador). Com a queda da intensidade solar, o resfriamento na região do terceiro sensor ocorre de forma mais acentuada em relação aos demais sensores, implicando em menor influência do termoacumulador, se igualando com a temperatura do segundo sensor às 17h10min, indicando a influência do ar atmosférico nas bordas do termoacumulador e afetando a capacidade em manter a temperatura nesta região.

O segundo sensor, que está posicionado na região central da placa e distante das bordas do reservatório térmico, mostra estabilidade na temperatura e resfriamento mais lento que os demais sensores, igualando a sua temperatura com a do terceiro sensor as 22h30min.

O primeiro sensor da placa absorvedora está posicionado próximo a entrada de ar, onde o termoacumulador não está presente. O resfriamento ocorre de forma rápida e acompanha a queda da radiação solar incidente, se igualando a temperatura ambiente as 19h, sofrendo pouca influência do termoacumulador, que fornece energia para esta região por condução na placa absorvedora.

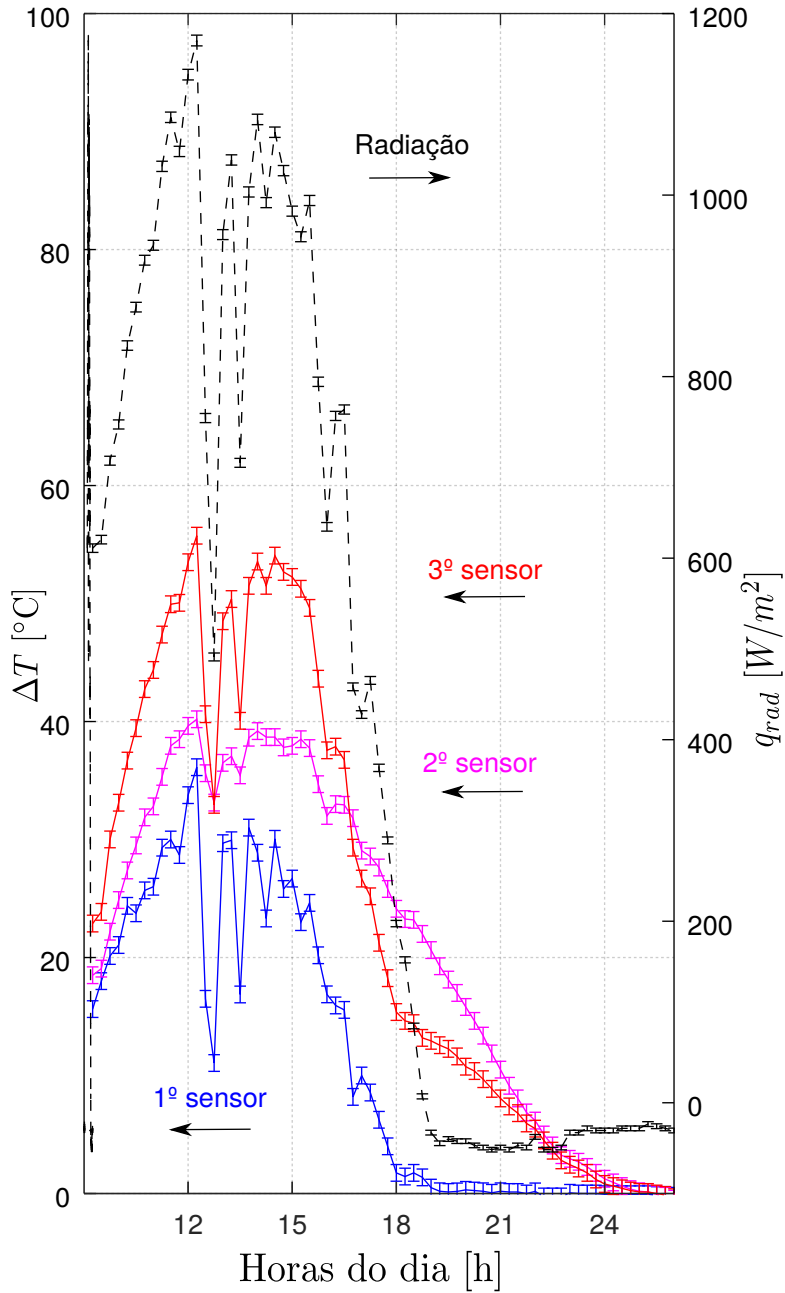


Figura 5.8: Temperatura da placa absorvedora com termoacumulador.
Fonte: autor (2022).

5.7.2 Temperatura do ar de saída com o uso do termoacumulador

A Figura 5.9 apresenta uma comparação entre as temperaturas do ar de entrada e saída do secador, destacando o horário das 18h, quando a diferença entre as referidas temperaturas é pouco significativa, ocorrendo a estagnação do ar pela falta de vazão, observado na Figura 5.10.

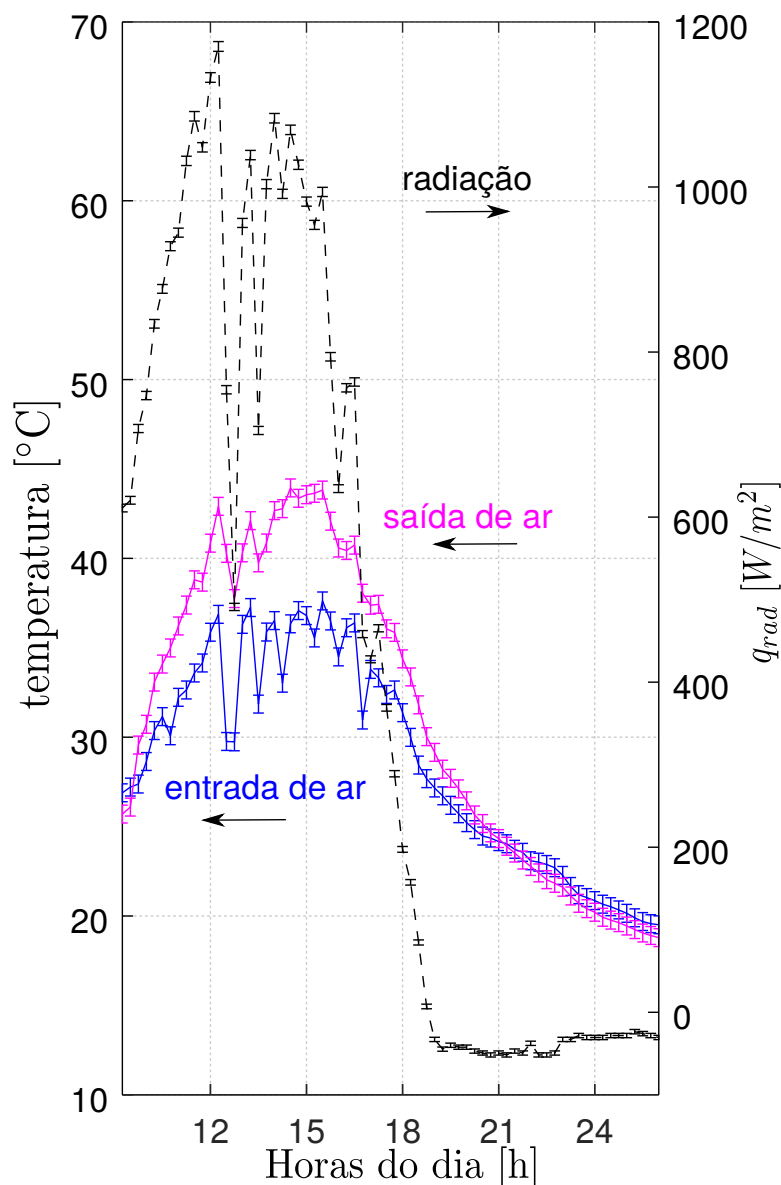


Figura 5.9: Temperatura do ar na entrada e na saída do secador quando acoplado à placa absorvedora o termoacumulador. Fonte: autor (2022).

5.7.3 Vazão de ar com o uso do termoacumulador

A vazão de ar se comportou de forma semelhante a configuração 2 da placa absorvedora (sem o termoacumulador, Figura 5.1), com estabilidade, intensidade e pequenas alterações em função da radiação solar, conforme apresentado na Figura 5.10. O registro da vazão cessou as 19h40min, pois atingiu o limite mínimo de leitura do anemômetro, portanto foi considerado esse valor como zero.

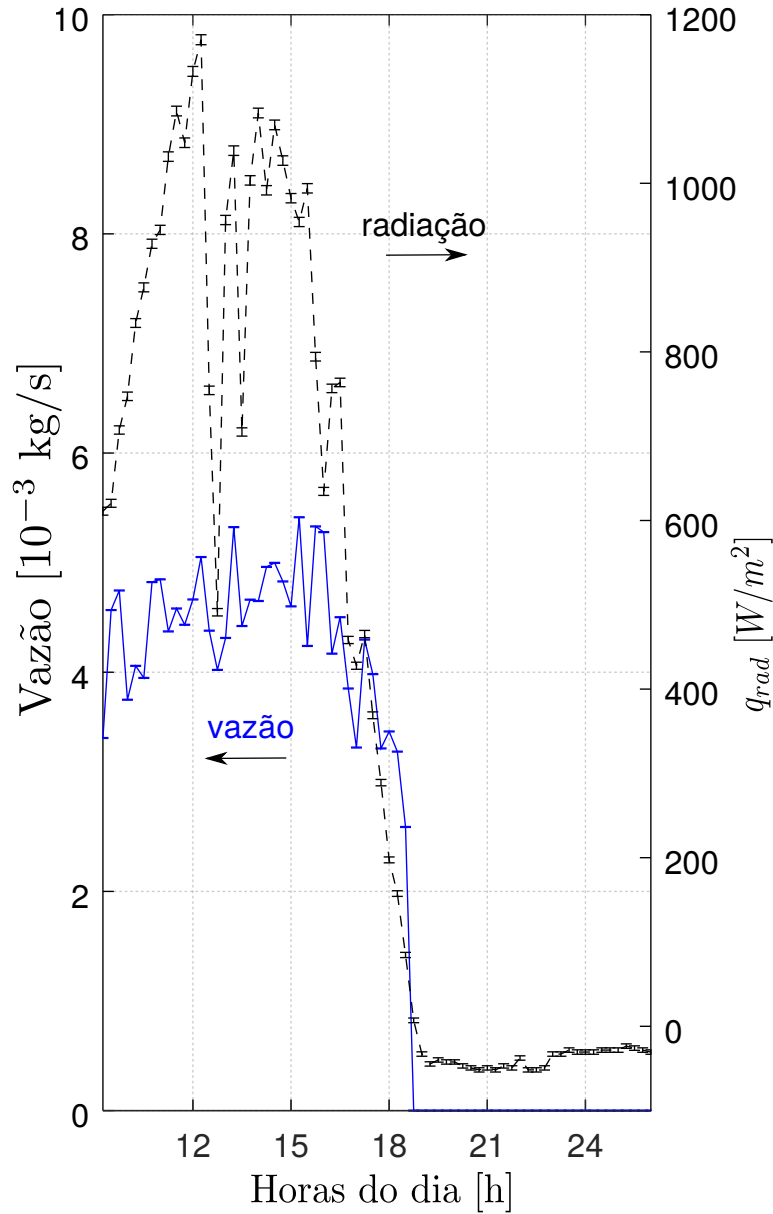


Figura 5.10: Vazão de ar do secador solar quando acoplado o termoacumulador à placa absorvedora. Fonte: autor (2022).

5.7.4 Umidade relativa com o uso do termoacumulador

O processo de remoção de umidade se inicia às 9h35min, quando o ar de saída apresenta umidade relativa de 43%, menor que o ar de entrada, que apresenta 47%, conforme observado na Figura 5.11, e se mantém até às 21h, porém a diferença de umidade é expressiva até às 18h.

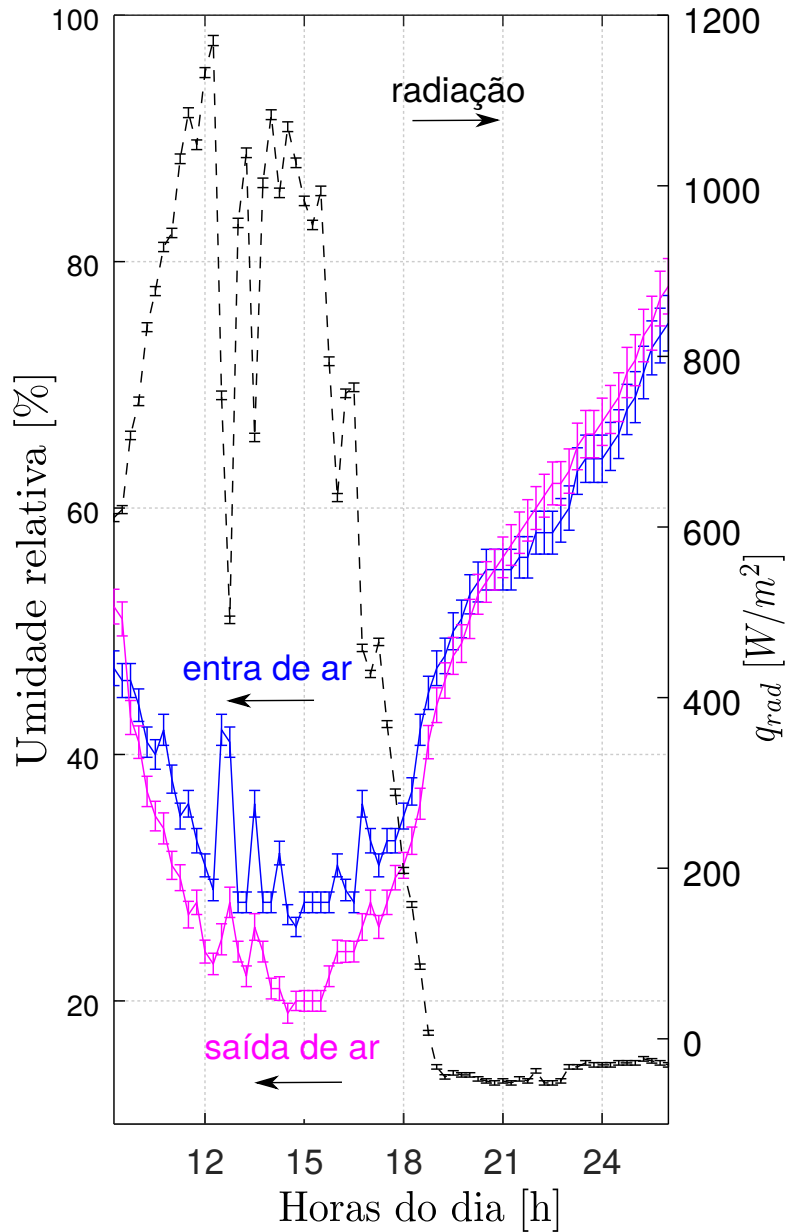


Figura 5.11: Umidade relativa do ar na entrada e na saída do secador solar quando acoplado à placa absorvedora o termoacumulador. Fonte: autor (2022).

