



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VICTOR AUGUSTO CAVALCANTE BEZERRA MENEZES

**DESIDRATADOR DE PRODUTOS NATURAIS VIA AR AQUECIDO OPERANTE
POR MEIO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

FORTALEZA

2022

VICTOR AUGUSTO CAVALCANTE BEZERRA MENEZES

DESIDRATADOR DE PRODUTOS NATURAIS VIA AR AQUECIDO OPERANTE
POR MEIO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida

Fortaleza

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M513d Menezes, Victor Augusto Cavalcante Bezerra.
Desidratador de Produtos Naturais Via Ar Aquecido Operante Por Meio de Energia Solar Fotovoltaica
/ Victor Augusto Cavalcante Bezerra Menezes. – 2022.
82 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Ana Fabíola Leite Almeida.

1. Desidratador Solar. 2. Energia Fotovoltaica. 3. Produtos Naturais. I. Título.

CDD 620.1

VICTOR AUGUSTO CAVALCANTE BEZERRA MENEZES

DESIDRATADOR DE PRODUTOS NATURAIS VIA AR AQUECIDO OPERANTE
POR MEIO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 09/09/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Ana Fabíola Leite Almeida (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

A Deus.

Aos meus pais, Augusto e Mônica.

Ao meu irmão, Caio.

Às minhas tias, Ana Clédina e Ana Célia.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Aos meus familiares, por todo o apoio e incentivo dados aos meus estudos, desenvolvimento humano e minhas necessidades.

À Profa. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida, pela excelente orientação.

À Ana Paula do Nascimento Silva, por fornecer e ajudar com o embarque do equipamento desidratador.

Aos professores participantes da banca examinadora, Francisco Nivaldo Aguiar Freire e Daniel Xavier Gouveia, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao meu irmão e engenheiro eletricitista, Caio César Cavalcante Bezerra Menezes, e ao colega de laboratório e professor, Paulo Herbert França Maia Júnior, pelas grandes e valiosas contribuições dadas com relação ao equipamento.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

A todos aqueles que me ajudaram de alguma maneira: a minha sincera gratidão.

“A imaginação muitas vezes nos
leva a mundos que nunca
existiram, mas sem isso nós não
vamos a lugar algum.”

Carl Sagan

RESUMO

Realizou-se a restauração e a otimização do desidratador de produtos naturais via ar aquecido operante por meio de energia solar fotovoltaica e instalou-se sensores e atuadores. Comprou-se quatro fusíveis novos e reparou-se a borracha de vedação da câmara de secagem. Quanto à otimização do equipamento, armazenou-se a maioria dos componentes elétricos que compõem o sistema de geração em um quadro de energia, instalou-se o par de módulos fotovoltaicos na plataforma localizada acima do laboratório, adquiriu-se um exaustor (com adaptação de um bocal), um dimmer, um novo inversor e um novo controlador de carga, além da abertura de um furo lateral na câmara de secagem, para melhor saída do ar úmido. Feitas essas atividades, realizou-se a aquisição dos sensores e dos atuadores utilizados nos experimentos. O microcontrolador utilizado para obtenção e armazenamento de dados encontra-se presente em uma placa compatível com Arduino Mega 2560. Adquiriu-se e ligou-se à placa três sensores de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar (DHT22) e um sensor de corrente elétrica (ACS712), além de um módulo de cartão micro SD e um cartão de memória. Elaborou-se o código que obtém e armazena os dados. Adquiriu-se também um termopar do tipo J. Após a realização dessas atividades, iniciou-se os experimentos, utilizando-se três bandejas para desidratar maçã e banana fatiadas. Cada tipo de fruta foi desidratado durante catorze horas, uma fruta por vez. Fotografou-se e pesou-se as frutas antes da desidratação. Após as catorze horas, fotografou-se e pesou-se novamente as frutas, obtendo-se uma redução percentual de massa nas bandejas inferior, intermediária e superior de 72%, 79% e 78% para maçã e 66%, 62% e 63% para banana, respectivamente. O sensor DHT22 1 forneceu valores médios de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar ambiente de 25,8 °C e 43,9 %, para maçã, e 26,0 °C e 42,9 %, para banana. Para ambas as frutas, plotou-se gráficos de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar na entrada e na saída da câmara, em função do tempo de desidratação. Obteve-se também os valores eficazes médios de intensidade de corrente elétrica e potência dissipada (ambas na resistência elétrica) de 1,070 A e 235,34 W (para maçã) e 1,054 A e 231,95 W (para banana). Por fim, concluiu-se que os objetivos foram alcançados, que o equipamento funcionou adequadamente (após restauração e otimização); que as frutas perderam grande parte de sua massa total de água (após as 14 h de desidratação) e que houve equilíbrio psicrométrico na câmara de secagem.

Palavras-chave: Desidratador Solar. Energia Fotovoltaica. Produtos Naturais.

ABSTRACT

The both restoration and optimization of the heated air, photovoltaic solar energy-operated, natural products dehydrator have been done, and both sensors and actuators were installed. Four new fuses were purchased, and the drying chamber sealing rubber was repaired. As for the equipment optimization, most of the electrical components which make up the generation system were stored in a power board, the photovoltaic modules pair have been installed on the platform located above the laboratory, it has been acquired an exhaust fan (with a nozzle adaptation), a dimmer, a new inverter and a new charge controller, in addition to a side hole opening in the drying chamber, for better humid air exit. After these activities, both the sensors and actuators used in the experiments have been acquired. The microcontroller used to obtain and store data is on a board compatible with Arduino Mega 2560. Three dry bulb temperature and relative humidity sensors (DHT22) and an electrical current sensor (ACS712) have been purchased and connected to the board, as well as a micro SD card module and a memory card. The code which obtains and stores the data has been elaborated. A J-type thermocouple was also acquired. After carrying out these activities, the experiments have begun, using three trays to dehydrate both sliced apples and bananas. Each type of fruit has been dehydrated for fourteen hours, one fruit at a time. The fruits have been both photographed and weighed before dehydration. After fourteen hours, the fruits have been photographed and weighed again, obtaining a mass percentage reduction in the lower, intermediate and upper trays of 72%, 79% and 78% for apple and 66%, 62% and 63 % for banana, respectively. The DHT22 1 sensor has provided average values of dry bulb temperature and ambient air relative humidity of 25.8 °C and 43.9%, for apples, and 26.0 °C and 42.9%, for bananas. For both fruits, graphs of dry bulb temperature and relative humidity have been plotted at the chamber both entrance and exit, as a function of dehydration time. The average effective values of electric current intensity and dissipated power (both in the electrical resistance) of 1.070 A and 235.34 W (for apple) and 1.054 A and 231.95 W (for banana) were also obtained. Finally, it has been concluded that the objectives were achieved, that the equipment worked properly (after restoration and optimization); that the fruits lost most of their total water mass (after 14 h of dehydration) and that there was psychrometric equilibrium in the drying chamber.