5.7.5 Remoção de umidade com o uso do termoacumulador

Conforme informado na Seção 5.5, o registro da remoção de umidade ocorre pela célula de carga e pelo balanço de massa computados com os dois sensores de umidade e esses métodos se mostraram eficientes, com alguma divergência de valores no período vespertino, conforme observado pela Figura 5.12. O ensaio e registro dos dados iniciou às 9h e finalizou às 2h do dia seguinte.

Na comparação do comportamento do equipamento com e sem o termoacumulador, deve-se observar as condições climáticas do dia de ensaio, que não são as mesmas apresentadas no ensaio

da placa absorvedora na configuração 2. Nos ensaios utilizando o termoacumulador, a radiação incidente média diária foi de 875 W/m^2 , 42,7% maior que a apresentada na configuração 2 da placa absorvedora, e a radiação total diária incidente foi de 23 MJ/m^2 , 45% maior que o teste anterior, considerando o mesmo intervalo de tempo (das 10h as 17h).

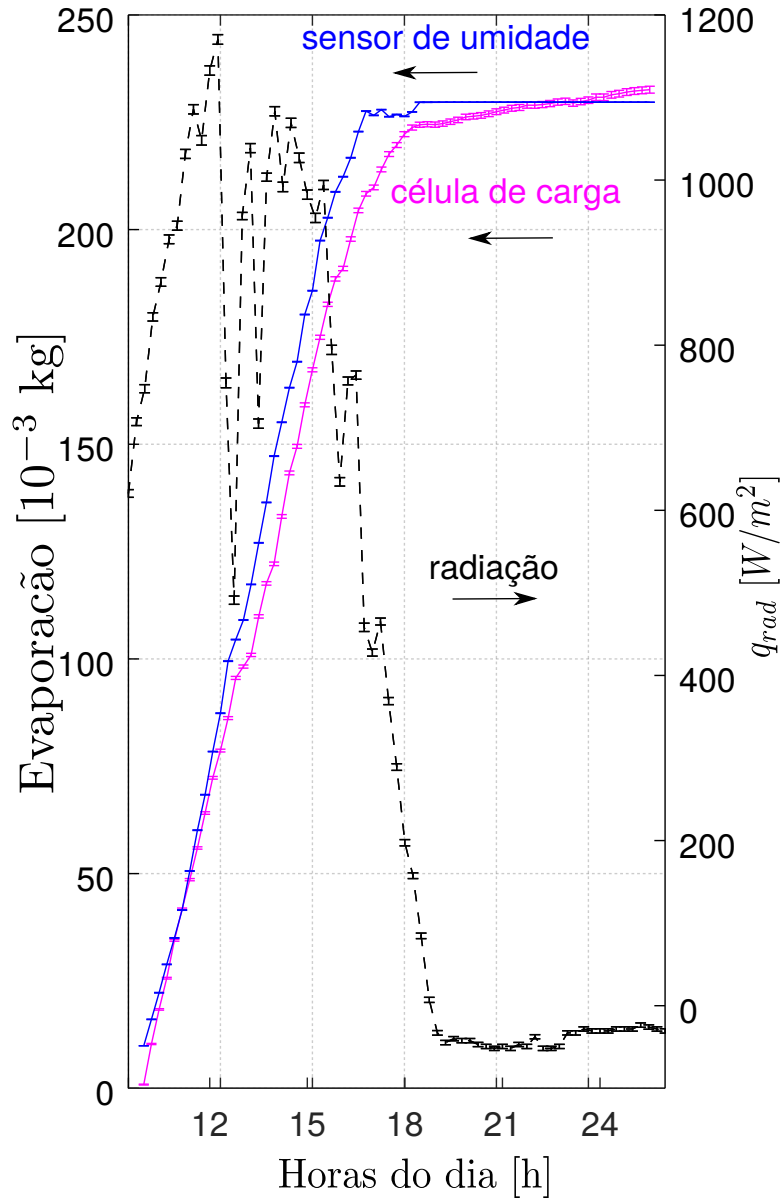


Figura 5.12: Remoção de umidade com uso do termoacumulador.

Devido a radiação incidente ser maior no teste com o termoacumulador, dois cenários de análise foram formulados na tentativa de equalizar a comparação, ambos são apresentados na Tabela 5.1, sendo eles:

- Cenário 1: Início do teste às 10h, o mesmo da configuração 2, e final do teste quando o valor da radiação incidente total se aproximou do ensaio da configuração 2 da placa absorvedora ($15,8 \text{ MJ/m}^2$), às 14h38min no dia de ensaio da placa com termoacumulador;

- Cenário 2: Mesmo período de tempo dos testes anteriores, isto é, das 10h às 17h, observando que a radiação média diária incidente e a total (23 MJ/m^2) são maiores no ensaio do termoacumulador do que nos testes anteriores, conforme apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Comparativo entre dados experimentais da placa absorvedora sem termoacumulador e com termoacumulador em 2 cenários.

	sem termoacumulador configuração 2	termoacumulador cenário 1	termoacumulador cenário 2
umidade removida [10^{-3}kg]	$227 \pm 0,52$	$158 \pm 0,44$	$183 \pm 0,52$
temperatura média diária sensor 3 [$^{\circ}\text{C}$]	$67 \pm 0,5$	$75 \pm 0,5$	$73 \pm 0,5$
$T_{ar_{out}} - T_{ar_{in}}$ mé- dia diária [K]	$7,3 \pm 0,7$	$6,8 \pm 0,7$	$6,4 \pm 0,7$
vazão média [10^{-3}kg/s]	$4,4 \pm 3,92e - 3$	$4,6 \pm 3,98e - 3$	$4,5 \pm 3,95e - 3$
η [%]	$19,8 \pm 9,5e - 2$	$14 \pm 4,8e - 2$	$13,8 \pm 4,8e - 2$

Considerando todo o período de ensaio do secador com o termoacumulador, iniciando às 10h (o mesmo início da configuração 1 e 2) e final no período noturno, às 2h do dia seguinte, o registro da remoção de umidade foi de 202 g, radiação incidente média diária de 779 W/m^2 e energia incidente total de $24,2 \text{ MJ/m}^2$.

5.8 Resultados das análises numéricas

O comparativo entre os dados experimentais e numéricos se concentraram na vazão e temperatura do ar aquecido na saída do equipamento, conforme apresentado na Tabela 5.2 para a placa absorvedora na configuração 1. A Tabela 5.3 apresenta a mesma análise, mas para a placa absorvedora na configuração 2.

Analisando os dados apresentados nestas duas tabelas, pode-se verificar que as simulações estão em concordância com os modelos experimentais, demonstrando que o simulado representa satisfatoriamente o modelo físico. Nota-se que os valores da temperatura da placa absorvedora são menores na simulação, provavelmente isso ocorre pelo *solver* adotado na simulação, *buoyantSimpleFoam*, não considerar o efeito volumétrico dos materiais e a capacidade térmica dos mesmos.

Tabela 5.2: Comparativo entre dados experimentais e simulados para a placa absorvedora na configuração 1.

Variável	Experimental	Simulado
temperatura do ar na saída do equipamento [K]	$315,15 \pm 0,5$	315,1
vazão de ar aquecido [10^{-3} kg/s]	$3,78 \pm 3,82e - 3$	3,7
temperatura localização inferior na placa absorvedora [K]	$334,15 \pm 0,5$	315
temperatura localização média na placa absorvedora [K]	$348,55 \pm 0,5$	320
temperatura localização superior na placa absorvedora [K]	$350,15 \pm 0,5$	328
Qr_{vidro} [W]	-	-8,9

Tabela 5.3: Comparativo entre dados experimentais e simulados para a placa absorvedora na configuração 2.

Variável	Experimental	Simulado
temperatura do ar na saída do equipamento [K]	318,3	$318,5 \pm 0,5$
vazão de ar aquecido [g/s]	$4,27 \pm 3,97e - 3$	4,25
temperatura localização inferior na placa absorvedora [K]	$328,9 \pm 0,5$	314
temperatura localização média na placa absorvedora [K]	$343,9 \pm 0,5$	321
temperatura localização superior na placa absorvedora [K]	$341,9 \pm 0,5$	327
Qr_{vidro} [W]	-	-18,3

5.8.1 Temperatura

O comportamento do campo temperatura pode ser observado na Figura 5.13 para ambas configurações da placa absorvedora. Observa-se que a temperatura do ar é maior para a configuração 2, Figura 5.13b, e nota-se que na região superior da placa absorvedora não há homogeneidade da temperatura do ar, indicando perturbação no fluxo de ar. Outra diferenciação relacionado a temperatura, ocorre na porção inferior da câmara de secagem, embaixo da bandeja d'água, principalmente para a configuração 1, Figura 5.13a, onde apresenta temperatura inferior às demais regiões da câmara. Esta localização pode ser útil quando há necessidade de secagem de produtos sensíveis a altas temperaturas, visando a preservação da qualidade e propriedades do produto.

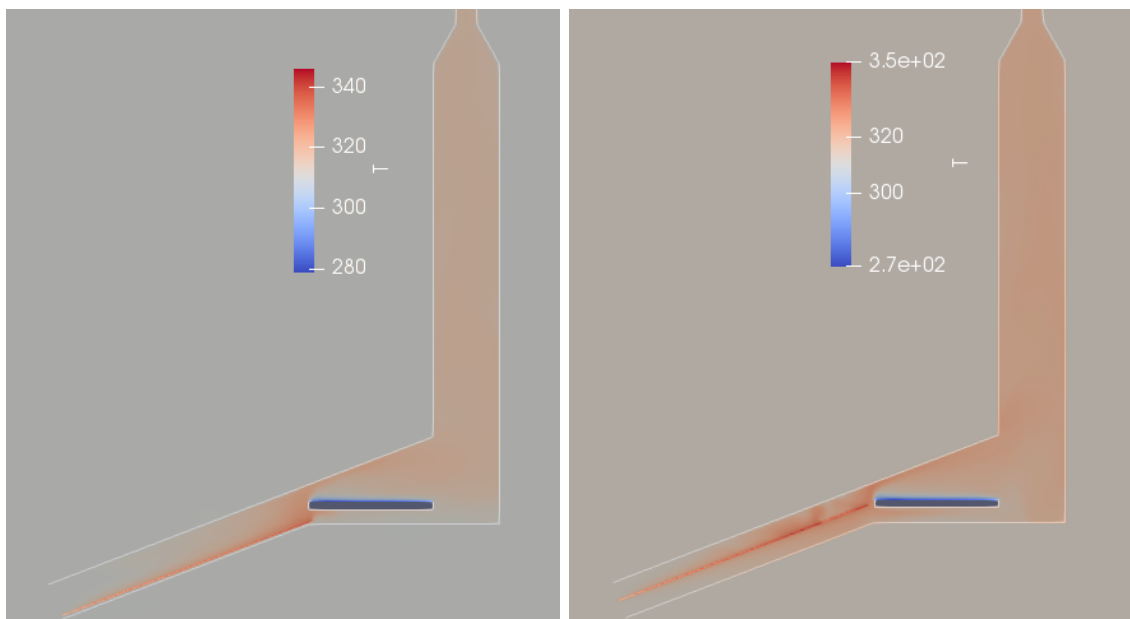


Figura 5.13: Representação do campo temperatura.

a) configuração 1 da placa absorvedora; b) configuração 2 da placa absorvedora.

5.8.2 Fluxo de ar

O campo velocidade pode ser observado na Figura 5.14, sendo que para a configuração 1, Figura 5.14a, o fluxo de ar quente é direcionado para a bandeja d'água e a maior parcela é desviada para a região superior da câmara de secagem, fluindo para o duto de saída. Sobre a superfície d'água há passagem de ar de sentido oposto ao fluxo principal.

Na configuração 2 da placa absorvedora, Figura 5.14b, o fluxo de ar quente se eleva naturalmente e entra no interior da câmara de secagem, se dispersando na junção entre a câmara e o duto de saída. Pode-se observar que em ambos os casos, a região da bandeja no interior da câmara está exposta a uma recirculação, tanto na parcela superior como inferior da bandeja. Entretanto, comparando-se os perfis de escoamento, nota-se que a configuração 1 apresenta velocidades menores nas proximidades da bandeja. Esta análise apresenta-se consistente com os resultados experimentais obtidos, uma vez que verifica-se uma maior intensidade de transferência de massa justamente na configuração 2, que possui maior intensidade de escoamento. Apesar desse melhor resultado, a análise numérica para ambos os casos mostra que este coeficiente de transferência de massa pode ser intensificado com mudanças na geometria da câmara ou na posição da bandeja. Para que isto ocorra é necessário que sejam feitas mudanças de projeto que resultem em um escoamento sem recirculação no entorno da bandeja.

Analizando as demais regiões da Figura 5.14b, duas localidades se destacam para posicionar os alimentos a serem desidratados, sendo a primeira entre a junção da câmara de secagem e o duto de saída, onde há fluxo intenso e distribuído de ar quente, sendo vantajoso para posicionar maior volume de produto, devido a alta capacidade de remoção da umidade. A segunda região é no interior da câmara, onde há vórtices, que induz a circulação de ar e auxilia na remoção de umidade. No entanto, essas duas regiões são propícias a desidratação desde que o posicionamento do produto a ser seco não restrinja a passagem do ar de forma que altere as características destas regiões com relação ao fluxo de ar.

O fluxo de ar pode ser representado com o auxílio do recurso *steamtracer* do software *Paraview*[®], que gera imagens em três dimensões, apresentado na Figura 5.15, ilustrando a parcela do fluxo de ar mais acentuado sobre a placa absorvedora na configuração 2. Nesta imagem há duas regiões que se destaca, sendo a região de entrada de ar e a região superior da placa absorvedora.

Na região de entrada de ar, verifica-se que abaixo da placa absorvedora há uma pequena perturbação do fluxo de ar de entrada em forma de vórtices, causado pela proximidade ao solo.

Na região superior da placa absorvedora verifica-se o início da instabilidade e o descolamento do fluxo da placa, formando uma geometria que lembra ondas e pode ser claramente observado pela Figura 5.16. A Figura 5.17 mostra este comportamento com visão superior em relação a placa absorvedora e segregação do fluxo de ar central, que é mais intenso.

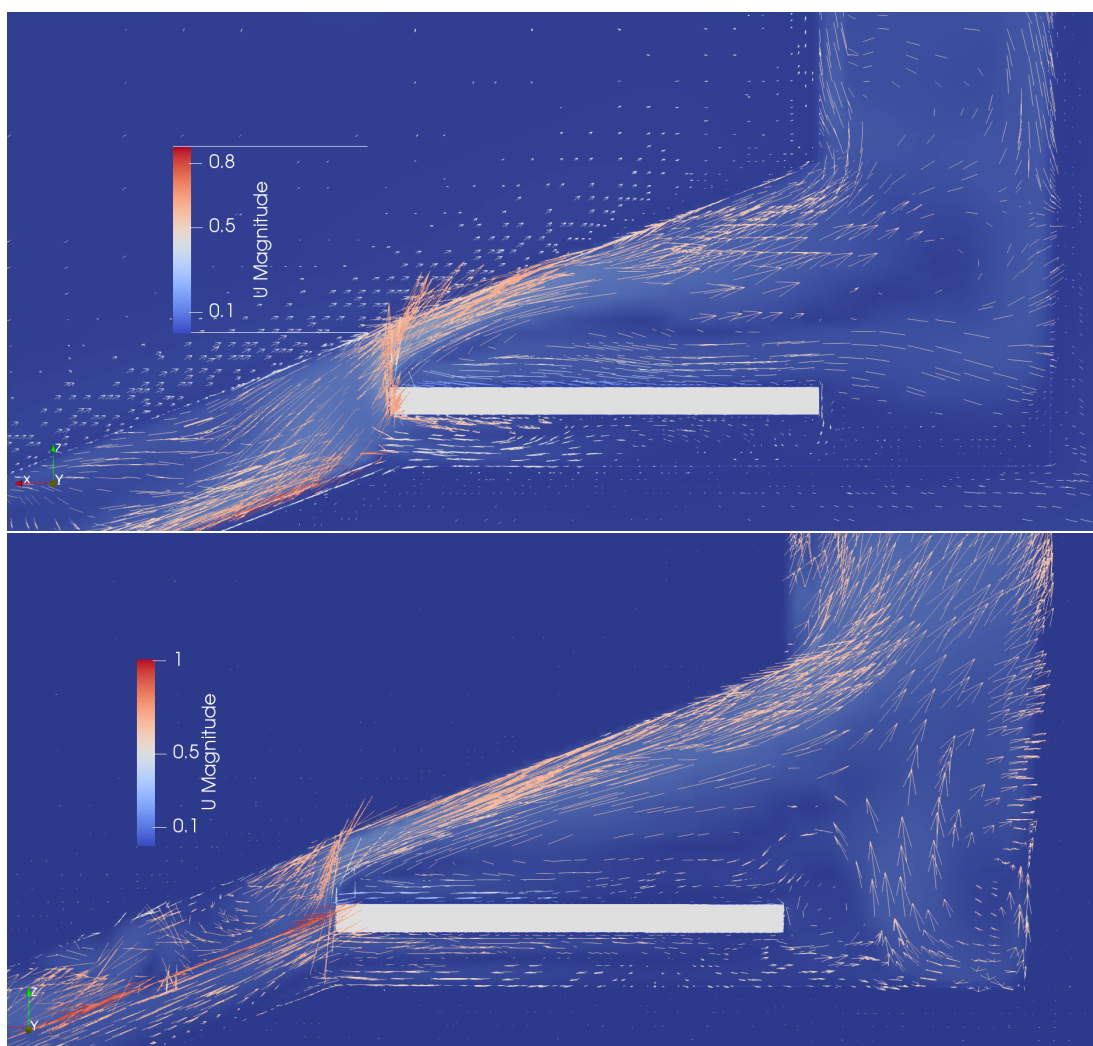


Figura 5.14: Representação do campo Velocidade.
a) configuração 1 da placa absorvedora; b) configuração 2 da placa absorvedora.

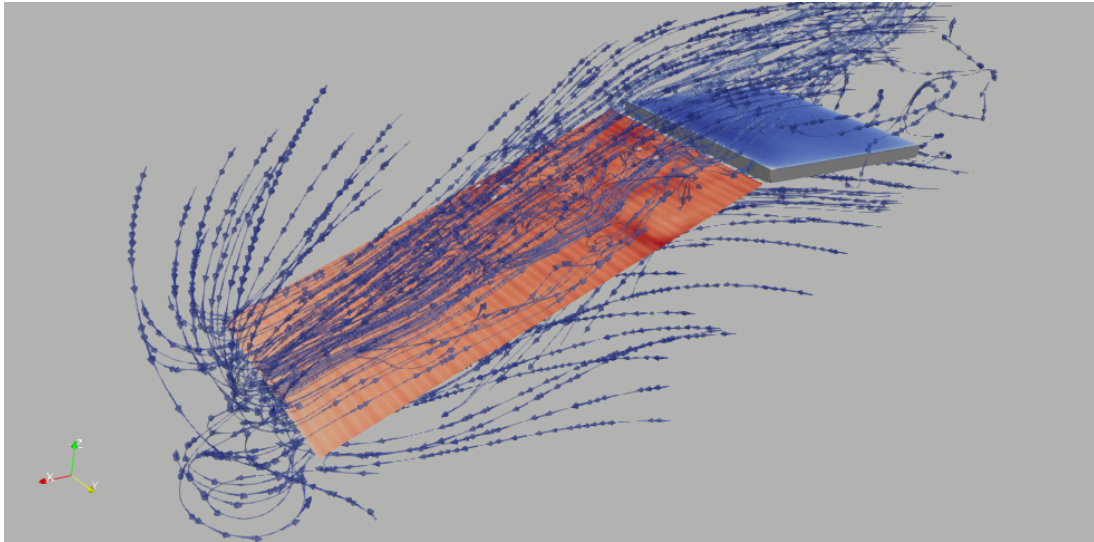


Figura 5.15: Fluxo de ar sobre a placa absorvedora na configuração 2.

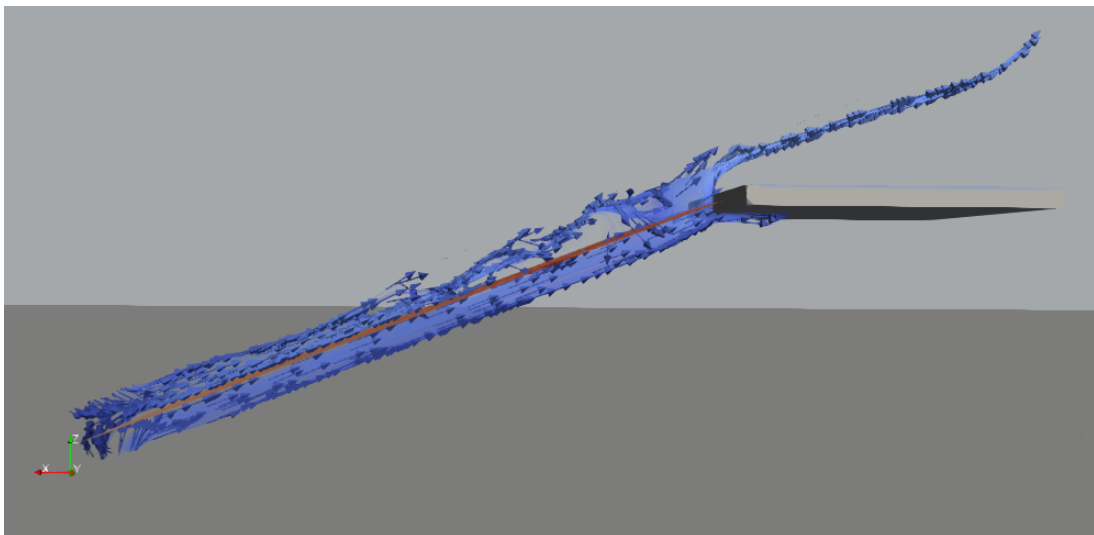


Figura 5.16: Fluxo de ar sobre a placa absorvedora na configuração 2. Visão de perfil.

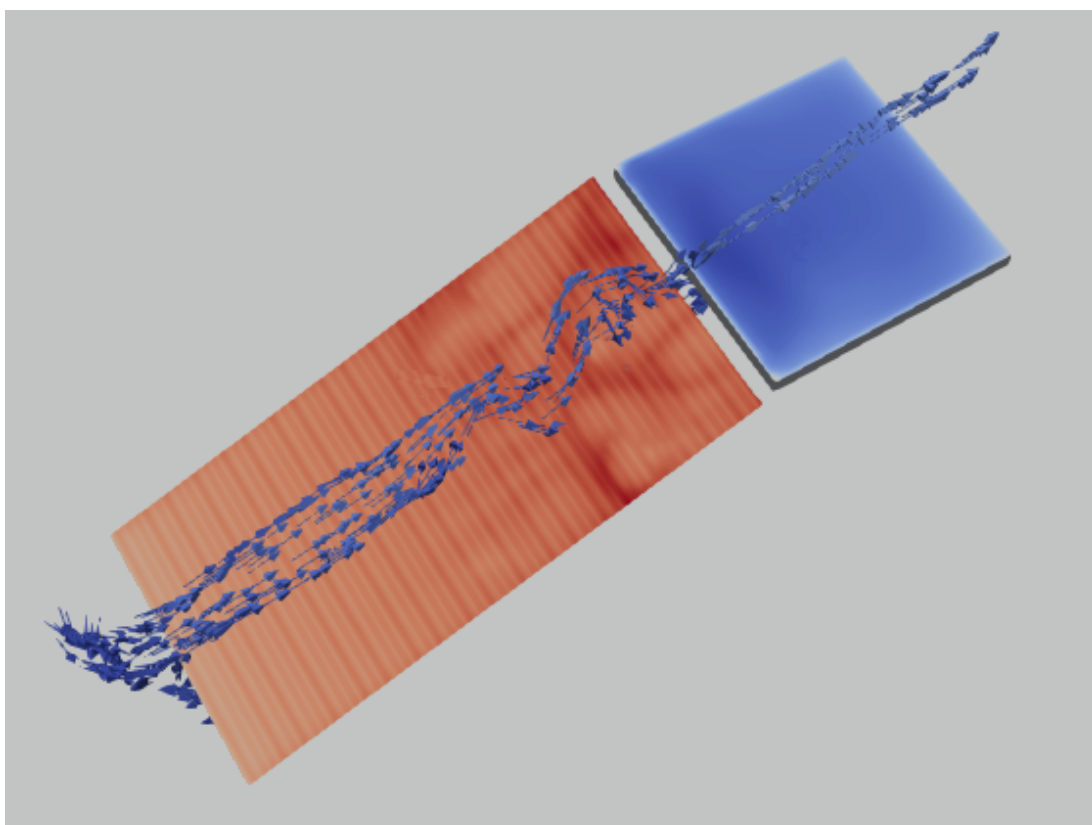


Figura 5.17: Fluxo de ar sobre a placa absorvedora na configuração 2. Visão superior.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresenta os resultados da análise do secador solar indireto por convecção natural, comparando a alteração da posição da placa absorvedora de forma que inicialmente o fluxo de ar teve passagem somente na sua face exposta à radiação solar. Posteriormente a posição da placa foi alterada para a metade da altura do vão livre entre o isolamento e o vidro, possibilitando assim a passagem de ar pela sua face superior e inferior.

6.1 Análise do secador

O estudo do secador solar foi realizado através da análise da vazão de ar, do perfil de temperatura da placa absorvedora, do acréscimo da temperatura do ar, do decréscimo da umidade do ar e da capacidade de remoção de umidade. Sobre esses fatores, destacam:

Vazão: Em ambas as configurações da placa absorvedora a vazão é satisfatória e o suficiente para a remoção de umidade, apesar da configuração 2 proporcionar um aumento de 5,5%, esse acréscimo não foi o fator determinante para o aumento da taxa de remoção de umidade, mas sim a constância da vazão e o aumento da temperatura do ar.

Temperatura do ar: O aspecto de maior destaque com a alteração da configuração da placa absorvedora foi o acréscimo da temperatura. Para a configuração 1 a média diária da elevação da temperatura do ar foi de 3 °C, inferior ao valor de 7,3 °C obtido na configuração 2, proporcionando uma diferença na relação entre a umidade relativa na entrada e na saída do ar, aumento de 81,8 % em relação a configuração 1.

Remoção de umidade: Com a vazão mais constante e de maior intensidade, associados a maiores decréscimos da umidade relativa do ar no interior do secador, proporcionado pela configuração 2 da placa absorvedora, resultou em um aumento na remoção de umidade de 22,5%, sendo que para a configuração 1 foi removido no dia de teste 185g e para a configuração 2 foi removido 227g.

Eficiência térmica: Seguindo a tendência dos fatores anteriormente citados, o maior valor da eficiência térmica foi obtido na configuração 2 da placa absorvedora, sendo de 19,8%, superior ao valor de 8,4% obtido na configuração 1. Esse aumento se deve principalmente pelo efeito convectivo em ambos os lados da placa absorvedora, principalmente na região do terceiro sensor de temperatura (próximo a câmara de secagem), onde há tendência de descolamento do ar na face superior e o constante contato do fluxo de ar na face inferior, os quais melhoram a troca térmica entre a placa e ar, se comparado com a configuração 1.

Termoacumulador PCM: Como a configuração 2 foi mais vantajosa em diversos parâmetros, optou-se em usar essa posição da placa absorvedora e agregar o termoacumulador. O resultado dessa alteração foi uma boa estabilidade na vazão de ar, refletindo na acuracidade do registro da remoção de umidade pelo método do balanço de massa (utilizando os dados dos sensores de umidade), que foi semelhante aos registrados pela célula de carga, reforçando a importância de ter uma vazão estável, associada ao registro de dados em períodos de tempos pequenos.

Porém a vantagem obtida na vazão de ar não se refletiu na quantidade de umidade removida, sendo inferior a situação sem o termoacumulador, conforme apresentado na Tabela 5.1. A mesma tendência de resultados inferiores ocorreu nos demais parâmetros, indicando que o termoacumulador deve ser melhor estudado, para posteriormente ser ajustado de forma a ser vantajoso na remoção de umidade.

6.2 Análise numérica

A implementação da análise numérica para estudo do comportamento do secado solar foi satisfatória e representou o modelo experimental, podendo ser usada para testes de outros ajustes no equipamento, como modelo de placa absorvedora e disposição dos produtos no interior do secador a serem desidratados.