Keywords: Solar Dehydrator. Photovoltaics. Natural Products.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Volume de controle com uma entrada e uma saída.	20
Figura 2 – O processo de secagem por meio de osmose.	25
Figura 3 – Vista em corte de uma célula solar de silício.	31
Figura 4 – Conexão malha-base em uma célula.	32
Figura 5 – Circuito elétrico equivalente.	34
Figura 6 – Antiga resistência elétrica do sistema.	39
Figura 7 – Recipiente metálico da resistência elétrica, isolado termicamente.	40
Figura 8 – Bateria Heliar Freedom Estacionária C-100 165 Ah.	40
Figura 9 – Borracha de vedação da câmara de secagem.	41
Figura 10 – a) Inversor, controlador de carga e compartimentos dos fusíveis fixados em madeira; b) Controlador de temperatura e contactor fixados em madeira.	42
Figura 11 – Quadro de energia, exterior.	42
Figura 12 – Quadro de energia, interior.	43
Figura 13 – Exaustor de ar Loren Sid 30 cm bivolt 130 W.	44
Figura 14 – Sistema exaustor-bocal.	44
Figura 15 – Inversor Knup KP-550A 2000 W.	45
Figura 16 – Controlador de carga PWM Epever Solar 20A 12/24 V.	45
Figura 17 – Placa compatível com Arduino Mega 2560.	47
Figura 18 – Sensores DHT22.	47
Figura 19 – Sensor ACS712.	48
Figura 20 – Módulo de cartão micro SD com cartão micro SDHC inserido e jumpers.	48
Figura 21 – a) Termopar do tipo J; b) Controlador de temperatura; c) Contactor.	49
Figura 22 – DHT22 1.	50
Figura 23 – DHT22 2.	50
Figura 24 – DHT22 3.	50
Figura 25 – Componentes localizados acima da câmara de secagem.	52
Figura 26 – Bandejas utilizadas nos experimentos.	53
Figura 27 – Maçãs fatiadas, antes da desidratação.	54
Figura 28 – Bananas fatiadas, antes da desidratação.	55
Figura 29 – Maçãs fatiadas, após a desidratação.	56
Figura 30 – Bananas fatiadas, após a desidratação.	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Diagrama T- v para o vapor d'água em ar úmido.	22
Gráfico 2 – Diagrama P - T para a água, incluindo as três fases.	27
Gráfico 3 – Curvas características corrente-tensão e potência-tensão de um módulo fotovoltaico típico.	33
Gráfico 4 – Curvas características corrente-tensão para um módulo operando a uma temperatura fixa e a diferentes níveis de irradiação.	33
Gráfico 5 – TBS ao longo da desidratação de maçã na entrada da câmara.	57
Gráfico 6 – URA ao longo da desidratação de maçã na entrada da câmara.	57
Gráfico 7 – TBS ao longo da desidratação de maçã na saída da câmara.	58
Gráfico 8 – URA ao longo da desidratação de maçã na saída da câmara.	58
Gráfico 9 – TBS ao longo da desidratação de banana na entrada da câmara.	60
Gráfico 10 – URA ao longo da desidratação de banana na entrada da câmara.	60
Gráfico 11 – TBS ao longo da desidratação de banana na saída da câmara.	61
Gráfico 12 – URA ao longo da desidratação de banana na saída da câmara.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes do sistema elétrico do equipamento.	46
Tabela 2 – Ligações entre sensores, atuador e a placa compatível com Arduino Mega 2560.	52
Tabela 3 – Massa inicial de maçã em cada bandeja.	54
Tabela 4 – Massa inicial de banana em cada bandeja.	55
Tabela 5 – Massa final de maçã em cada bandeja e percentual de massa perdido.	56
Tabela 6 – Massa final de banana em cada bandeja e percentual de massa perdido.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VC	Volume de Controle
AU	Ar Úmido
UA	Umidade Absoluta
URA	Umidade Relativa do Ar
PSA	Pressão de Saturação da Água
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido
CP	Carta Psicrométrica
SAA	Secagem por meio de Ar Aquecido
SO	Secagem Osmótica
MOs	Microondas
SC	Secagem por Congelamento
RS	Radiação Solar
CC	Corrente Contínua
MF	Módulo Fotovoltaico
CF	Célula Fotovoltaica
ppm	Parte por milhão
EJ	Efeito Joule
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UFC	Universidade Federal do Ceará
LTDA	Limitada
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
CA	Corrente Alternada

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{m}_e	Vazão mássica de entrada
\dot{m}_s	Vazão mássica de saída
m	Massa
t	Tempo
Σ	Somatório
ω	Umidade absoluta
m_v	Massa de vapor d'água
m_a	Massa de ar seco
p	Pressão de ar úmido
p_a	Pressão parcial de ar seco
p_v	Pressão parcial de vapor d'água
y_v	Fração molar de vapor d'água
n_v	Número de mols de vapor d'água
n_a	Número de mols de ar seco
ϕ	Umidade relativa do ar
p_g	Pressão de saturação da água à temperatura da mistura
T	Temperatura
v	Volume específico
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
%	Porcentagem
kg	Quilograma
m^3	Metro cúbico
kJ	Quilojoule
kPa	Quilopascal
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
m	Metro
mm	Milímetro
P	Pressão
s	Segundo
W	Watt
Si	Silício
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
I_{mp}	Corrente de máxima potência

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{oc}	Tensão de circuito aberto
V_{mp}	Tensão de máxima potência
P_{mp}	Máxima potência
V	Volt
I_L	Corrente gerada pela luz
I_D	Corrente do diodo
I_{sh}	Corrente derivada
R_S	Resistência de série
R_{Load}	Resistência da carga
R_{sh}	Resistência derivada
I_o	Corrente de saturação reversa do diodo
a	Fator de idealidade modificado
n	Fator do diodo
k	Constante de Boltzmann
N_S	Número de células em série
q	Carga elementar
C	Coulomb
τ	Transmitância
α	Absortividade
G_T	Irradiação solar
η_c	Eficiência do módulo fotovoltaico
U_L	Coefficiente global de troca de calor
T_c	Temperatura do módulo fotovoltaico
T_a	Temperatura ambiente
P_d	Potência elétrica dissipada
R_E	Resistência elétrica
N°	Número
Ah	Ampère-hora
Ω	Ohm
kWh	Quilowatt-hora
min	Minuto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	JUSTIFICATIVA	18
3	OBJETIVOS	19
3.1	Objetivo Geral	19
3.2	Objetivos Específicos.....	19
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
4.1	O balanço de massa em um volume de controle	19
4.2	Psicrometria.....	20
4.2.1	<i>Umidade absoluta</i>	<i>20</i>
4.2.2	<i>Umidade relativa</i>	<i>21</i>
4.2.3	<i>Temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido.....</i>	<i>22</i>
4.2.4	<i>A Carta Psicrométrica</i>	<i>22</i>
4.3	Secagem de frutas	23
4.3.1	<i>Meios de se secar frutas</i>	<i>23</i>
4.3.1.1	<i>Ar aquecido</i>	<i>24</i>
4.3.1.2	<i>Osmose</i>	<i>24</i>
4.3.1.3	<i>Microondas</i>	<i>25</i>
4.3.1.4	<i>Congelamento</i>	<i>26</i>
4.3.2	<i>Aspectos referentes à qualidade das frutas secas</i>	<i>27</i>
4.3.2.1	<i>Físicos</i>	<i>27</i>
4.3.2.2	<i>Químicos</i>	<i>28</i>
4.3.2.3	<i>Nutricionais.....</i>	<i>29</i>
4.3.2.4	<i>Sensoriais</i>	<i>29</i>
4.4	Energia solar fotovoltaica	30
4.4.1	<i>A conversão fotovoltaica</i>	<i>30</i>
4.4.1.1	<i>Células fotovoltaicas</i>	<i>30</i>
4.4.1.1.1	<i>Características e modelos de células fotovoltaicas</i>	<i>32</i>
4.4.1.1.2	<i>Temperatura da célula fotovoltaica</i>	<i>35</i>
4.4.1.2	<i>Características de carga e sistemas de acoplamento direto</i>	<i>36</i>
4.4.1.3	<i>Controladores de carga.....</i>	<i>36</i>
4.4.1.4	<i>Procedimentos para projeto</i>	<i>37</i>
4.4.2	<i>O efeito Joule</i>	<i>37</i>
5	MATERIAIS E MÉTODOS	38
5.1	Restauração e otimização do sistema desidratador	38
5.1.1	<i>Restauração</i>	<i>38</i>
5.1.2	<i>Otimização</i>	<i>41</i>
5.2	Aquisição e instalação de sensores e atuadores	46
5.2.1	<i>Sensores e atuadores</i>	<i>46</i>
5.2.2	<i>Instalação</i>	<i>49</i>

SUMÁRIO

5.3	Experimentos	53
5.3.1	<i>Desidratação de maçã</i>	54
5.3.2	<i>Desidratação de banana</i>	55
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
6.1	Maçã	55
6.2	Banana	59
7	CONCLUSÃO	62
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICE A – CÓDIGO UTILIZADO NA OBTENÇÃO DE DADOS DURANTE A DESIDRATAÇÃO DE MAÇÃ	68
	APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO	78
	ANEXO A – PRESSÃO DE SATURAÇÃO DA ÁGUA	80
	ANEXO B – CARTA PSICROMÉTRICA PARA PRESSÃO MANOMÉTRICA DE 101,325 kPa	82

1. INTRODUÇÃO

Processos de secagem por meio de radiação solar vêm sendo utilizados pela humanidade desde o seu surgimento (encontrou-se, no sul da França, a primeira instalação de secagem por meio de energia solar, datada de aproximadamente 8000 a.C). Visavam, principalmente, a preservação de comida, mas também a secagem de outros materiais, como roupas e materiais de construção. São processos simples de remoção de excesso de água (umidade) de um produto natural ou industrial, visando atingir uma especificação padrão. Existem alguns tipos de secagem solar, como a direta e a indireta (esta última sendo mais moderna). Produtos agrícolas geralmente possuem um teor de água de aproximadamente 70%.

A psicrometria da secagem é importante porque se refere às propriedades da mistura ar seco-vapor d'água que controlam o processo de secagem. Cartas psicrométricas são ferramentas úteis que ilustram dados de ar úmido em uma forma gráfica conveniente. Em processos de secagem, a taxa com a qual a evaporação de água ocorre depende da concentração de vapor no ar adjacente (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

O consumo de alimentos saudáveis (frutas, por exemplo) tem um efeito benéfico direto contra o desenvolvimento de doenças não transmissíveis. Compostos bioativos (incluindo polifenóis, carotenoides, fitoesteróis, prebióticos e vitaminas) presentes em alimentos representam uma estratégia promissora como terapias baseadas em produtos naturais para prevenir ou reduzir o risco de doenças não transmissíveis. Nesse sentido, pesquisas em nutrição buscam continuamente desenvolver produtos inovadores que promovam uma alimentação saudável (DONADO-PESTANA *et al.*, 2021). Uma alternativa de produtos que promovem uma alimentação saudável são as frutas desidratadas. A desidratação é um dos métodos mais utilizados para a preservação de frutas, visto que ela pode aumentar o tempo de prateleira desses alimentos, reduzir o custo de empacotamento e o peso para transporte (CHEN *et al.*, 2021). A maior parte da desidratação industrial de alimentos utiliza técnicas de desidratação por convecção, onde o ar atua como um receptor de umidade (AMANOR-ATIEMOH *et al.*, 2020).

Desidratadores solares podem operar no modo passivo (convecção natural) ou ativo (convecção forçada). Há, também, as secagens direta e indireta. Na secagem direta, a unidade coletora de energia solar faz parte da câmara de secagem, enquanto que, na secagem indireta, o coletor solar e a câmara de secagem são unidades separadas. Desidratadores solares indiretos por convecção forçada são melhores quanto a taxa de secagem e a qualidade, além de serem mais adequados para secar grandes quantidades. Em desidratadores solares indiretos, a câmara de secagem pode ser do tipo túnel ou do tipo armário. Para a desidratação de alimentos, o do tipo túnel é comumente abastecido de forma semicontínua, enquanto que no tipo armário o lote é agrupado (sendo sua principal desvantagem o alto custo do investimento inicial) (ORTIZ-

RODRÍGUEZ *et al.*, 2021). Esse trabalho utiliza um sistema desidratador off-grid (inteiramente energizado pela conversão solar, sem participação da rede elétrica).

Um dos fenômenos mais fundamentais e tecnologicamente relevantes na interação luz-matéria é a demonstração do efeito fotoelétrico, onde fótons têm sido usados para emitir elétrons no espaço livre (LIU *et al.*, 2021). Células solares fotovoltaicas convertem diretamente a energia solar em elétrica e fornecem uma proposta promissora para lidar com a poluição ambiental e a escassez de energia. Sistemas de células solares fotovoltaicas estão agora amplamente estabelecidos na China, Europa, Estados Unidos e em outros países. As primeiras células solares de silício foram concebidas na década de 1950 e os seus diversos tipos (incluindo silício monocristalino, silício policristalino e silício amorfo) atualmente dominam mais de 90% do mercado fotovoltaico global. Entretanto, o recorde de eficiência de conversão de energia (PCE) de uma célula solar de silício, de 26,7%, se aproximou do limite teórico (ZHU; MAO; XU, 2020).

O efeito Joule foi primeiro reportado em 1841, por James Prescott Joule. Ele concluiu que quando uma corrente elétrica é propagada ao longo de um condutor metálico, o calor dissipado em determinado tempo é proporcional à resistência do condutor multiplicada pelo quadrado da intensidade da corrente elétrica (BIESUZ *et al.*, 2021).

2. JUSTIFICATIVA

A energia solar, tanto térmica quanto fotovoltaica, vem se mostrando cada vez mais uma opção viável aos combustíveis fósseis. Estes, além de não serem renováveis no curto prazo, contribuem para o fenômeno do aquecimento global, pois favorecem o aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera, ao serem queimados para os mais diversos fins. Quando combinado com outros hábitos saudáveis, o consumo de frutas auxilia na busca por uma melhor qualidade de vida. Porém, frutas tendem a estragar rapidamente, principalmente devido à sua grande quantidade de água, o que torna interessante, às vezes, fazer um processo de desidratação nesses alimentos, visando aumentar o tempo de prateleira. O processo de desidratação pode ser realizado por ar não saturado de umidade, e esse processo pode ser acelerado por meio do aquecimento (até certa temperatura) do ar ambiente, utilizando alguma fonte de calor. Esse trabalho propõe a utilização de um sistema desidratador que atua por meio de ar aquecido em uma resistência elétrica, suprida por uma bateria, que por sua vez é carregada por um par de módulos solares fotovoltaicos. Neste caso, não há reação de combustão envolvida no fornecimento de calor, não havendo qualquer emissão de gás carbônico. Tal configuração é ambientalmente sustentável, utilizando uma fonte de energia renovável (o Sol) para gerar calor, além de não contribuir para o aquecimento global. Também dispensa a necessidade de utilização de uma rede elétrica externa, quando se há radiação solar suficiente para carregar a bateria.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é restaurar e implementar melhorias em um sistema desidratador solar já existente, realizar a instalação adequada de sensores e atuadores e coletar dados de grandezas físicas envolvidas com o processo de desidratação de produtos naturais (no caso, frutas), tais como temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar e corrente e potência elétricas.

3.2 Objetivos Específicos

- Restaurar e implementar melhorias em um sistema desidratador solar já existente.
- Realizar a instalação adequada de instrumentos de medição nesse sistema desidratador.
- Expor as principais diferenças entre as secagens de maçã e banana fatiadas (massa final e redução percentual de massa).
- Apresentar valores médios para a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar ambientes.
- Gerar gráficos para as variações de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar na entrada e na saída da câmara de secagem.
- Apresentar valores eficazes médios de intensidade de corrente elétrica e potência elétrica dissipada na resistência.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

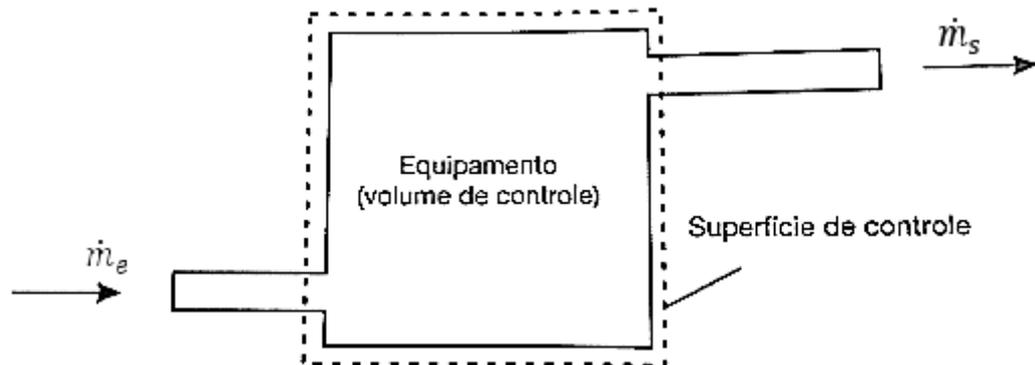
4.1 O balanço de massa em um volume de controle

Na termodinâmica, o termo “sistema” é utilizado para indicar tudo aquilo que se deseja estudar, o objeto da análise. Ele pode ser bastante simples, como um corpo livre, ou bastante complexo, como uma refinaria química inteira. Além disso, é distinguido de suas vizinhanças por uma fronteira (também chamada de superfície de controle) especificada, que pode estar em repouso ou em movimento. A forma e o volume de um sistema não necessariamente são constantes.

Um volume de controle (VC, exemplificado na Figura 1, na qual “ \dot{m}_e ” indica a vazão mássica de entrada e “ \dot{m}_s ”, a vazão mássica de saída) é um tipo de sistema, sendo uma região do

espaço através da qual pode ocorrer fluxo de massa (MORAN, SHAPIRO, 2009).

Figura 1 – Volume de controle com uma entrada e uma saída.



Fonte: Moreira (2017, p. 20, com adaptações).

A taxa temporal de variação da massa contida em um VC é igual ao somatório das vazões mássicas que entram no VC menos o somatório das vazões mássicas saem do VC (balanço de massa em um VC, Equação 1, na qual “ m ” indica a massa presente no VC e “ t ”, o tempo) (MOREIRA, 2017):

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{VC} = \sum_{i=1}^m \dot{m}_{e_i} - \sum_{j=1}^n \dot{m}_{s_j} \quad (1)$$

4.2 Psicrometria

A psicrometria é o estudo de sistemas que envolvem ar seco e água (na condição de vapor d’água, podendo também estar presente uma fase condensada). A expressão “ar úmido” (AU) é dada à mistura de ar seco e vapor d’água, na qual o ar seco é tratado como se fosse um componente puro.

4.2.1 Umidade absoluta

Uma amostra de AU pode ser descrita de várias maneiras. Uma dessas maneiras é através da umidade absoluta ω (também chamada de razão de mistura ou umidade específica representada pela sigla “UA”), que é a razão entre a massa de vapor d’água, m_v , e a massa de ar seco, m_a (MORAN; SHAPIRO, 2009), dada pela Equação 2, e cuja unidade é o quilograma de vapor d’água por quilograma de ar seco (STOECKER; JABARDO, 2002):

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (2)$$

Em sistemas de aquecimento de AU sem variação na quantidade de vapor d'água presente, a UA permanece constante, enquanto que outros parâmetros variam.