Através dos gráficos do fluxo de ar e de temperatura em ambas as configurações, foi possível ter melhor compreensão do funcionamento do equipamento, com visualização de regiões propícias para disponibilizar os produtos e algumas melhorias a serem feitas para aumentar a convecção da placa absorvedora.

6.3 Instrumentação

Uma parcela significativa do esforço despendido neste trabalho foi dedicado a elaboração e análise dos sensores que foram desenvolvidos para atender a necessidade da análise do seca-

dor solar. Portanto é significativo fazer uma rápida descrição desses sensores e citar as suas características principais:

- **Anemômetro:** Confeccionado a partir de um *cooler* comercial comumente utilizado em computadores *desktop*, conforme descrito na Seção 4.1. Este dispositivo se mostrou sensível, com respostas rápidas e registro de pequenas velocidades do ar, atendendo perfeitamente o propósito deste trabalho. Apresentou linealidade da sua curva de calibração, obtendo coeficiente de determinação de 99,898% e facilidade na obtenção de seus dados quando utilizado um microcontrolador programável.
- **Balança com célula de carga:** A introdução da célula de carga no interior do equipamento proporcionou alterar a forma tradicional de verificar a remoção de umidade gerada pelos secadores, que comumente é feita pela retirada do produto do interior do secador e leva-o para uma balança de bancada, geralmente no laboratório, alterando com isso, a dinâmica da secagem. A dificuldade em utilizar este método está na necessidade do registro de pequenas alterações na massa, na escala de gramas, tornando necessário o cuidado de estabilizar a alimentação elétrica do amplificador de sinal, pois a célula de carga, composta por *strain gauge*, necessita de amplificador de sinal para poder ser lido pelo microcontrolador programável. Outro cuidado necessário é relacionado a sensibilidade do conjunto, sendo que os condutores elétricos e amplificador devem ser blindados eletromagneticamente para não gerarem ruídos devido a presença de sinal de rádio e internet. Como a célula de carga é composta de alumínio, o seu comportamento em função da temperatura deve ser mapeado para ser compensado no registro da massa.

Com os ajustes necessários, a célula de carga se mostrou precisa o suficiente para o estudo deste trabalho, com coeficiente de determinação acima de 99%, erro padrão de 0,0989 e desvio padrão de 0,568 g.

- **Sensor de umidade relativa:** Uma alternativa viável para substituir ou mesmo complementar a balança é o uso do sensor de umidade relativa na entrada e na saída de ar no secador. Porém a precisão do método está relacionada a vazão de ar e consequentemente com a precisão do anemômetro. Neste trabalho o uso dos sensores para obter a quantidade de umidade removida se mostrou aceitável com a placa absorvedora na configuração 2, pois a vazão se apresentou mais estável que a da configuração 1. Para uso somente deste método é aconselhado utilizar um menor intervalo de tempo do registro de dados do que o adotado neste trabalho, de forma que as oscilações na vazão de ar sejam registradas e não altere a determinação da umidade total removida.

6.4 Trabalhos Futuros

Diante das fatores apresentado neste trabalhos os prosseguimentos dos estudos seguirá com a posição da placa absorvedora na configuração 2, com foco nas seguintes etapas de pesquisa:

- Melhorias na convecção da região superior da placa absorvedora com a introdução de barreiras na face inferior e propor formas de evitar o descolamento do ar na face superior;
- Simulações e posteriormente testes experimentais da placa absorvedora corrugada no sentido horizontal e dependendo dos resultados, introduzir barreiras para melhorar a convecção;
- Alterar a geometria, posição e quantidade de parafina no termoacumulador, pois a capacidade de descarga do termoacumulador não foi adequada para a situação. Para melhorar o desempenho do termoacumulador, pode-se diminuir a espessura do reservatório e aumentar o seu comprimento, a posição do reservatório deve ficar mais centralizada no comprimento da placa absorvedora e agregar à parafina cavacos ou agulhas de alumínio para aumentar a capacidade de condução;
- Analisar diversas regiões para secagem de produtos e a melhor forma de disponibilizá-los;
- Devido a falta de padrão nos testes dos secadores, que geralmente são feitos com um determinado produto típico da região onde a análise está ocorrendo, o comparativo entre os trabalhos em diferentes configurações de secadores solares se torna inapropriado, portanto em trabalhos futuros deve-se elaborar um corpo de prova com dimensões e material definidos, possivelmente cerâmico, secado a altas temperaturas e com porosidade determinada, o qual será submerso em água até ser saturado antes de ser levado ao secador. Com isso possibilita registrar a remoção de umidade em um produto padrão e validar a comparação da eficácia entre secadores.

Referências

AL - NEAMA, Ali J. **Performance enhancement of solar air collectors applied for drying processes**. Mar. 2018. 110 f. Szent István University, Godllo, Hungary. Disponível em: <https://szie.hu/sites/default/files/maytham_dissertation.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2010.

AVALLONE, Elson; MIORALLI, Paulo; FARO, Atila et al. RADIOMETRO SOLAR DE BAIXO CUSTO USANDO A PLATAFORMA ABERTA ARDUINO. **Colecao desafios das engenharias: engenharia mecanica**, v. 590212107, 2021. Number: 1. ISSN 978-65-5983-259-0. DOI: 10.22533. Disponível em: <<https://doi.org/10.22533/at.ed.590212107>>.

AVALLONE, Elson; MIORALLI, Paulo César; SCALON, Vicente Luiz et al. Thermal Pyranometer Using the Open Hardware Arduino Platform. en. **International Journal of Thermodynamics**, v. 21, n. 1, p. 1–5, mar. 2018. Number: 1. ISSN 1301-9724. DOI: 10.5541/ijot.5000209000. Disponível em: <<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijot/400063>>. Acesso em: 19 mai. 2020.

BANIASADI, Ehsan; RANJBAR, Saeed; BOOSTANIPOUR, Omid. Experimental investigation of the performance of a mixed-mode solar dryer with thermal energy storage. **Renewable Energy**, v. 112, p. 143–150, 1 nov. 2017. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2017.05.043. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117304287>>. Acesso em: 5 dez. 2019.

BELL, Ian H. et al. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 6, p. 2498–2508, 2014. DOI: 10.1021/ie4033999. eprint: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie4033999>. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie4033999>>.

CHANDRASEKAR et al. Experimental investigation on a solar dryer integrated with condenser unit of split air conditioner (A/C) for enhancing drying rate. **Renewable Energy**, v. 122, p. 375–381, jul. 2018. ISSN 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2018.01.109.

Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148118301198>>. Acesso em: 31 mar. 2020.

DEVAHASTIN, Sakamon; PITAKSURIYARAT, Saovakhon. Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 14, p. 1705–1713, out. 2006. ISSN 13594311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.11.007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135943110500390X>>. Acesso em: 24 abr. 2020.

EKECHUKWU, O. V; NORTON, B. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. en. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 6, p. 615–655, abr. 1999. ISSN 0196-8904. DOI: 10.1016/S0196-8904(98)00093-4. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890498000934>>. Acesso em: 23 fev. 2021.

EL KHADRAOUI, Aymen et al. Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 37–48, 1 abr. 2017. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.149. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617301646>>. Acesso em: 5 dez. 2019.

ERICK CÉSAR, López-Vidaña et al. Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*). en. **Renewable Energy**, v. 147, p. 845–855, mar. 2020. ISSN 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148119313485>>. Acesso em: 18 jan. 2022.

ESAKKIMUTHU, S. et al. Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications. **Solar Energy**, v. 88, p. 144–153, fev. 2013. ISSN 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2012.11.006. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X12003970>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

GARCIA, Marcelo. **Temperatura de segurança mínima para o cozimento dos alimentos**. pt-BR. [S.l.: s.n.], fev. 2013. Disponível em: <<https://foodsafetybrazil.org/temperatura-de-seguranca-minima-para-o-cozimento-dos-alimentos/>>. Acesso em: 19 jul. 2022.

GARCIA, Rafael Paiva. **Avaliação experimental da eficiência térmica de coletor solar plano com barreiras internas**. 2019. 116 f. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru, Bauru, Brasil. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/181810>>. Acesso em: 4 mai. 2020.

GODOI, M. **Investimento global em renováveis aumenta 5% no semestre.** CanalEnergia. Library Catalog: www.robocore.net. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53140315/investimento-global-em-renovaveis-aumenta-5-no-semester-aponta-bnef>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

HERRMANN, Sebastian; GATLEY, Donald P.; KRETZSCHMAR, Hans-Joachim. Thermodynamic Properties of Real Moist Air, Dry Air, Steam, Water, and Ice (RP-1485). **HVAC&R Research**, v. 15, n. 5, p. 961–986, set. 2009. Publisher: Taylor & Francis Ltd. ISSN 10789669. DOI: 10.1080/10789669.2009.10390874. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=44705351&lang=pt-br&site=ehost-live>>. Acesso em: 5 jun. 2020.

HIDALGO, Letícia Ferraresi et al. Natural and forced air convection operation in a direct solar dryer assisted by photovoltaic module for drying of green onion. en. **Solar Energy**, v. 220, p. 24–34, mai. 2021. ISSN 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2021.02.061. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X21001754>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

HOLMAN, J.P. **Experimental Methods For Engineers**. [S.l.]: Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2007. ISBN 978-1-283-18907-1. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=9B9VAQAACAAJ>>.

KALOGIROU, Soteris. **Solar energy engineering : processes and systems**. 1. ed. Burlington, MA 01803, USA: Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-0-12-374501-9.

LEON, M Augustus; KUMAR, S; BHATTACHARYA, S C. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 27, 2002.

MAXIM. **Data Sheet DS18B20 1-Wire Digital Thermometer**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://szie.hu/sites/default/files/maytham_dissertation.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2020.

_____. **TUTORIALS 1796: GUIDE TO 1-WIRE COMMUNICATION**. [S.l.: s.n.], 2008. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/1/1796.html>>. Acesso em: 19 mai. 2020.

MOHAJER, Alireza et al. Experimental investigation of a Hybrid Solar Drier and Water Heater System. **Energy Conversion and Management**, v. 76, p. 935–944, 1 dez. 2013. ISSN 0196-8904. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.08.047. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413005219>>. Acesso em: 5 dez. 2019.

MOHANRAJ, M.; CHANDRASEKAR, P. Drying of copra in a forced convection solar drier. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 4, p. 604–607, abr. 2008. ISSN 15375110. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2007.12.004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511007003583>>. Acesso em: 13 fev. 2020.

NATARAJAN, Karunaraja et al. Convective solar drying of Vitis vinifera & Momordica charantia using thermal storage materials. en. **Renewable Energy**, v. 113, p. 1193–1200, dez. 2017. ISSN 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2017.06.096. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148117306006>>. Acesso em: 18 jan. 2022.

NDUKWU; MACMANUS; BENNAMOUN. Potential of integrating Na₂SO₄ · 10H₂O pellets in solar drying system. **Drying Technology**, v. 36, n. 9, p. 1017–1030, 4 jul. 2018. ISSN 0737-3937. DOI: 10.1080/07373937.2017.1366506. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1366506>>. Acesso em: 5 dez. 2019.

NDUKWU et al. Development of a low-cost wind-powered active solar dryer integrated with glycerol as thermal storage. en. **Renewable Energy**, v. 154, p. 553–568, jul. 2020. ISSN 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2020.03.016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148120303384>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

PANSANATO, Cristiano et al. LOW COST THERMAL PYRANOMETER USING DALLAS DS18B20 SENSOR AND ARDUINO, jan. 2018. DOI: 10.26678/ABCM.ENCIT2018.CIT18-0603.

PATANKAR, Suhas V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. [S.l.]: Hemisphere Publishing Corporation (CRC Press, Taylor & Francis Group), 1980. (Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal Science). ISBN 978-0891165224. Disponível em: <<http://www.crcpress.com/product/isbn/9780891165224>>.

POURBAGHER, Roghayeh; RAHMATI, Mohammad Hashem; ALIZADEH, Mohammad Reza. Air temperature and final grain moisture effects on drying time and milling quality in two types of fluidized bed dryer. en. v. 18, p. 8.

PREDOLIN, Rodrigo Eduardo. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS USANDO PLATAFORMA ABERTA**. 14 ago. 2017. 71 f. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru, Bauru, Brasil. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/151616>>. Acesso em: 20 mai. 2020.

RAJKUMAR, P. et al. Drying Kinetics of Tomato Slices in Vacuum Assisted Solar and Open Sun Drying Methods. **Drying Technology**, v. 25, n. 7, p. 1349–1357, 1 ago. 2007. ISSN 0737-3937. DOI: 10.1080/07373930701438931. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1080/07373930701438931>>. Acesso em: 5 dez. 2019.

REYES, Alejandro; MAHN, Andrea; VÁSQUEZ, Francisco. Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change material. **Energy Conversion and Management**, v. 83, p. 241–248, 1 jul. 2014. ISSN 0196-8904. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.03.077.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041400288X>>. Acesso em: 5 dez. 2019.

REYES; NEGRETE et al. Design and evaluation of a heat exchanger that uses paraffin wax and recycled materials as solar energy accumulator. **Energy Conversion and Management**, v. 88, p. 391–398, 1 dez. 2014. ISSN 0196-8904. DOI:

10.1016/j.enconman.2014.08.032. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414007560>>. Acesso em: 5 dez. 2019.

RITCHIE, H.; ROSER, M. Energy. **Our World in Data**, 2020.

<https://ourworldindata.org/energy>.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. Energy. **Our World in Data**, mar. 2014. Disponível em:

<<https://ourworldindata.org/energy>>. Acesso em: 27 mar. 2020.

ROBOCORE. **Comparação Entre Protocolos de Comunicação Serial**. RoboCore.

Library Catalog: www.robocore.net. Disponível em:

<<https://www.robocore.net/tutorials/comparacao-entre-protocolos-de-comunicacao-serial>>. Acesso em: 21 mai. 2020.

SEKYERE, C.K.K.; FORSON, F.K.; ADAM, F.W. Experimental investigation of the drying characteristics of a mixed mode natural convection solar crop dryer with back up heater.

Renewable Energy, v. 92, p. 532–542, jul. 2016. ISSN 09601481. DOI:

10.1016/j.renene.2016.02.020. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148116301215>>. Acesso em: 14 abr. 2020.

ŞEVIK, Seyfi et al. Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology. en. **Solar Energy**, v. 180, p. 537–549, mar. 2019.

ISSN 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2019.01.049. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X19300635>>. Acesso em: 18 jan. 2022.