4.2.2 Umidade relativa

Em um determinado volume de AU, a pressão da mistura, p , é dada pela soma das pressões parciais do ar seco, p_a , e do vapor d'água, p_v , conforme a Equação 3:

$$p = p_a + p_v \quad (3)$$

A pressão parcial do vapor d'água é dada pelo produto entre a fração molar do vapor d'água, y_v , e a pressão da mistura (Equação 4). Por sua vez, a fração molar do vapor d'água pode ser dada por meio da razão entre o número de mols de vapor d'água, n_v , e a soma do número de mols de ar seco, n_a , com o número de mols de vapor d'água (Equação 5).

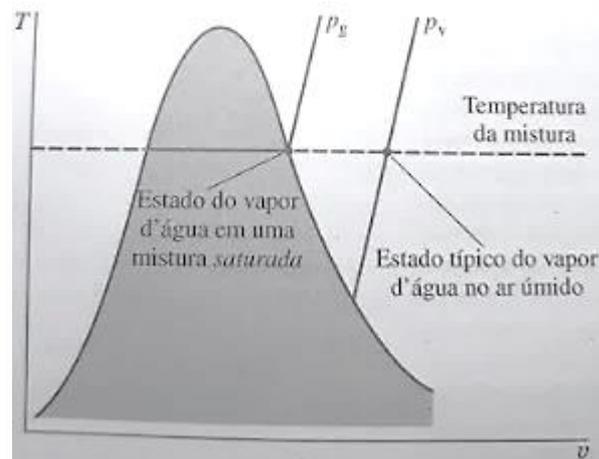
$$p_v = y_v p \quad (4)$$

$$y_v = \frac{n_v}{n_a + n_v} \quad (5)$$

Finalmente, tem-se que a umidade relativa do ar (representada pela sigla “URA”), ϕ , é dada pela razão entre a pressão parcial do vapor d'água e a pressão de saturação da água (PSA) à temperatura da mistura, p_g , (MORAN; SHAPIRO, 2009) conforme a Equação 6. Ela representa o teor de umidade do ar, expresso em porcentagem (STOECKER; JABARDO, 2002). Em seguida, no Gráfico 1, pode-se verificar a relação existente entre a pressão parcial do vapor d'água em um estado típico e a PSA àquela temperatura, por meio de um diagrama temperatura-volume específico (diagrama $T - v$).

$$\phi = \frac{p_v}{p_g} \quad (6)$$

Gráfico 1 – Diagrama T-v para o vapor d'água em ar úmido.



Fonte: Moran e Shapiro (2009, p. 558).

A PSA é uma propriedade termodinâmica, podendo ser obtida em uma tabela de água saturada (líquido-vapor). O “Anexo A” traz um trecho dessa tabela, na qual pode-se verificar a PSA de acordo com a temperatura. Em sistemas de aquecimento de AU sem variação na quantidade de vapor d'água presente, em que a UA permanece constante, temos uma redução na URA, visto que a pressão parcial do vapor d'água não varia e a PSA aumenta junto com o aumento de temperatura da mistura.

4.2.3 Temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido

A temperatura de bulbo seco (TBS) é simplesmente a temperatura que seria medida por um termômetro posicionado na mistura. Diferentemente da temperatura de bulbo úmido (TBU), que é medida por meio de um termômetro cujo bulbo é envolvido por uma mecha umedecida em água (MORAN; SHAPIRO, 2009) que, ao evaporar (caso o ar não esteja saturado de vapor d'água), remove calor do bulbo, reduzindo a leitura indicada no termômetro, a indicação da TBS não é influenciada por evaporação. Em uma condição psicrométrica de ar saturado ($\phi = 1$, em que não há evaporação), ambas as temperaturas são iguais.

4.2.4 A Carta Psicrométrica

A Carta Psicrométrica (CP) é uma ferramenta essencial na análise do AU. Nela, estão representadas diversas propriedades psicrométricas, tais como TBS, TBU, URA, UA, volume específico (cuja unidade é o m^3/kg de ar seco) e entalpia específica (cuja unidade é o kJ/kg de ar seco). Conhecendo-se os valores de duas propriedades psicrométricas distintas, pode-se definir o estado psicrométrico do AU. No “Anexo B”, encontra-se uma CP para uma pressão barométrica de

101,325 kPa (pressão ao nível do mar).

As propriedades do AU se referem à unidade de massa de ar seco, visto que, na maioria dos processos, a massa (ou vazão) de ar seco permanece constante (STOECKER; JABARDO, 2002).

4.3 Secagem de frutas

Devido ao seu alto teor de umidade (que acaba fornecendo substrato para multiplicação microbiana) (FERNANDES, 2020), frutas frescas são classificadas como produtos altamente perecíveis, sendo necessário o seu armazenamento sob temperaturas refrigeradas e condições de umidade controladas. São alimentos bastante nutritivos, que ajudam bastante na busca por uma vida mais saudável.

A secagem é um método alternativo para a preservação do valor nutricional das frutas que, dentre algumas vantagens, podemos citar o aumento de sua concentração relativa e uma redução dos custos relacionados ao gerenciamento pós colheita (RADOJČIN *et al.*, 2021). Estima-se que, nos países desenvolvidos, os processos de secagem consumam de dez a quinze por cento da demanda total de energia da indústria alimentícia (ONWUDE *et al.*, 2016).

O processo de secagem ocorre em duas etapas: a primeira acontece na superfície do material de secagem, possui taxa de secagem constante e é semelhante à vaporização da água para o ambiente, enquanto que a segunda etapa ocorre a uma taxa de secagem decrescente. A condição da segunda etapa é determinada pelas propriedades do material que está secando (EL-SEBAII; SHALABY, 2012).

Existem diversos meios de se secar frutas, assim como existem diversos aspectos referentes à qualidade dessas frutas que passam por algum processo de secagem.

4.3.1 Meios de se secar frutas

Dentre os vários meios existentes de se secar frutas, podemos citar, por exemplo, a secagem por meio de ar aquecido, a secagem osmótica, a secagem por meio de microondas e a secagem por congelamento. Considerando as complexidades e os diferentes produtos agrícolas, não há um método geral de secagem adequado para cada produto. Há efeitos benéficos oriundos da combinação de dois ou mais métodos de secagem, como a redução do total de energia requerida e a redução do tempo de secagem, enquanto que os parâmetros de qualidade são mantidos.

4.3.1.1 Ar aquecido

A secagem por meio de ar aquecido (SAA) é um método amplamente utilizado para se preservar produtos agrícolas, principalmente quando se há produção industrial de alimentos. Trata-se da exposição de um produto a um fluxo contínuo de ar, para que umidade seja removida.

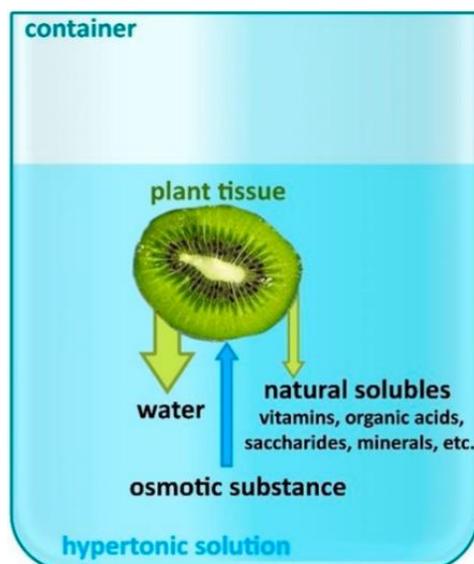
A teoria por trás do processo de SAA é complexa devido aos diferentes mecanismos de transferência de calor e massa. É um tipo de secagem naturalmente inofensiva e não tóxica, que fornece um produto mais uniforme e higiênico e que pode ter vida útil estendida de pelo menos um ano.

No entanto, a qualidade dos produtos que passam por SAA é frequentemente reduzida. Além disso, esta técnica leva a uma alta demanda de energia e a um tempo de secagem prolongado, que pode causar encolhimento acentuado e redução da densidade aparente, especialmente em altas temperaturas, além da capacidade de reidratação. Consequentemente, a combinação de novas técnicas térmicas com a SAA ganhou recentemente um interesse significativo, com várias publicações e relatórios sobre teorias, design, aplicações, produtos e cinética de secagem (ONWUDE; HASHIM; CHEN, 2016).

4.3.1.2 Osmose

A secagem osmótica (SO) é usada para remover, de forma parcial, a água de tecidos biológicos, por meio da imersão desses tecidos em uma solução osmótica altamente concentrada. A força motriz para o transporte de umidade dos tecidos para a solução é fornecida pela presença, na solução altamente concentrada, de uma pressão osmótica mais elevada. A difusão da umidade é acompanhada pela difusão simultânea, da solução para o tecido, da substância dissolvida. Como a membrana celular, responsável pelo transporte da matéria, não é totalmente seletiva, outros componentes presentes nas células (como açúcares, ácidos, vitaminas e minerais) também podem atingir a solução osmótica em pequenas quantidades. O processo é ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – O processo de secagem por meio de osmose.



Fonte: Nowacka, Dadan e Tylewicz (2021).