- SHAPIRO, Howard N. **Princípios de Termodinâmica Para Engenharia**. 7. ed. Trav. do Ouvidor 11, 6º Andar Parte, Centro Rio de Janeiro, RJ, 20040-040, Brasil: LTC, 2013. ISBN 9788521622123.
- SHARIAH, Adnan; AL-AKHRAS, M-Ali; AL-OMARI, I. A. Optimizing the tilt angle of solar collectors. **Renewable Energy**, v. 26, n. 4, p. 587–598, 1 ago. 2002. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/S0960-1481(01)00106-9. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148101001069>>. Acesso em: 18 fev. 2020.
- SHARMA, V.K.; COLANGELO, A.; SPAGNA, G. Experimental performance of an indirect type solar fruit and vegetable dryer. en. **Energy Conversion and Management**, v. 34, n. 4, p. 293–308, abr. 1993. ISSN 01968904. DOI: 10.1016/0196-8904(93)90114-P. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/019689049390114P>>. Acesso em: 24 abr. 2020.
- SILVA, Edilene Santos da et al. Secagem de Grãos e Frutas: Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v. 5, n. 1, p. 19–23, 15 out. 2015. Number: 1. ISSN 2317-3114. Disponível em: <<https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/REBAGRO/article/view/3683>>. Acesso em: 31 mar. 2020.
- SINGH, Shobhana; KUMAR, Subodh. Development of convective heat transfer correlations for common designs of solar dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 64, p. 403–414, 1 dez. 2012. ISSN 0196-8904. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.06.017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890412002804>>. Acesso em: 5 dez. 2019.
- SODHA, M.S.; CHANDRA, Ram. Solar drying systems and their testing procedures: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 35, n. 3, p. 219–267, mar. 1994. ISSN 01968904. DOI: 10.1016/0196-8904(94)90004-3. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0196890494900043>>. Acesso em: 3 abr. 2020.
- TAMBUNAN, Armansyah H.; MANALU, Lamhot P.; ABDULLAH, Kamaruddin. Exergy Analysis on Simultaneous Charging and Discharging of Solar Thermal Storage for Drying Application. **Drying Technology**, v. 28, n. 9, p. 1107–1112, 31 ago. 2010. ISSN 0737-3937. DOI: 10.1080/07373937.2010.506171. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/07373937.2010.506171>>. Acesso em: 5 dez. 2019.

VÁSQUEZ, José; REYES; PAILAHUEQUE, Nicolás. Modeling, simulation and experimental validation of a solar dryer for agro-products with thermal energy storage system. **Renewable Energy**, v. 139, p. 1375–1390, 1 ago. 2019. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2019.02.085. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119302393>>. Acesso em: 11 jul. 2019.

VEERAMANIPRIYA, E.; UMayal Sundari, Ar. Performance evaluation of hybrid photovoltaic thermal (PVT) solar dryer for drying of cassava. en. **Solar Energy**, v. 215, p. 240–251, fev. 2021. ISSN 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2020.12.027. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X20312780>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

VIJAYAN, S.; ARJUNAN, T.V.; KUMAR, Anil. Exergo-environmental analysis of an indirect forced convection solar dryer for drying bitter gourd slices. en. **Renewable Energy**, v. 146, p. 2210–2223, fev. 2020. ISSN 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.066. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148119312534>>. Acesso em: 19 jan. 2022.

VIJAYAVENKATARAMAN, S.; INIYAN, S.; GOIC, Ranko. A review of solar drying technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 2652–2670, jun. 2012. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112000081>>. Acesso em: 31 mar. 2020.

APÊNDICE A

Programação módulo de coleta de dados

```
#include "HX711.h" //celula de carga
#define DS1307_ADDRESS 0x68
#include "Wire.h"
#include <OneWire.h> //comunicacao OneWire
#include <DallasTemperature.h> //sensor dallas DS18B20
#include <SPI.h> //para modulo SDcard
#include <SD.h> //para modulo SDcard
#define ONE_WIRE_BUS 7 // sensor DS18B20 conectado porta 7
#define resolu 12 //define a precisao do dallas 18B20
#include "Seeed_BME280.h" //sensor de umidade BME280
int i=0; //usada para forçar a tara da balança em zero – procedimento opcional !
char coma = 44;

void anemometro();
// ***** Inicio o relógio *****
//DS1307 rtc(SDA,SCL);
byte zero = 0x00;

//***** dados do anemometro*****

float vazao_ar;
float temp;
float temp1;
float umidade280_in;
float umidade280_out;
float temperatura280_in;
float temperatura280_out;
float pressao280_in;
```

```

float pressao280_out;
const int input_anemometro = A2;

//***** arquivo SDcard*****
File myFile;

//***** OneWier *****

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS); //comunicacao Onewire com qualquer dispositivo


//***** celula de carga com HX711 porta A0 A1*****
HX711 scale;
//HX711 scale_2;

//*****endereco dallas
        *****/

DallasTemperature sensors(&oneWire); //passa referencia OneWire para dallas


//Endereco do Sensor1
//DeviceAddress sensor1 = { 0x28, 0x60, 0xF5, 0x47, 0x06, 0x00, 0x00, 0x1E };
//Endereco do Sensor2
//DeviceAddress sensor2 = { 0x28, 0xAA, 0xB5, 0x47, 0x06, 0x00, 0x00, 0xA7 };
//Endereco do Sensor3
//DeviceAddress sensor3 = { 0x28, 0x19, 0x90, 0x47, 0x06, 0x00, 0x00, 0xD3 };
//Endereco do Sensor4
//DeviceAddress sensor4 = { 0x28, 0xFF, 0xF3, 0x28, 0x05, 0x16, 0x03, 0x5D };
//Endereco do Sensor5
DeviceAddress TempPlaca_Down = { 0x28, 0x39, 0x96, 0x47, 0x06, 0x00, 0x00, 0xF9
    }; //sensor inferiro na placa absorvedora
//Endereco do Sensor6
DeviceAddress Temp18b20_In = { 0x28, 0x24, 0x92, 0x47, 0x06, 0x00, 0x00, 0xF7 };
    //sensor dallas temperatura de entrada de ar
//Endereco do Sensor7
//DeviceAddress sensor7 = { 0x28, 0xFF, 0x9E, 0xF3, 0x04, 0x16, 0x03, 0x9E };
//Endereco do Sensor8
DeviceAddress TempPlaca_Medium = { 0x28, 0xFF, 0x61, 0x18, 0x75, 0x16, 0x04, 0
    x4D }; //sensor medioo na placa absorvedora
//Endereco do Sensor9
//DeviceAddress TempPlaca_Top = { 0x28, 0xFF, 0x32, 0xE0, 0x73, 0x16, 0x05, 0x74
    }; //sensor superior na placa absorvedora

```

```

//Endereco do Sensor10
DeviceAddress TempPlaca_Top = { 0x28, 0xFF, 0x17, 0x23, 0x75, 0x16, 0x03, 0xE3
    };
//Endereco do Sensor11
//DeviceAddress sensor11 = { 0x28, 0xFF, 0xD1, 0xC4, 0x73, 0x16, 0x05, 0x9E };
//Endereco do Sensor12
DeviceAddress TempPlaca2 = { 0x28, 0xFF, 0xEC, 0xF7, 0x73, 0x16, 0x05, 0x36 };//
    sensor placa externa inclinada acima do vidro
//Endereco do Sensor13
DeviceAddress TempCarga = { 0x28, 0xFF, 0x06, 0x13, 0x75, 0x16, 0x04, 0x99 };//
    sensor na balanca
//Endereco do Sensor14
//DeviceAddress TempPlaca_Top = { 0x28, 0xFF, 0x74, 0xFD, 0x74, 0x16, 0x04, 0x80
    };
//Endereco do Sensor15
DeviceAddress Temp18b20_Out = { 0x28, 0xFF, 0x27, 0xDB, 0x73, 0x16, 0x05, 0x06
    };//sensor dallas temperatura de saida de ar
//Endereco do Sensor16
//DeviceAddress sensor16 = { 0x28, 0xFF, 0x69, 0xFE, 0x74, 0x16, 0x04, 0x98 };
//Endereco do Sensor17
//DeviceAddress sensor17 = { 0x28, 0xFF, 0xD7, 0xE4, 0x72, 0x16, 0x04, 0x87 };
//Endereco do Sensor18
//DeviceAddress sensor18 = { 0x28, 0xFF, 0x55, 0xC2, 0x73, 0x16, 0x05, 0x43 };
//Endereco do Sensor19
//DeviceAddress sensor19 = { 0x28, 0xFF, 0x73, 0xF3, 0x73, 0x16, 0x05, 0xE0 };
//Endereco do Sensor20
//DeviceAddress sensor20 = { 0x28, 0xFF, 0xC0, 0x1F, 0x75, 0x16, 0x03, 0xB6 };
//Endereco do Sensor21
//DeviceAddress sensor21 = { 0x28, 0xFF, 0x2F, 0x14, 0x74, 0x16, 0x05, 0xE1 };
//Endereco do Sensor22
//DeviceAddress sensor22 = { 0x28, 0xFF, 0x9B, 0x33, 0x75, 0x16, 0x03, 0x31 };
//Endereco do Sensor23
//DeviceAddress sensor23 = { 0x28, 0xFF, 0x2F, 0x3E, 0x75, 0x16, 0x03, 0xFC };
DeviceAddress Temp18b20_RadCold = { 0x28, 0x13, 0x7B, 0x66, 0x04, 0x00, 0x00, 0
    x06 };//temp ambiente no radiometro
DeviceAddress Temp18b20_RadHot = { 0x28, 0xC6, 0x7C, 0x66, 0x04, 0x00, 0x00, 0
    x78 };//temp quente no radiometro
//DeviceAddress Temp18b20_Eletronica = { 0x28, 0x11, 0x44, 0xB4, 0x05, 0x00, 0
    x00, 0x2E };//temp no modulo que coleta os dados
/*//Endereco sensor bulbo seco
DeviceAddress sensorBS = { 0x28, 0xFF, 0x41, 0x1D, 0x71, 0x16, 0x03, 0x29 };
//Endereco sensor bulbo umido
DeviceAddress sensorBU1 = { 0x28, 0xFF, 0x93, 0xB0, 0x70, 0x16, 0x05, 0xB6 };
DeviceAddress sensorBU2 = { 0x28, 0xE5, 0x2B, 0x3E, 0x04, 0x00, 0x00, 0x97 }; //
    sensor blindado

```



```

*/

//*****BME280sensor de umidade
*****

BME280 bme280;//conect I2C – clock na porta 21 do Mega ou A0 UNO – SDA na porta
20 MEGA – address 0x76
BME280 bme280_2;//conect I2C – clock na porta 21 do Mega ou A0 UNO – address 0
x77


void setup()
{
// inicia a comunicacao com o computador
Serial.begin(9600);

pinMode(6, OUTPUT); //DEFINE O PINO COMO alimentacao HX711
digitalWrite(6,HIGH); //DEFINE O PINO COMO alimentacao HX711

//***** inicia o relógio*****

Wire.begin();

//*****inicia biblioteca do Dallas DS18B20*****
sensors.begin();

sensors.setResolution(Temp18b20_In, resolu);
sensors.setResolution(TempPlaca_Down, resolu);
sensors.setResolution(TempPlaca_Medium, resolu);
/*
sensors.setResolution(TempPlaca_Top, resolu);
*/
sensors.setResolution(Temp18b20_Out, resolu);
sensors.setResolution(Temp18b20_RadCold, resolu);
sensors.setResolution(Temp18b20_RadHot, resolu);
//sensors.setResolution(Temp18b20_Eletronica, resolu);
//sensors.setResolution(TempPlaca2, resolu);
sensors.setResolution(TempCarga, resolu);

```

```

//abre ou cria arquivo TXT
//*****SD card*****
while (!Serial)
{
    ; /* espera conexao serial */
    Serial.println(F("software 2.2.4 => abrindo cartao SD..."));

if (!SD.begin(10)) {
    Serial.println(F("erro na abertura do cartao!"));
    //return;
}

myFile = SD.open("dados.txt", FILE_WRITE);

if (myFile)
{
    //Serial.println(F("escrevendo em dados.txt..."));
    Serial.println(F("data,hora,R_in_280,R_out_280,T_in_280,T_out_280,P_atm_in,
        P_atm_out,T_in_18b20,T_placa_down,T_placa_medium,T_placa_top,T_placa2,
        T_Carga,T_out_18b20,T_18b20_radcold,T_18b20_radhot,radiacao,carga,
        vazao_ar_out"));
    myFile.println("data,hora,R_in_280,R_out_280,T_in_280,T_out_280,P_atm_in,
        P_atm_out,T_in_18b20,T_placa_down,T_placa_medium,T_placa_top,T_placa2,
        T_Carga,T_out_18b20,T_18b20_radcold,T_18b20_radhot,radiacao,carga,
        vazao_ar_out");
    myFile.close();

}
else
{
    //se o arquivo nao abrir, avise:
    Serial.println(F("erro ao abrir dados.txt"));
    //Serial.println(F("programa inetrrompido...sem o cartao"));
    Serial.println(F("data,hora,R_in_280,R_out_280,T_in_280,T_out_280,P_atm_in,
        P_atm_out,T_in_18b20,T_placa_down,T_placa_medium,T_placa_top,T_Carga,
        T_out_18b20,T_18b20_radcold,T_18b20_radhot,radiacao,carga,vazao_ar_out"))
        ;
}

//*****celula de carga com HX711 porta A0 A1*****
scale.begin(A1,A0);
//scale_2.begin(A3,A2);

```

```

scale.set_scale(1090.f); // this value is obtained by
    calibrating the scale with known weights; see the README for details
delay(50);
scale.tare(10); // reset the scale to 0

//***** anemometro *****/

pinMode(input_anemometro,INPUT);

//***** sensor umidade BME280
    *****/

bme280.init(0x76); //sensor saida
bme280_2.init(0x77); //sensor entrada

//*****/

}

void loop()
{

    //*****teste iniciando com a celula de carga HX711*****
digitalWrite(6,HIGH);
//digitalWrite(5,HIGH);
delay(500);

    scale.get_units(3), 1;
    temp1=scale.get_units(30);

/*
    scale_2.get_units(3), 1;
    temp2=scale_2.get_units(10);
*/

    //*****envia a data e hora*****

myFile = SD.open( "dados.txt" , FILE_WRITE);

Mostrarelogio();