A eficácia da SO depende de vários fatores, como concentração, temperatura e agitação da solução, propriedades da substância osmótica e tempo e condições do processo, além do tipo, forma, tamanho e composição química da matéria-prima submetida à SO, a relação entre solução e matéria-prima, etc. A substância osmótica mais comumente utilizada é uma solução de sacarose de alta concentração. No entanto, outros açúcares, bem como cloreto de sódio, sorbitol ou outras substâncias que produzem alta pressão osmótica e são aceitáveis para o consumidor podem ser utilizados. Recentemente, novas tendências são observadas, como a substituição da solução de açúcar por xarope de fruta e suco enriquecido, visando obter produtos de alto valor agregado. A SO pode ser executada à temperatura ambiente ou a temperaturas ligeiramente mais altas, a fim de aumentar a taxa de transferência de massa. Contudo, não costuma exceder a temperatura de 45 °C (NOWACKA; DADAN; TYLEWICZ, 2021). O processo de SO apresenta algumas desvantagens, como o manejo e a destinação da solução osmótica após ser utilizada, o longo tempo necessário para a realização do processo e o relativamente alto teor de água do produto final (LUCHESE; GURAK; MARCZAK, 2015).

Para garantir maior estabilidade e vida útil de produtos que passam por SO, é necessário submetê-los a métodos de preservação adicionais, como congelamento, SAA e secagem por microondas. Um dos benefícios da SO como pré-tratamento para a SAA é a economia de energia devido ao transporte de umidade sem que haja mudança de fase.

4.3.1.3 Microondas

Microondas (MOs) são ondas eletromagnéticas (sendo, portanto, oscilações do campo eletromagnético) com frequência compreendida entre 300 MHz e 300 GHz e comprimentos de

onda de 1 m a 1 mm. Os mecanismos de aquecimento por MOs baseiam-se na oscilação de íons e moléculas quando um material é exposto a elas, o que ocasiona atrito interno e conversão de energia cinética em calor. As MOs proporcionam um rápido aquecimento volumétrico de frutas a um baixo consumo de energia. A literatura costuma relatar secagem por MOs a uma potência aplicada constante.

Há, na literatura, diferentes opiniões a respeito da homogeneidade e do controle do aquecimento por MOs. As razões para o aquecimento desigual são várias, podendo ser citados, por exemplo, um tamanho de produto acima do ideal, fenômenos de ressonância, composição heterogênea do material e formato do produto.

Devido ao fato do fornecimento de energia de secagem ser dado diretamente ao volume de um produto, a pressão interna desse produto aumentará, o que levará a água para a superfície do alimento, resultando em um aumento na taxa de secagem. No entanto, dependendo do tipo de material, em alguns casos as MOs podem não concluir totalmente a secagem, sendo geralmente combinadas com SAA. Dessa forma, embora separadamente o aquecimento por MOs e a SAA tenham desvantagens, combinar esses dois métodos pode ser muito benéfico. Nesse sentido, a aplicação das MOs à secagem finalizada de rodela de banana (a uma temperatura de 60 °C) reduziu a SAA em cerca de 64%.

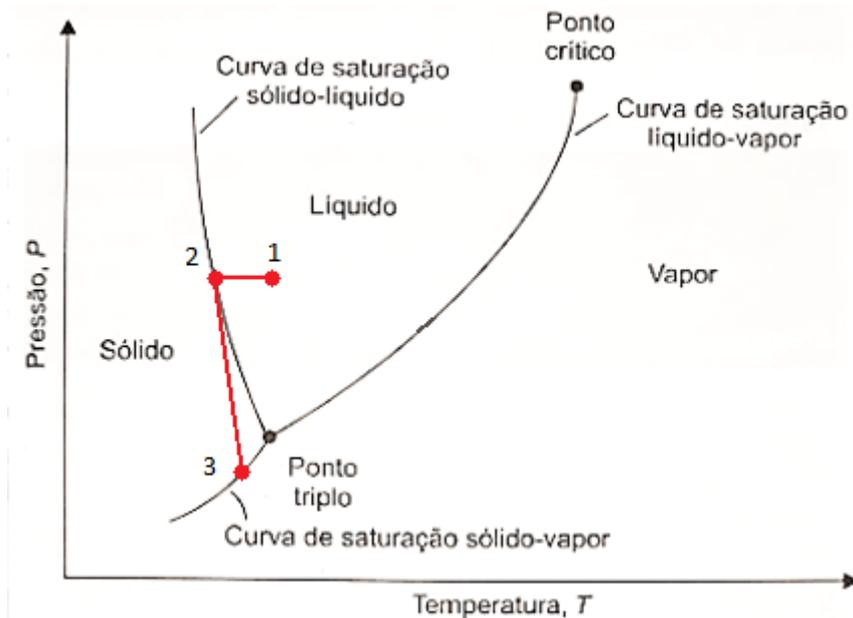
4.3.1.4 Congelamento

A secagem por congelamento (SC) é uma técnica que foi inicialmente utilizada para a preservação de material biológico termicamente sensível. Ela emprega o princípio da sublimação da água congelada, ocorrendo em baixa pressão e temperatura, onde os compostos biologicamente ativos permanecem preservados em grande quantidade (RADOJČIN *et al.*, 2021). Dentre os métodos de secagem, a SC é considerada o processo de referência para a fabricação de produtos desidratados de alta qualidade. Envolve o congelamento preliminar dos produtos, seguido da colocação destes sob pressão reduzida (aproximadamente 300 Pa), com um suprimento de calor suficiente para sublimar o gelo (2800 J por grama de gelo). O congelamento preliminar do produto enrijece sua estrutura e, de forma subsequente, evita o movimento do soluto e do líquido durante a SC. Os cristais de gelo se desenvolvem e formam uma rede uniforme em todo o produto que, após a sublimação, produz uma matriz porosa densa, distribuída e homogênea. As reações químicas e / ou enzimáticas vão ser, portanto, significativamente limitadas, e os fenômenos de perda de aroma e degradação de vitaminas, reduzidos, quando comparados com outras técnicas de secagem. O processo de sublimação explica porque produtos que passam por SC são pouco ou nada modificados (HAMMAMI; RENÉ, 1997).

O processo de SC encontra-se representado no Gráfico 2 (diagrama P-T para a água,

que inclui as três fases), no qual de 1 – 2 tem-se resfriamento seguido de solidificação (sobre a curva de saturação sólido-líquido), à pressão constante, e de 2 – 3 há uma redução de pressão junto com aquecimento, seguido de sublimação (sobre a curva de saturação sólido-vapor).

Gráfico 2 – Diagrama P - T para a água, incluindo as três fases.



Fonte: Moreira (2017, p. 17, com adaptações).

Na última década, a SC ganhou popularidade, especialmente em frutas. Em comparação com outros métodos de secagem, tem um alto consumo de energia e um tempo de processamento prolongado. Esse tempo de processamento, porém, pode ser reduzido utilizando-se um tratamento por meio de campo elétrico pulsado. Apesar das vantagens associadas à SC, os altos custos iniciais ainda são um fator limitante para muitos produtores (RADOJČIN *et al.*, 2021). Comparado com a SAA, o custo da SC é de quatro a oito vezes superior (CIURZYŃSKA; LENART, 2011).

4.3.2 Aspectos referentes à qualidade das frutas secas

Os principais aspectos referentes à qualidade das frutas que passam por algum processo de secagem são: físicos, químicos, nutricionais e sensoriais.

4.3.2.1 Físicos

Os aspectos físicos dos alimentos são responsáveis pela qualidade a eles atribuída. Características tais como forma, aparência e cor, perante os clientes, são responsáveis pela aceitação do produto. Atualmente, a cor dos alimentos é medida de forma direta e não destrutiva,

usando aparelhos como colorímetros. Normalmente, uma maior deterioração da cor está associada à SAA (o escurecimento enzimático pode ser responsável por mudanças tanto de cor quanto de sabor). Este problema pode ser contido, em certa medida, por meio do controle térmico da secagem e pela adição de dióxido de enxofre, ácidos e pré-tratamentos por SO. A camada de açúcar que se forma na superfície das frutas durante a SO representou uma barreira ao ar durante a SAA, que evitou o escurecimento desses produtos.

A textura, que inclui características estruturais e mecânicas, influencia bastante a qualidade dos produtos secos. As frutas que passam por processo de SC têm qualidade superior, preservando mais a cor, o sabor e a aparência, além de serem mais crocantes se comparadas às frutas secas por métodos tradicionais de secagem. A SAA geralmente tem influência destrutiva na estrutura das frutas, visto que provoca colapso estrutural no tecido, devido à remoção de umidade. No entanto, pela seleção de parâmetros de secagem ideais, mudanças excessivas na estrutura das frutas podem ser evitadas.

Alguns pré-tratamentos, tais como campo elétrico pulsado, ultrassom e alta pressão hidrostática podem contribuir positivamente para a secagem, em se tratando de economia de energia e de qualidade do produto seco. São capazes de atingir as células, aumentando a permeabilidade e a transferência de massa.