```

```

// ***** BME280*****
umidade280_in=bme280_2.getHumidity();
umidade280_out=bme280.getHumidity();
temperatura280_in=bme280_2.getTemperature();
temperatura280_out=bme280.getTemperature();
pressao280_in=bme280_2.getPressure();
pressao280_out=bme280.getPressure();

if (myFile)
{

    myFile.print(umidade280_in);
    myFile.print(coma);

    myFile.print(umidade280_out);
    myFile.print(coma);

    myFile.print(temperatura280_in);
    myFile.print(coma);

    myFile.print(temperatura280_out);
    myFile.print(coma);

    myFile.print(pressao280_in);
    myFile.print(coma);

    myFile.print(pressao280_out);
    myFile.print(coma);

    Serial.print(umidade280_in); Serial.print(coma);
    Serial.print(umidade280_out); Serial.print(coma);

    Serial.print(temperatura280_in); Serial.print(coma);
    Serial.print(temperatura280_out); Serial.print(coma);

    Serial.print(pressao280_in); Serial.print(coma);

```

```

        Serial.print(pressao280_out); Serial.print(coma);

    }

else
    {

        Serial.print(umidade280_in); Serial.print(coma);
        Serial.print(umidade280_out); Serial.print(coma);

        Serial.print(temperatura280_in); Serial.print(coma);
        Serial.print(temperatura280_out); Serial.print(coma);

        Serial.print(pressao280_in); Serial.print(coma);
        Serial.print(pressao280_out); Serial.print(coma);

    }

//***** sensor temp. Dallas DS18B20*****
sensors.requestTemperatures();//comando para obter temperatura
if (myFile)
{
    temperatura(Temp18b20_In);
    myFile.print(temp);
    myFile.print(coma);
    Serial.print(temp);
    Serial.print(coma);

    temperatura(TempPlaca_Down);
    myFile.print(temp);
    myFile.print(coma);
    Serial.print(temp);
    Serial.print(coma);

    temperatura(TempPlaca_Medium);
    myFile.print(temp);
    myFile.print(coma);
    Serial.print(temp);
    Serial.print(coma);
}

```

```
temperatura(TempPlaca_Top);  
myFile.print("*"); // myFile.print(temp);  
myFile.print(coma);  
Serial.print("*"); //Serial.print(temp);  
Serial.print(coma);
```

```
temperatura(TempPlaca2);  
myFile.print(temp);  
myFile.print(",");  
Serial.print(temp);  
Serial.print(",");
```

```
temperatura(TempCarga);  
myFile.print(temp);  
myFile.print(coma);  
Serial.print(temp);  
Serial.print(coma);
```

```
temperatura(Temp18b20_Out);  
myFile.print(temp);  
myFile.print(coma);  
Serial.print(temp);  
Serial.print(coma);
```

```
temperatura(Temp18b20_RadCold);  
myFile.print(temp);  
myFile.print(coma);  
Serial.print(temp);  
Serial.print(coma);
```

```
temperatura(Temp18b20_RadHot);  
myFile.print(temp);  
myFile.print(coma);  
Serial.print(temp);  
Serial.print(coma);
```

```
myFile.print((sensors.getTempC(Temp18b20_RadHot)-sensors.getTempC(  
Temp18b20_RadCold))*37.6);  
myFile.print(coma);
```

```

        Serial.print ((sensors.getTempC(Temp18b20_RadHot)-sensors.getTempC
        (Temp18b20_RadCold))*37.6);
        Serial.print (coma);

    }

else {

    temperatura(Temp18b20_In);
    Serial.print (temp);
    Serial.print (" , ");

    temperatura(TempPlaca_Down);
    Serial.print (temp);
    Serial.print (" , ");

    temperatura(TempPlaca_Medium);
    Serial.print (temp);
    Serial.print (" , ");

    temperatura(TempPlaca_Top);
    Serial.print (temp);
    Serial.print (" , ");

    temperatura(TempPlaca2);
    Serial.print (temp);
    Serial.print (" , ");

    temperatura(TempCarga);
    Serial.print (temp);
    Serial.print (" , ");

    temperatura(Temp18b20_Out);
    Serial.print (temp);
    Serial.print (" , ");

    temperatura(Temp18b20_RadCold);
    Serial.print (temp);
    Serial.print (" , ");

    temperatura(Temp18b20_RadHot);
    Serial.print (temp);
    Serial.print (" , ");

```

```

        Serial.print ((sensors.getTempC(Temp18b20_RadHot)-sensors.getTempC
        (Temp18b20_RadCold))*37.6);
        Serial.print(",");

    }

//*****celula de carga HX711*****

if (myFile)
{
    myFile.print(temp1, 1);
    myFile.print(",");
    // myFile.print(temp2, 1);
    //myFile.print(coma);
    Serial.print(temp1, 1);
    Serial.print(",");

}

else {

    Serial.print(temp1, 1);
    Serial.print(",");

}

digitalWrite(6,LOW);

//*****velocidade do ar na saida*****

anemometro (0, 0.0942, 0.517); //equacao do anemometro v(x)=ax+bx+c

if (myFile)

```



```

{

    myFile.println(vazao_ar,2);
    myFile.close();
    Serial.println (vazao_ar,2);

}

else {

    Serial.println (vazao_ar);
    Serial.print (" ,");

    }

//*****tempo para nova leitura*****

pausa(900); //pausa o programa em segundos

}

//***** macros referenciadas no programa *****

void anemometro(float a, float b, float c) //equacao do anemometro v(x)=ax+bx+c
{
    float tempo_amostra = 0;
    float Time = 0;
    float tempo_atual;
    float Z,Y,X1,X2;
    int count=0;
    float frequency=0;

    tempo_atual = micros();

```

```

while (tempo_amostra <= 5e6)
{
    Z=0; Y=0;
    Z=pulseIn(input_anemometro,HIGH,1000000);
    Y=pulseIn(input_anemometro,LOW,1000000);
    count++;
    Time = Time + (Z+Y);
    tempo_amostra=micros()-tempo_atual;
}
if (count>=2&&Z>=2)
{
    frequency=(float)count*(1e6/(2*Time));
    X1=frequency;
    X2=X1*frequency;
    vazao_ar=(a*X2+b*X1+c)*1094.075*0.0038465;    //    g/s
    ;
}

else
{
    frequency=0;
    vazao_ar=0;
}

//Serial.print("frequencia: "); Serial.println(frequency);
}

void pausa(long unsigned int tempo_parada) //macro para pausar por um tempo (em
segundos) desejado
{
    long unsigned int tempo_inicial=millis;
    long unsigned int tempo_atual=millis;
    long unsigned int _tempo_parada=tempo_parada;
    char serial;
    do
    {
        tempo_atual=tempo_atual+500;

        //***** leitura do cartao *****
        serial=Serial.read();

        if (serial=='c')

```

```

{
  myFile = SD.open("dados.txt");
  if (myFile) {
    // read from the file until there's nothing else in it
    :
    while (myFile.available())
    {
      Serial.write(myFile.read());
    }

    // close the file:
    myFile.close();
  }
  else
  {
    // if the file didn't open, print an error:
    Serial.println("error opening dados.txt");
  }

}

//***** apaga cartao *****

  if (serial=='d')
  {
    if (SD.exists("dados.txt"))
    {
      SD.remove("dados.txt");
    }
  }

//***** faz nova leitura *****

  if (serial=='n')
  {
    tempo_atual=tempo_inicial+((tempo_parada)*1000);}

  delay(500);
}
while((tempo_atual-tempo_inicial)<((tempo_parada)*1000));
}

//***** refaz leitura dallas caso tenha erro *****
void temperatura(DeviceAddress _local)
{
  temp = -127;
  int i=0;

```

```

    while (temp<-100)
    {
        temp=sensors.getTempC(_local);
        i++;
        if (i>=3) break;
    }
}

//***** refaz leitura do relógio *****

byte ConverteParaBCD(byte val)
{
    // Converte o número de decimal para BCD
    return ( (val/10*16) + (val%10) );
}

byte ConverteparaDecimal(byte val)
{
    // Converte de BCD para decimal
    return ( (val/16*10) + (val%16) );
}

void Mostrarelogio()
{
    Wire.beginTransmission(DS1307_ADDRESS);
    Wire.write(zero);
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(DS1307_ADDRESS, 7);
    int segundos = ConverteparaDecimal(Wire.read());
    int minutos = ConverteparaDecimal(Wire.read());
    int horas = ConverteparaDecimal(Wire.read() & 0b111111);
    int diadasemana = ConverteparaDecimal(Wire.read());
    int diadomes = ConverteparaDecimal(Wire.read());
    int mes = ConverteparaDecimal(Wire.read());
    int ano = ConverteparaDecimal(Wire.read());
    // Imprime mensagem na primeira linha do display

    // Mostra a data atual no display

    if (diadomes < 10)
    {Serial.print("0");}
    Serial.print(diadomes);
    Serial.print(".");
    if (mes < 10)

```

```

{Serial.print("0");}
Serial.print(mes);
Serial.print(".");
Serial.print(ano);
Serial.print(",");

if (myFile)
{
    if (diadomes < 10)
    {myFile.print("0");}
    myFile.print(diadomes);
    myFile.print(".");
    if (mes < 10)
    {myFile.print("0");}
    myFile.print(mes);
    myFile.print(".");
    myFile.print(ano);
    myFile.print(",");
}

// Mostra a hora atual no display
if (horas < 10)
{Serial.print("0");}
Serial.print(horas);
Serial.print(":");
if (minutos < 10)
{Serial.print("0");}
Serial.print(minutos);
Serial.print(":");
if (segundos < 10)
{Serial.print("0");}
Serial.print(segundos);
Serial.print(",");

if (myFile)
{
    if (horas < 10)
    {myFile.print("0");}
    myFile.print(horas);
    myFile.print(":");
    if (minutos < 10)
    {myFile.print("0");}
    myFile.print(minutos);
}

```

```
myFile.print(":");  
if (segundos < 10)  
{myFile.print("0");}  
myFile.print(segundos);  
myFile.print(",");  
}  
}
```

Código GNU Octave

108

```

datestr(data_c, 'dd/mm/YY - HH:MM')

%% Separando as colunas
%% R_in_280 R_in_corrig(eliminado) R_out_280 T_in_280716746 T_out_280 P_atm_in
    P_in_corrig(eliminado) P_atm_out T_in_18b20 T_placa_down T_placa_medium
    T_placa_top T_Carga T_out_18b20 T_18b20_radcold T_18b20_radhot radiacao
    carga carga_corrig vazao

matriz=a{2};
dPin=15;
dRin=1;

Rin=matriz(:,1)-dRin;
Rout=matriz(:,2);
Tin=matriz(:,3);
Tout=matriz(:,4);
Pin=matriz(:,5)-dPin;
Pout=matriz(:,6);
Tind=matriz(:,7);
Tp1=matriz(:,8);
Tp2=matriz(:,9);
Tp3=matriz(:,10);

Tcarga=matriz(:,11);
Toutd=matriz(:,12);
Tradc=matriz(:,13);
Tradh=matriz(:,14);
rad=matriz(:,15);
carga=matriz(:,16) -22.78-(1.2342*Tcarga-38.546);

vazao=matriz(:,17)/1000;

%% ----- Calculando Coolprop

Win=zeros(length(horas_str),1);
Wout=Win;

for i=1:length(horas_str)
    Win(i)=CoolProp.HAPropsSI('W', 'T', Tind(i)+273.15, 'P', Pin(i), 'R', Rin(i)
        /100);
    hin(i)=CoolProp.HAPropsSI('H', 'T', Tind(i)+273.15, 'P', Pin(i), 'R', Rin(i)
        /100);

```



```

        Wout(i)=CoolProp.HAPropsSI( 'W', 'T', Tout(i)+273.15, 'P', Pout(i), 'R', Rout
            (i)/100);
        hout(i)=CoolProp.HAPropsSI( 'H', 'T', Tout(i)+273.15, 'P', Pout(i), 'R', Rout
            (i)/100);
    end

    for i=1:length(horas_str)
        Densidadeout(i)=CoolProp.HAPropsSI( 'V', 'T', Toutd(i)+273.15, 'P', Pout(i),
            'R', Rout(i)/100);
        vazao(i)=(vazao(i)/1.094)*CoolProp.HAPropsSI( 'V', 'T', Toutd(i)+273.15, 'P',
            Pout(i), 'R', Rout(i)/100);
    end

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Calculando a eficiencia

    efic=(vazao.*(hout-hin)')./(rad/2)*100;

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Calculando os limites de horas do grafico
    hora_inf= datenum( "10:00", "HH:MM")-hora00;
    hora_sup= datenum( "17:00", "HH:MM")-hora00;

    %%% Plotando dados
    %% Para acertar os pontos foi retirado o valor da data!

    %%% Temperaturas na placa absorvedora
    clf
    figure(1);
    hFig=figure(1);
    setenv( 'GNUTERM', 'qt' );
    setenv( 'ENCODING', 'UTF8' );
    set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto')
    set(gcf, 'PaperSize', [650 850])
    set(gcf, 'Position', [-50 0 650 850])
    x=horas_n-hora00;
    y=[Tp1, Tp2, Tp3]-Trad;
    % formato={'-*g', "--+r", "-.ob", "--k"};
    [AX H1 H2]=plotyy(x,y,x,rad, 'plot');
    datetick(AX(1), 'x', "%H:%M")
    datetick(AX(2), 'x', "%H:%M")
    xlabel( 'Horario' );

```

```

set(AX(1), 'ylabel', '\Delta T [K]');
set(AX(2), 'ylabel', 'Radiacao [w/m{\wedge}2]');
set(AX(1), 'ycolor', 'k');
set(AX(2), 'ycolor', 'k');
set(H1(1), 'LineStyle', '-', 'Marker', '+', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'b');
set(H1(2), 'LineStyle', '-', 'Marker', 'o', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'm');
set(H1(3), 'LineStyle', '-', 'Marker', '*', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'r');
set(H2(1), 'LineStyle', '—', 'Marker', 'none', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'g');
leg=legend('Baixo', 'Medio', 'Elevado', 'Radiacao', 'location', 'northwest');
title(['temperaturta da placa abasorvedora'; 'placa media']);
legend boxoff;
set(AX(1), 'xgrid', 'on', 'ygrid', 'on');
set(AX(1), 'gridlinestyle', ':', 'gridcolor', 'black', 'gridalpha', 0.2);
print('-dpng', 'tempplaca.png');
print('-depsc2', 'tempplaca.eps');

%mevw=vazaocorrig.*(Wout-Win)*1000;
mevw=vazao.*(Wout-Win)*1000;

for i=1:(length(horas_str)-1)
    dcarg(i)=-(carga(i+1)-carga(i))/(x(i+1)-x(i))/24/3600; % negativo para
        ajustar o sinal....
    xmod(i)=(x(i)+x(i+1))/2;

end

%%%% taxa evaporacao
%{ figure(2);
gFig=figure(2);
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto')
set(gcf, 'PaperSize', [650 850])
set(gcf, 'Position', [-50 0 650 850])

fig=plot(x, mevw*60, '-*g', xmod, dcarg*60, '—+r');
datetick('x', '%H:%M');
xlabel('Horario');
ylabel('Evaporacao [g/min]');
set(leg, 'interpreter', 'latex');
set(leg, 'FontSize', 10)