4.3.2.2 Químicos

A utilização de temperaturas mais elevadas e a exposição prolongada ao oxigênio podem, em última análise, reduzir a quantidade de vitaminas durante a secagem de frutas. No entanto, um estudo concluiu que a secagem solar, mesmo se aplicada em temperaturas mais baixas (entre 24,5 e 40,3 °C) pode reduzir significativamente a quantidade de vitaminas nas frutas. Com a desidratação dos produtos a um teor de umidade de 10% ou inferior, notou-se um aumento relativo nas concentrações de minerais, carboidratos, açúcares totais e na acidez total, quando comparados com amostras de frutas frescas.

As condições operacionais da SAA podem afetar significativamente as flutuações dos nutrientes em frutas tais como morangos. A temperatura mais elevada do ar de secagem aumentou a concentração de elementos químicos, tais como nitrogênio, fósforo, potássio e manganês, enquanto as concentrações de zinco e cálcio foram reduzidas. Além disso, diferentes velocidades do ar de secagem elevaram as concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio e reduziram os teores de cálcio, manganês, ferro e zinco. Portanto, é importante otimizar o processo de secagem para garantir as composições químicas mais desejáveis de um produto seco.

Em se tratando da qualidade química, as vantagens da SC quando comparada com outros métodos de secagem foram relatados por vários autores.

4.3.2.3 *Nutricionais*

Um estudo verificou que, na SAA aplicada a morangos, houve uma diminuição no total de fenóis, antocianinas e atividade antioxidante como resultado de temperaturas mais elevadas, enquanto que 60 ° C foi considerada a temperatura ideal em se tratando da qualidade nutritiva. Uma velocidade de escoamento do ar de 1 m/s resultou em maiores níveis de fenóis e de antocianinas. Por outro lado, ao se elevar a velocidade de escoamento para 2 m/s, notou-se maiores valores de atividade antioxidante.

Uma pesquisa conduzida em framboesas frescas e congeladas, utilizando SAA, com a SC sendo utilizada como procedimento de controle na comparação de resultados obtidos, mostrou que o tempo de exposição a maiores níveis de oxigênio, na SAA, foi mais determinante na redução de vitamina C do que a utilização de temperaturas mais elevadas de secagem. No geral, a SC resultou em uma melhor preservação das qualidades nutricionais, enquanto que as condições ótimas para a SAA das framboesas foram estabelecidas para uma temperatura de 60 °C e para uma velocidade de 1,5 m/s.

Outro estudo verificou a SAA de melão amargo a baixas temperaturas de secagem (até 30°C), com o auxílio de secagem por MOs. Os resultados obtidos revelaram que a velocidade do ar mais elevada, junto com o tempo de secagem prolongado, acarretaram maiores perdas no total de fenóis e na capacidade antioxidante. O total de fenóis e de antioxidantes foi maior a uma densidade de potência de MOs de 3,0 W/g. Um aumento para 4,5 W/g levou a perdas significativas.

Quanto à qualidade nutricional, as vantagens da SC sobre outros métodos de secagem foram descritos por diversos autores.

4.3.2.4 *Sensoriais*

Um dos principais aspectos existentes na secagem de frutas é o efeito dos diferentes métodos de secagem sobre os aspectos sensoriais desses produtos. A secagem é realizada retirando água das frutas, o que afeta diretamente aspectos sensoriais e químicos. As técnicas de secagem tradicionais (como por exemplo a SAA) utilizam altas temperaturas e um alto teor de oxigênio no agente de secagem, o que deteriora as propriedades de cor, aroma e textura. Vários autores relataram que a SAA preserva bem os sabores do marmelo e da fruta jujuba; no entanto, a presença considerável de um sabor estranho (“sabor queimado”) também foi relatada. Além disso, da SAA decorreu uma cor mais escura, quando comparada com outros métodos de secagem. Alguns artigos também relataram que temperaturas de secagem mais baixas produzem frutas secas com uma melhor aceitação.

A SC tem sido apontada como um dos melhores métodos de secagem, no que diz respeito à preservação da qualidade sensorial e nutricional das frutas. Por outro lado, a SC é considerada como um dos métodos mais caros. Logo, há uma busca constante entre os pesquisadores para se encontrar métodos acessíveis e que forneçam a mesma qualidade (ou a mais próxima possível) da SC.

A secagem a vácuo por MOs apresentou mudanças intermediárias de cor, efeitos positivos na textura e baixa intensidade de sabores estranhos. A secagem a vácuo por MOs tem sido utilizada para secar várias frutas, como por exemplo o marmelo, a fruta jujuba e o cranberry. No entanto, deve-se notar que, uma vez que os métodos de secagem por MOs substituem a energia térmica por elétrica, os aspectos da textura mudam significativamente. A textura crocante resulta da expansão da água, ao evaporar dentro do produto, e também está relacionada à porosidade (RADOJËIN *et al.*, 2021).

4.4 Energia solar fotovoltaica

A energia fotovoltaica pode ser utilizada na secagem de frutas, com evidentes vantagens econômicas no que se refere a custos. A geração de energia solar fotovoltaica consiste na conversão, em corrente elétrica contínua, da radiação solar (RS) incidente em um módulo fotovoltaico (representado pela sigla “MF”, composto de várias células fotovoltaicas, representadas pela sigla “CF’s”). Essa energia pode ser consumida instantaneamente (pela demanda existente na aplicação em questão), armazenada em baterias ou transmitida para a rede de distribuição local, para consumo em outras localidades (MOREIRA, 2017).

4.4.1 A conversão fotovoltaica

Dados de 2003 apontam para uma capacidade mundial de geração fotovoltaica de pico superior a 600 MW, com capacidade instalada cumulativa de mais de 1800 MW.

Os processos que ocorrem em sistemas fotovoltaicos não são de natureza térmica, embora as equações utilizadas no projeto de vários sistemas fotovoltaicos sejam similares àquelas que descrevem processos de aquecimento passivo. Além disso, cálculos de radiação desenvolvidos para processos térmicos são aplicáveis a CF’s.

4.4.1.1 Células fotovoltaicas

CF’s são dispositivos semicondutores que convertem parte da RS incidente diretamente em eletricidade. Quando surgiram, eram manufaturadas, possuíam uma eficiência de

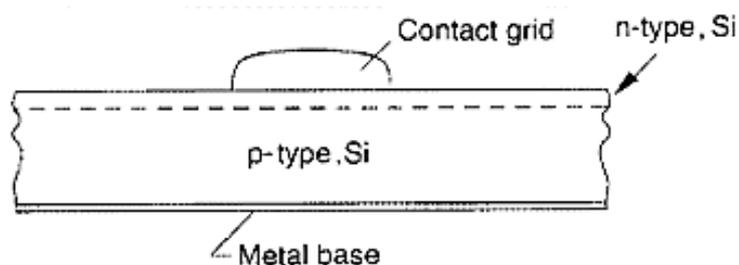
5%, uma área de 1 ou 2 cm² e potência de saída de poucos milliwatts. De lá para cá, muitos avanços na tecnologia de CF's foram obtidos, e já recentemente foram reportadas CF's de laboratório com eficiência superior a 30% e módulos fotovoltaicos sendo fabricados com área de vários metros quadrados.

Dentre algumas aplicações dessas CF's, pode-se citar sua utilização em sistemas de geração de eletricidade de média escala e o fornecimento de energia elétrica para relógios, calculadoras, baterias e satélites artificiais.

As CF's mais comuns são as de silício monocristalino. Em seu retículo cristalino, um átomo de silício absorve um fóton da RS incidente e, se a energia do fóton é suficientemente alta, um elétron de camada externa desse átomo é liberado (devido ao efeito fotovoltaico), o que resulta na formação de um par espaço vazio-elétron. Esses pares formados desapareceriam espontaneamente quando os elétrons se recombinassem com os espaços vazios, fenômeno que pode ser reduzido pela construção, na CF, de uma barreira potencial, que é uma fina camada ou junção através da qual existe uma carga estática. Essa barreira é criada pelo processo de dopagem do silício, criando-se *p*-silício (silício dopado com quantidades muito pequenas de boro, da ordem de 1 ppm, e que possui deficiência de elétrons na sua camada externa, quando há absorção de fótons com energia suficiente) e *n*-silício (silício dopado com fósforo e que possui excesso de elétrons na sua camada externa, vindos do *p*-silício). Se ambas as camadas de silício dopado forem conectadas por um circuito externo, uma corrente elétrica vai fluir através desse circuito, da camada de *n*-silício para a de *p*-silício, quando há injeção óptica (luz). Essa conexão é realizada por meio da ligação da malha de metal (na parte superior da camada de *n*-silício) à base de metal (na parte inferior da camada de *p*-silício).