```

```

leg=legend("Umidade","Balanca");
title(["evaporacao";"placa media"]);
legend boxoff;
axis([hora_inf hora_sup 0 Inf])
print('-dpng','evapora.png');
print('-depsc2','evapora.eps');
%}

clf

figure(2);
gFig=figure(2);
setenv('GNUTERM','qt');
setenv('ENCODING','UTF8');
set(gcf,'PaperPositionMode','auto')
set(gcf,'PaperSize',[650 850])
set(gcf,'Position',[-50 0 650 850])

[hax, h1, h2] = plotyy(xmod,dcarg*60,x,rad);
hold(hax(1));
plot(hax(1),x,mevw*60(1),'Marker','+','MarkerSize',6,'Color','m');

xlabel('Horario');
ylabel('Evaporacao [g/min]');

axis([hora_inf hora_sup 0 Inf]);
datetick(hax(1),'x','%H:%M');
datetick(hax(2),'x','%H:%M');
set(hax(2),'ylabel','Radiacao [w/m{\wedge}2]');
set(hax(1),'ycolor','k');
set(hax(2),'ycolor','k');

set(h1(1),'LineStyle','-','Marker','+','MarkerSize',6,'Color','b');
set(h2(1),'LineStyle','—','Marker','none','MarkerSize',6,'Color','g');
%set(hax(1),'gridlinestyle',':','gridcolor','black','gridalpha',0.2);

leg=legend("Umidade","Balanca","radiacao","location","northwest");
title(["evaporacao";"placa media"]);
legend boxoff;

print('-dpng','evapora.png');
print('-depsc2','evapora.eps');

```

```

clear ax;
clear h1;
clear h2;

%%%% vazao de ar
clear AX;
clear H1;
clear H2;
figure(3);
aFig=figure(3);
setenv('GNUTERM', 'qt');
setenv('ENCODING', 'UTF8');
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto')
set(gcf, 'PaperSize', [650 850])
set(gcf, 'Position', [-50 0 650 850])
x=horas_n-hora00;
% formato={'-*g', "--+r", "-.ob", "--k"};
[AX H1 H2]=plotyy(x, vazao, x, rad, 'plot');
datetick(AX(1), 'x', '%H:%M')
datetick(AX(2), 'x', '%H:%M')
xlabel('Horario');
set(AX(1), 'ylabel', 'vazao kg/s');
set(AX(2), 'ylabel', 'Radiacao [w/m{\wedge}2]');
set(AX(1), 'ycolor', 'k');
set(AX(2), 'ycolor', 'k');
set(H1(1), 'LineStyle', '-', 'Marker', '+', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'b');
%set(H1(2), 'LineStyle', '-', 'Marker', 'o', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'm');
%set(H1(3), 'LineStyle', '-', 'Marker', '*', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'r');
set(H2(1), 'LineStyle', '-', 'Marker', 'none', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'g');
leg=legend('vazao e ar', 'radiacao', 'location', 'northwest');
title(['vazao de ar'; 'placa media']);
legend boxoff;
set(AX(1), 'xgrid', 'on', 'ygrid', 'on');
set(AX(1), 'gridlinestyle', ':', 'gridcolor', 'black', 'gridalpha', 0.2);
print('-dpng', 'vazao.png');
print('-depsc2', 'vazao.eps');

%%%% temperatura do ar
clear AX;
clear H1;
clear H2;
figure(4);
bFig=figure(4);
setenv('GNUTERM', 'qt');

```

```

setenv('ENCODING', 'UTF8');
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto')
set(gcf, 'PaperSize', [650 850])
set(gcf, 'Position', [-50 0 650 850])
x=horas_n-hora00;
% formato={'-*g', "--+r", "-.ob", "--k"};
b=[Tin,Tout];
[AX H1 H2]=plotyy(x,b,x,rad, 'plot');
datetick(AX(1), 'x', "%H:%M")
datetick(AX(2), 'x', "%H:%M")
xlabel('Horario');
set(AX(1), 'ylabel', 'temperatura [{\circ}c]');
set(AX(2), 'ylabel', 'Radiacao [w/m{\wedge}2]');
set(AX(1), 'ycolor', 'k');
set(AX(2), 'ycolor', 'k');
set(H1(1), 'LineStyle', '-', 'Marker', '+', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'b');
set(H1(2), 'LineStyle', '-', 'Marker', 'o', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'm');
%set(H1(3), 'LineStyle', '-', 'Marker', '*', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'r');
set(H2(1), 'LineStyle', '-', 'Marker', 'none', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'g');
leg=legend("ar entrada", "ar saida", "radiacao", "location", "northwest");
title(['temperatura do ar de entrada e de saida'; "placa media"]);
legend boxoff;
set(AX(1), 'xgrid', 'on', 'ygrid', 'on');
set(AX(1), 'gridlinestyle', ':', 'gridcolor', 'black', 'gridalpha', 0.2);
print('-dpng', 'Tin_Tout_ar.png');
print('-depssc2', 'Tin_Tout_ar.eps');

%%% umidade relativa in out
clear AX;
clear H1;
clear H2;
figure(5);
cFig=figure(5);
setenv('GNUTERM', 'qt');
setenv('ENCODING', 'UTF8');
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto')
set(gcf, 'PaperSize', [650 850])
set(gcf, 'Position', [-50 0 650 850])
x=horas_n-hora00;
% formato={'-*g', "--+r", "-.ob", "--k"};
b=[Rin,Rout];
[AX H1 H2]=plotyy(x,b,x,rad, 'plot');
datetick(AX(1), 'x', "%H:%M")
datetick(AX(2), 'x', "%H:%M")
xlabel('Horario');

```

```

set(AX(1), 'ylabel', 'temperatura [{\circ}c] ');
set(AX(2), 'ylabel', 'Radiacao [w/m{\wedge}2] ');
set(AX(1), 'ycolor', 'k');
set(AX(2), 'ycolor', 'k');
set(H1(1), 'LineStyle', '-', 'Marker', '+', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'b');
set(H1(2), 'LineStyle', '-', 'Marker', 'o', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'm');
%set(H1(3), 'LineStyle', '-', 'Marker', '*', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'r');
set(H2(1), 'LineStyle', '—', 'Marker', 'none', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'g');
leg=legend('ar entrada', 'ar saida', 'radiacao', 'location', 'northwest');
title(['Humidade relativa do ar de entrada e de saida'; 'placa media']);
legend boxoff;
set(AX(1), 'xgrid', 'on', 'ygrid', 'on');
set(AX(1), 'gridlinestyle', ':', 'gridcolor', 'black', 'gridalpha', 0.2);
print('-dpng', 'Rin_Rout_ar.png');
print('-depsc2', 'Rin_Rout_ar.eps');

%%%% evaporacao acumulada

g_H2O=vazao.*(Wout-Win)*15*60*1000;

for i=1:(length(horas_str)-1)
    if (i==1)
        carga_ac(i)=-(carga(i+1)-carga(i));
        cargaBME_ac(i)=g_H2O(i+1)+g_H2O(i);
        x_ac(i)=x(i+1);
        rad_ac(i)=rad(i+1);
    else
        carga_ac(i)=-(carga(i+1)-carga(i)); % negativo para ajustar o sinal....
        carga_ac(i)=carga_ac(i)+carga_ac(i-1);
        x_ac(i)=x(i+1);
        cargaBME_ac(i)=g_H2O(i+1)+cargaBME_ac(i-1);
        rad_ac(i)=rad(i+1);
    endif
end

carga_ac=carga_ac';
x_ac=x_ac';
cargaBME_ac=cargaBME_ac';
rad_ac=rad_ac';

clear AX;
clear H1;
clear H2;

```

```

figure(6);
dFig=figure(6);
setenv('GNUTERM', 'qt');
setenv('ENCODING', 'UTF8');
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto')
set(gcf, 'PaperSize', [650 850])
set(gcf, 'Position', [-50 0 650 850])
x=horas_n-hora00;
% formato={'-*g', "--+r", "-.ob", "--k"};
b=[carga_ac, cargaBME_ac];
[AX H1 H2]=plotyy(x_ac,b,x_ac,rad_ac, 'plot');
xlabel('Horario');
datetick(AX(1), 'x', '%H:%M')
datetick(AX(2), 'x', '%H:%M')
set(AX(1), 'ylabel', 'temperatura [{\circ}c]');
set(AX(2), 'ylabel', 'Radiacao [w/m{\wedge}2]');
set(AX(1), 'ycolor', 'k');
set(AX(2), 'ycolor', 'k');
set(H1(1), 'LineStyle', '-', 'Marker', '+', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'm');
set(H1(2), 'LineStyle', '-', 'Marker', 'o', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'b');
set(H2(1), 'LineStyle', '--', 'Marker', 'none', 'MarkerSize', 6, 'Color', 'g');
leg=legend("celula de carga", "sensor umidade", "radiacao", "location", "northwest")
;
title(['evaporacao acumulada'; "placa media"]);
legend boxoff;
set(AX(1), "xgrid", 'on', "ygrid", 'on');
set(AX(1), 'gridlinestyle', ":", 'gridcolor', 'black', 'gridalpha', 0.2);
print('-dpng', 'evaporacao_ac.png');
print('-depsc2', 'evaporacao_ac.eps');

%%%% eficiencia

clear AX;
clear H1;
clear H2;
figure(7);
fFig=figure(7);
setenv('GNUTERM', 'qt');
setenv('ENCODING', 'UTF8');
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto')
set(gcf, 'PaperSize', [650 850])
set(gcf, 'Position', [-50 0 650 850])
x=horas_n-hora00;
% formato={'-*g', "--+r", "-.ob", "--k"};

```

```

[AX H1 H2]=plotyy(x,efic,x,rad,'plot');
xlabel('Horario');
datetick(AX(1),'x','%H:%M')
datetick(AX(2),'x','%H:%M')
set(AX(1),'ylabel','eficiencia %');
set(AX(2),'ylabel','Radiacao [w/m{\wedge}2]');
set(AX(1),'ycolor','k');
set(AX(2),'ycolor','k');
set(H1(1),'LineStyle','-','Marker','+','MarkerSize',6,'Color','m');
set(H2(1),'LineStyle','—','Marker','none','MarkerSize',6,'Color','g');
leg=legend('eficiencia','radiacao','location','northwest');
title(['eficiencia termica';'placa media']);
legend boxoff;
set(AX(1),'xgrid','on','ygrid','on');
set(AX(1),'gridlinestyle',':','gridcolor','black','gridalpha',0.2);
print('-dpng','eficiencia.png');
print('-depsc2','eficiencia.eps');

```


APÊNDICE C

Estrutura de pastas OpenFoam

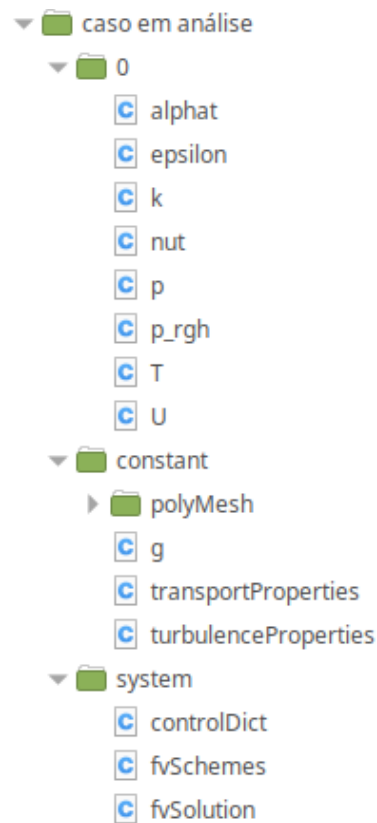


Figura C.1: Estruturação das pastas e arquivos do software OpenFoam

APÊNDICE D

Incerteza na instrumentação

A análise do secador se baseia na instrumentação nele instalada, a qual está sujeita a incertezas nas medições realizadas (HOLMAN, 2007). Ao usar esses valores no cálculo de outras grandezas, as incertezas são propagadas e podem ser avaliadas pelo critério de incerteza provável com o valor do RMS (*Root Mean Square*) dos valores obtidos.

Assim, uma função no formato $Y = F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$, onde $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, são os valores das grandezas de entrada da função.

Desenvolvendo a função em série de Taylor de 1º ordem para variações em torno das médias de X_i e Y :

$$Y - \bar{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial X_i} (X_i - \bar{X}) \quad (\text{D.0})$$

onde $\frac{\partial F}{\partial X_i}$ é denominado coeficiente de sensibilidade de Y às entradas X .

Fazendo o quadrado da expansão de Taylor

$$(Y - \bar{Y})^2 = \left[\sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial X_i} (X_i - \bar{X}) \right]^2 \quad (\text{D.0})$$

como a variância (S^2) é dada pelo quadrado da diferença, a Apêndice D pode ser expandida:

$$(S_y)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial X_i} S_{X_i} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n \frac{\partial F}{\partial X_i} \frac{\partial F}{\partial X_j} S_{X_i} S_{X_j} CC_{ij} \quad (\text{D.0})$$

onde CC_{ij} é o coeficiente de correlação entre X_i e X_j . Quando as grandezas de entrada X não têm correlação, $CC_{ij} = 0$, resultando na Apêndice D (HOLMAN, 2007):

$$(S_y)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial X_i} S_{X_i} \right)^2 \quad (\text{D.0})$$

D.0.1 Velocidade e vazão de ar

A velocidade de ar é calculada com o uso da curva de calibração apresentada na Figura 4.9, na qual está relacionada com os pulsos medidos pelo sensor na turbina sob um tempo definido, que tem o seguinte formato:

$$u_{air}(freq) = CV_1 \cdot freq + CV_2 \quad (D.0)$$

onde $freq$: frequência obtida pelo sensor;
 CV_1 : constante angular da curva de calibração do sensor;
 CV_2 : constante linear da curva de calibração do sensor.