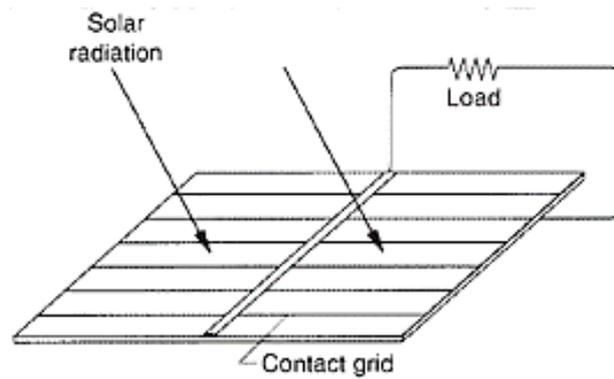
A Figura 3 ilustra uma vista em corte de uma célula solar de silício, na qual estão representadas as camadas de silício dopado, separadas entre si pela barreira potencial (representada pela linha tracejada), a malha de metal (na parte superior da camada de *n*-silício) e a base de metal (na parte inferior da camada de *p*-silício). A Figura 4 representa a conexão malha-base, pela qual fluirá corrente elétrica ao se incidir RS.

Figura 3 – Vista em corte de uma célula solar de silício.



Fonte: Duffie e Beckman (2013, p. 747).

Figura 4 – Conexão malha-base em uma célula.



Fonte: Duffie e Beckman (2013, p. 747).

Há uma grande variedade de projetos, modos de fabricação e de materiais que podem compor CF's (como por exemplo o silício amorfo ou policristalino, o sulfeto de cádmio e o arseneto de gálio). Foram produzidas CF's de silício monocristalino experimentais com eficiência de 25% e CF's de múltiplas junções com eficiência superior a 30%. Há perdas por reflexão na superfície superior da CF, que podem ser reduzidas por coberturas antirreflexo.

As CF's presentes em MF's (que podem ser adquiridos no mercado com eficiência superior a 15%, com vida útil de mais de dez anos) são conectadas em série ou paralelo, para prover tensões e correntes apropriadas (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

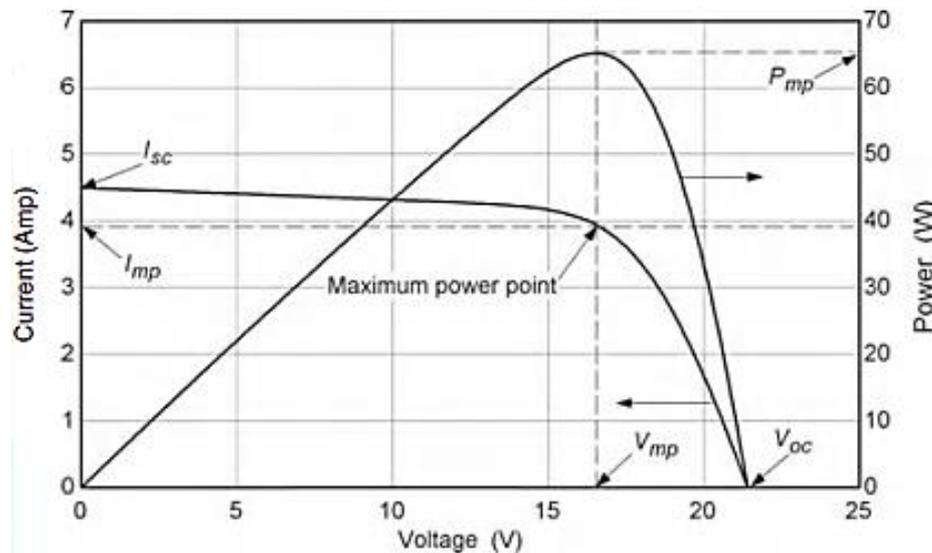
4.4.1.1.1 Características e modelos de células fotovoltaicas

O projeto de sistemas baseados em CF's precisa levar em consideração algumas características, como por exemplo relações corrente-tensão, sob vários níveis de radiação e temperatura de célula. Vários modelos de CF's foram desenvolvidos, de modelos simples e idealizados a modelos detalhados que refletem os processos físicos que ocorrem nessas CF's.

No projeto de sistemas, para arranjos de CF's nas condições de operação, o modelo precisa fornecer os meios para se calcular corrente, tensão e relações de potência. Aparentemente, modelos detalhados não são necessários (modelos simples funcionam bem). O modelo abordado (existem também outros modelos) para o fator corrente-tensão de CF's e sua dependência da RS e temperatura da CF se baseia somente em informações fornecidas pelo fabricante.

O Gráfico 3 ilustra as curvas características corrente-tensão ($I-V$) e potência-tensão ($P-V$) de um MF típico, no qual se encontram evidenciadas a corrente de curto-circuito (I_{sc} , que é a maior possível), a corrente de máxima potência (I_{mp}), a tensão de circuito aberto (V_{oc} , que é a maior possível), a tensão de máxima potência (V_{mp}) e a máxima potência (P_{mp}). O ponto de máxima potência se encontra representado tanto na curva corrente-tensão (I_{mp} , V_{mp}) quanto na curva potência-tensão (P_{mp} , V_{mp}).

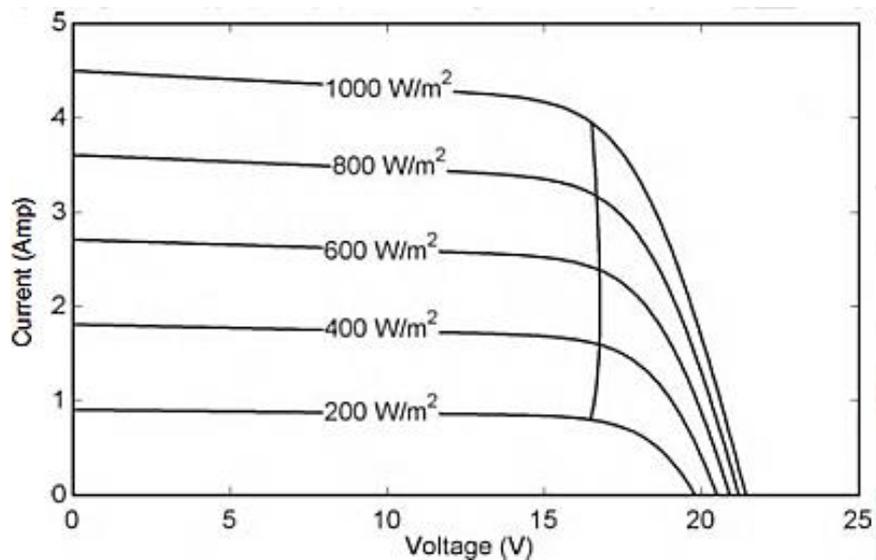
Gráfico 3 – Curvas características corrente-tensão e potência-tensão de um módulo fotovoltaico típico.



Fonte: Duffie e Beckman (2013, p. 748).

De forma ideal, as CF's deveriam sempre operar no ponto de máxima potência, mas na prática elas operam em um ponto na curva corrente-tensão que coincide com as características corrente-tensão da carga. O Gráfico 4 apresenta curvas características corrente-tensão para um MF operando a uma temperatura fixa e a diferentes níveis de irradiação. Encontram-se também representados os pontos de máxima potência, ligados por uma linha aproximadamente vertical.

Gráfico 4 – Curvas características corrente-tensão para um módulo operando a uma temperatura fixa e a diferentes níveis de irradiação.



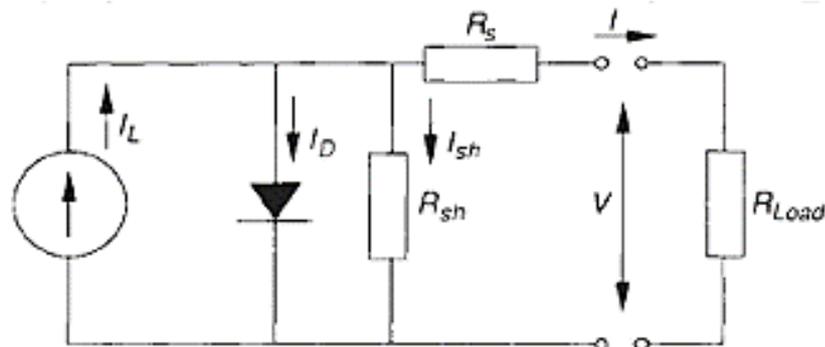
Fonte: Duffie e Beckman (2013, p. 749).

Nota-se, da figura anterior, que a corrente de curto circuito (ponto de uma curva corrente-tensão em que a tensão elétrica é zero) cresce linearmente à medida em que a irradiação aumenta, enquanto que a tensão de circuito aberto (ponto de uma curva corrente-tensão em que a corrente elétrica é zero) cresce logaritmicamente com a irradiação. Dessa forma, a corrente de curto-circuito pode ser utilizada para aferição da radiação incidente (considerando que essa radiação incidente tenha uma distribuição espectral fixa).