Aplicando a Equação D na Equação D.0.1, obtem a Subseção D.0.1:

$$S_{U_{air}} = \left[\left(\frac{\partial U_{air}}{\partial CV_1} \cdot S_{CV_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_{air}}{\partial freq} \cdot S_{freq} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_{air}}{\partial CV_2} \cdot S_{CV_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (D.0)$$

Calculando as derivadas da Equação D.0.1, temos a equação da incerteza relacionada a velocidade do ar úmido.

$$S_{U_{air}} = \left[(freq \cdot S_{CV_1})^2 + (CV_1 \cdot S_{freq})^2 + (S_{CV_2})^2 \right]^{1/2} \quad (D.0)$$

A incerteza relacionada a frequência (S_{freq}) é muito baixa, pois o módulo usado tem a velocidade de processamento elevada, podendo ser desconsiderada. A incerteza relacionada aos coeficientes angulares e lineares da curva de calibração são calculados pela função "PROJ.LIN" no *software* LibreOffice Calc, função esta que calcula as estatísticas dos dados usados na formação da linha de tendência e retorna uma matriz de valores que descreve essa linha. Os valores dos coeficientes angulares e lineares são:

$$S_{CV_1} = 0,0004756$$

$$S_{CV_2} = 0,0051377$$

Para o cálculo da vazão mássica de ar que circula pelo secador, usa-se a equação da velocidade do ar multiplicada pela densidade do ar (ρ) e pela área livre do anemômetro ($A_a = 1/4 \cdot \pi \cdot D_a^2$), conforme Equação 4.3. Aplicando sobre essa equação a metodologia da propagação de incerteza, Equação D, obtém-se a incerteza relacionada a vazão de ar.

$$S_{\dot{m}} = \left[\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial D_a} \cdot S_{D_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial CV_1} \cdot S_{CV_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial freq} \cdot S_{freq} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial CV_2} \cdot S_{CV_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (D.0)$$

onde D_a : diâmetro do anemômetro.

Calculando as derivadas parciais da Equação D.0.1 e reorganizando os termos, obtém-se:

$$S_{\dot{m}} = \left\{ \left(\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_a \right)^2 \cdot \left[\left(2 \cdot S_{D_a} \cdot (CV_1 \cdot freq + CV_2) \right)^2 + D_a^2 \cdot (S_{U_{air}}) \right] \right\}^{1/2} \quad (D.0)$$

onde $D_a = 0,08\text{m}$ e $S_{D_a} = 5 \cdot 10^{-5}\text{m}$, sendo a metade do menor intervalo do paquímetro utilizado para realizar a medição do diâmetro do anemômetro.

D.0.2 Sensor de temperatura

Os sensores de temperatura utilizado tem o valor máximo de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ de variação, conforme informado no *datasheet* do fabricante.

Para o cálculo da propagação da incerteza entre a temperatura da placa absorvedora e a temperatura ambiente, se faz uso da equação:

$$S_{\Delta T} = \left[\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial T_1} \cdot S_{T_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial T_2} \cdot S_{T_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (D.0)$$

onde os índices 1 e 2 representam temperaturas arbitrárias. Sendo $\partial T_1 = \partial T_2 = \partial T$ e $\frac{\partial \Delta T}{\partial T_1} = \frac{\partial \Delta T}{\partial T_2} = 1$, portanto:

$$S_{\Delta T} = \partial T \cdot \sqrt{2} = 0,5 \cdot 1,412 = 0,707^\circ\text{C} \quad (D.0)$$

D.0.3 Radiômetro

Para o uso do sensor de radiação há uma curva de calibração composta pela diferença de temperaturas obtidas pelos seus sensores, cujo erro padrão foi descrito na seção anterior, e representada pela Equação D.0.3:

$$G_t = (T_{abs} - T_{amb}) \cdot C_R \quad (D.0)$$

onde G_t : Radiação incidente no sensor;
 T_{abs} : Temperatura da placa absorvedora do sensor;
 T_{amb} : Temperatura ambiente;
 C_R : Coeficiente angular.

Aplicando na Equação D.0.3 a Equação D, obtém:

$$S_{G_t} = \left[\left(\frac{\partial G_t}{\partial T_{abs}} \cdot S_{T_{abs}} \right)^2 + \left(\frac{\partial G_t}{\partial T_{amb}} \cdot S_{T_{amb}} \right)^2 + \left(\frac{\partial G_t}{\partial C_R} \cdot S_{C_R} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (D.0)$$

calculando as derivadas parciais obtém:

$$S_{G_t} = \left\{ (C_R \cdot S_{T_q})^2 + (-C_R \cdot S_{T_{amb}})^2 + \left[(T_{abs} - T_{amb}) \cdot S_{C_R} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (D.0)$$

A incerteza relativa ao coeficiente angular $C_R = 37,6 \text{ W}/(m^2K)$ da curva de calibração é novamente calculado com o auxílio da função PROJ.LIN no *software* LibreOffice Calc, sendo o valor obtido de $S_{C_R} = \pm 0,882 \text{ W}/(m^2K)$.

D.0.4 Área da placa absorvedora

A área da placa (A_c) tem o formato retangular, sendo calculada através do comprimento, $C_c = 1 \text{ m}$, vezes a largura, $L_c = 0,5 \text{ m}$. Para o calculo da incerteza aplica-se a Equação D na equação do calculo da área do retângulo.

$$S_{A_c} = \left[\left(\frac{\partial A_c}{\partial C_c} \cdot S_{C_c} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_c}{\partial L_c} \cdot S_{L_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (D.0)$$

Calculando as derivadas na Equação D.0.4, obtém a equação:

$$S_{A_c} = \left[(L_c \cdot S_{C_c})^2 + (C_c \cdot S_{L_c})^2 \right]^{1/2} \quad (D.0)$$

O instrumento utilizado para a medição da placa foi uma trena com o menor intervalo de leitura de 0,00 1m, sendo assim, foi adotado a incerteza da trena como sendo o valor da metade do menor intervalo de leitura $S_{L_c} = S_{C_c} = 0,0005 \text{ m}$, resultando $S_{A_c} = 0,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

D.0.5 Eficiência Térmica

Expandindo a equação da eficiência térmica, 4.1, através da substituição da equação 4.2 e 4.3, obtém:

$$\eta = \frac{(h_{out} - h_{in}) \cdot \rho \cdot u_{air} \cdot A_a}{A_c \cdot G_t} \quad (D.0)$$

Aplicando a equação D na equação D.0.5, obtém a incerteza da eficiência térmica:

$$S_\eta = \left[\left(\frac{\partial \eta}{\partial h_{out}} \cdot S_{h_{out}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial h_{in}} \cdot S_{h_{in}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial u_{air}} \cdot S_{u_{air}} \right)^2 + \right. \\ \left. \left(\frac{\partial \eta}{\partial A_a} \cdot S_{A_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial A_c} \cdot S_{A_c} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial G_t} \cdot S_{G_t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (D.0)$$

Calculando as derivadas na equação D.0.5, obtém:

$$\begin{aligned}
S_\eta = & \left[\left(\frac{A_a \cdot \rho \cdot u_{air}}{A_c \cdot G_t} \cdot Sh_{out} \right)^2 + \left(- \frac{A_a \cdot \rho \cdot u_{air}}{A_c \cdot G_t} \cdot Sh_{in} \right)^2 + \left(\frac{A_a \cdot \rho \cdot (h_{out} - h_{in})}{A_c \cdot G_t} \cdot Su_{air} \right)^2 + \right. \\
& \left(\frac{A_a \cdot u_{air} \cdot (h_{out} - h_{in})}{A_c \cdot G_t} \cdot S_\rho \right)^2 + \left(\frac{\rho \cdot u_{air} \cdot (h_{out} - h_{in})}{A_c \cdot G_t} \cdot S_{A_a} \right)^2 + \\
& \left. \left(- \frac{A_a \cdot \rho \cdot u_{air} \cdot (h_{out} - h_{in})}{A_c^2 \cdot G_t} \cdot S_{A_c} \right)^2 + \left(- \frac{A_a \cdot \rho \cdot u_{air} \cdot (h_{out} - h_{in})}{A_c \cdot G_t^2} \cdot S_{G_t} \right)^2 \right]^{1/2}
\end{aligned} \tag{D.0}$$

O fator principal que altera o valor obtido de ρ , h_{out} e h_{in} é a temperatura e como o erro padrão da temperatura é baixo, resultando nos termos Sh_{out} , Sh_{in} e S_ρ muitos baixos, podendo ser desprezados na Equação D.0.5.

APÊNDICE E

Curva calibração radiômetro

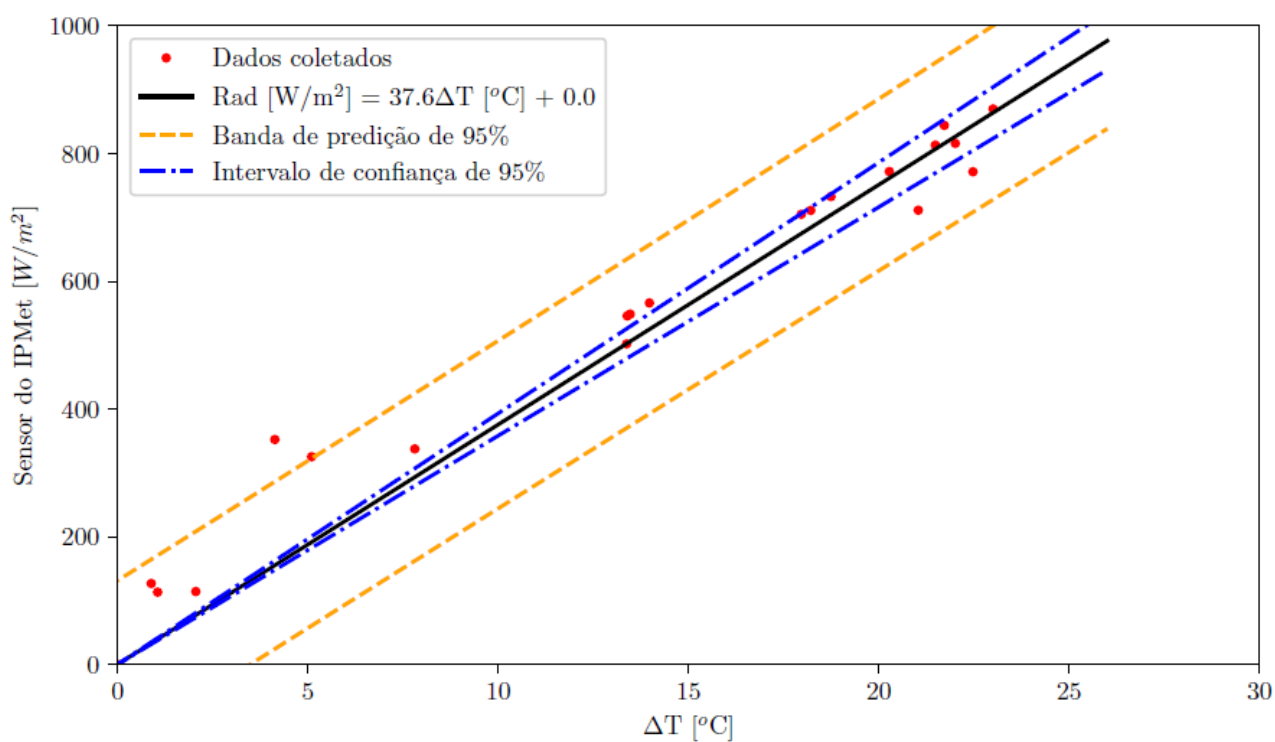


Figura E.1: Curva de calibração do radiômetro. Fonte Rafael Paiva Garcia (2019)

APÊNDICE F

Curva calibração anemômetro

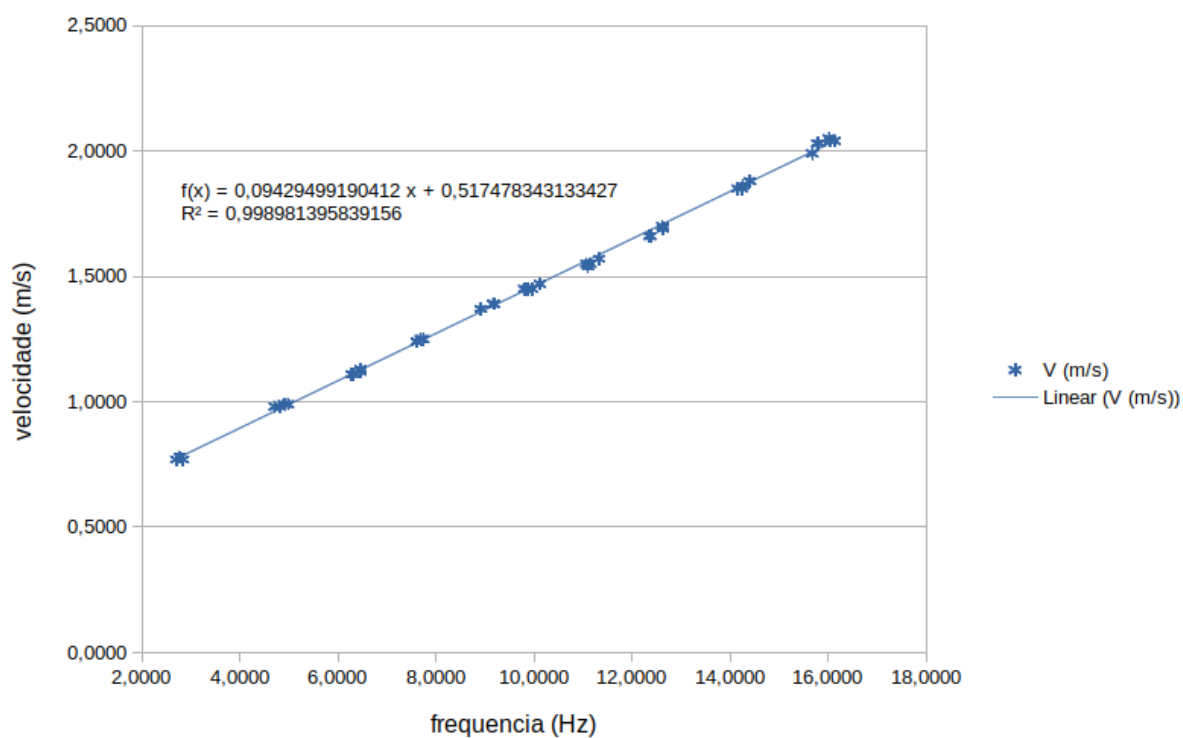


Figura F.1: Curva de calibração do anemômetro tipo turbina.
Fonte: Autor (2021).