CF's formam MF's, e esses últimos formam arranjos. Considerados individualmente, MF's podem conter CF's conectadas em combinações série e paralelo, para se obter corrente e tensão desejadas. Já conjuntos de MF's podem ser agrupados em série e em paralelo. Tanto para conjuntos de CF's quanto para conjuntos de MF's, tem-se que conexões em série levam a uma soma das tensões, enquanto que conexões em paralelo levam a uma soma das correntes.

A Figura 5 ilustra um circuito elétrico equivalente (que pode ser utilizado para uma CF, um MF ou um arranjo), em que " I_L ", " I_D " e " I_{sh} " representam a corrente gerada pela luz, a corrente do diodo e a corrente derivada, respectivamente, e as resistências de série, da carga, e derivada são representadas por " R_S ", " R_{Load} " e " R_{sh} ", respectivamente. A Equação 7 apresenta o balanço de corrente elétrica para esse circuito equivalente.

Figura 5 – Circuito elétrico equivalente.



Fonte: Duffie e Beckman (2013, p. 750).

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (7)$$

As equações 8 e 9 fornecem os cálculos das correntes do diodo e derivada, respectivamente, presentes na Equação 7. Os termos " I_o " e " a ", presentes na Equação 8, indicam a corrente de saturação reversa do diodo e o fator de idealidade modificado (identificado na Equação 10), respectivamente.

$$I_D = I_o \left[\exp \left(\frac{V + IR_S}{a} \right) - 1 \right] \quad (8)$$

$$I_{sh} = \frac{V + IR_S}{R_{sh}} \quad (9)$$

$$a \equiv \frac{nkTN_S}{q} \quad (10)$$

Entre as variáveis presentes na Equação 10, temos o fator “n” do diodo (igual a 1 para um diodo ideal, entre 1 e 2 para um diodo real), a constante de Boltzmann “k” ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K), a temperatura do dispositivo “T”, o número de CF’s em série “ N_S ” e a carga elementar “q” ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C).

Os parâmetros “ I_L ”, “ I_o ”, “ R_S ”, “ R_{sh} ” e “a” são obtidos utilizando-se medidas de corrente e características de voltagem de um MF sob condições de referência (fornecidas pelo fabricante), além de outras características fotovoltaicas.

Por fim, a Equação 11 expressa o cálculo da potência elétrica gerada em uma CF (podendo essa equação ser aplicada em qualquer sistema de fontes elétricas):

$$P = IV \quad (11)$$

4.4.1.1.2 Temperatura da célula fotovoltaica

A temperatura de operação de um MF é determinada por um balanço de energia. A energia solar absorvida pelo MF é parcialmente convertida em energia térmica (que precisa ser dissipada por mecanismos de transferência de calor), enquanto que a outra parte é convertida em eletricidade (removida da CF através do circuito externo). A transferência de calor do MF deve ser maximizada, para que as CF’s operem a menor temperatura possível. Arranjos de CF’s foram projetados e fabricados para produzir combinações de energia elétrica e térmica (para aquecimento de ambientes).

A Equação 12 fornece o balanço de energia para uma área qualquer de um MF que cede calor para a vizinhança, na qual “ τ ” representa a transmitância, “ α ” a absortividade, “ G_T ” a irradiação solar, “ η_c ” a eficiência do MF na conversão para eletricidade, “ U_L ” o coeficiente global de troca de calor e “ T_c ” e “ T_a ” representam, respectivamente, as temperaturas do módulo e ambiente.

$$(\tau\alpha)G_T = \eta_c G_T + U_L(T_c - T_a) \quad (12)$$

4.4.1.2 Características de carga e sistemas de acoplamento direto

Uma CF vai operar a uma tensão e corrente com características compatíveis com as da carga a qual ela está conectada. Entre alguns exemplos de características de carga, pode-se citar uma carga resistiva, uma bateria, um motor em série ou a própria rede elétrica. Os exemplos dados nessa seção são de sistemas diretamente conectados.

Geradores fotovoltaicos podem ser utilizados para suprir máquinas, tais como bombas elétricas, refrigeradores e outros dispositivos. Existem diversos tipos de motores que operam a corrente contínua (CC), cada um com diferentes características. A velocidade com a qual os motores operam é uma função da tensão e do torque, que em contrapartida depende das características da carga do motor. Dessa maneira, uma análise da operação dos geradores fotovoltaicos que fornecem energia para os motores necessita ser uma solução simultânea das características de todos os componentes.

Dispositivos de CC conectados diretamente a geradores fotovoltaicos tendem a não operar de forma muito adequada (ou seja, distante do ponto de máxima potência, para diversos níveis de RS), sendo justificável, nessa situação, a utilização de equipamentos de condicionamento de energia. Uma bateria poderia ser conectada ao sistema, sendo carregada quando há corrente proveniente do gerador fotovoltaico superior à corrente de operação do dispositivo e descarregada quando o gerador não produzisse o suficiente.

Em um circuito paralelo, composto de arranjo fotovoltaico, bateria e dispositivo, a tensão entre os terminais de cada um dos componentes é a mesma, e em condições de operação a corrente do arranjo fotovoltaico é igual à soma das correntes da bateria e do dispositivo.

O uso efetivo de geradores fotovoltaicos em várias aplicações vai depender de sistemas mais complexos que os de acoplamento direto, utilizando dispositivos para controlar a tensão (sacrificando um pouco da potência) que buscam pontos de máxima potência.

4.4.1.3 Controladores de carga

Controladores de carga possuem a função principal de proteger a bateria do sistema de sobrecargas e de descargas excessivas. Alguns sistemas são projetados para que possa haver compensação em caso de excesso ou falta de energia. Existe perda de carga no processo de rastreamento e, dependendo do sistema, podem ser utilizados inversores. Em situações práticas, a capacidade do sistema pode ser considerada infinita, caso a capacidade da rede conectada seja maior que a do sistema fotovoltaico.

Entre alguns exemplos de aplicações de controladores de carga, pode-se citar sistemas de refrigeração, monitoramento, comunicação, residenciais, instalações de bombeamento, etc.

Mais recentemente, as aplicações se diversificaram ainda mais, devido à facilidade ao acesso da tecnologia (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

4.4.1.4 Procedimentos para projeto

Existem vários paralelos entre o projeto de sistemas térmicos e o de sistemas fotovoltaicos. Alguns aspectos necessitam ser levados em consideração, como por exemplo o custo dos equipamentos. Além disso, deve-se procurar maneiras de se prever como o sistema vai se comportar ao longo do ano. Existem métodos práticos, cálculos, softwares (que podem dar assistência quanto ao dimensionamento, cabeamento, controle e inversores), entre outros.

Um dos métodos existentes utiliza dois passos principais: em um primeiro momento se considera um sistema sem capacidade de armazenamento, para depois, em um segundo momento, se levar em conta os efeitos do armazenamento (seja este finito ou infinito). O tipo de sistema mais simples para se analisar é aquele em que a capacidade de armazenamento excede a capacidade de geração. Caso o oposto ocorra, há o problema adicional de se determinar quanta energia deve ser utilizada, armazenada ou “vendida”. Em casos de sistemas com armazenamento finito, é necessário estimar a produção de energia extra quando as baterias estiverem totalmente carregadas (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

4.4.2 O efeito Joule

A colisão de elétrons que constituem uma corrente elétrica com partículas de um material condutor produz calor, podendo, dependendo do caso, também produzir luz. O efeito Joule (EJ) é uma lei física que estabelece uma relação entre calor gerado e a corrente elétrica que percorre um condutor em um certo tempo (SILVA JUNIOR, 2012).

O fenômeno é amplamente utilizado na soldagem de metais e em operações cirúrgicas sem sangramento, para citar alguns exemplos. Duas importantes exigências devem ser atendidas para que o EJ seja observado: o material deve ser tanto condutor elétrico (ou semicondutor) quanto condutor térmico. Este fenômeno pode ser utilizado para curar um material externamente, e a potência necessária para ativar um material depende da intensidade. O EJ é geralmente observado em materiais como fibras, fios e filmes (ORELLANA *et al.*, 2021).

A Equação 13 relaciona a potência elétrica dissipada (P_d) com a resistência elétrica (R_E) do condutor e com a corrente elétrica existente (BIESUZ *et al.*, 2021):

$$P_d = R_E I^2 \quad (13)$$

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Desenvolveu-se o sistema desidratador solar utilizado nesse trabalho no âmbito do projeto FUNCAP – INOVAFIT 2015, Edital N° 14, envolvendo os docentes do PPGEM da UFC Ana Fabíola Leite Almeida (Coordenadora do projeto e orientadora dessa dissertação) e Francisco Nivaldo Aguiar Freire (também membro da banca dessa dissertação), dois alunos de mestrado (também do PPGEM da UFC) e seis alunos do curso de graduação em Engenharia de Energias Renováveis. Finalizou-se a sua construção em 2019 e encontrava-se em uso na empresa Polpa de Frutas Meu Suco LTDA, instalada na zona rural da cidade de Ibiapina, estado do Ceará.

Realizaram-se restaurações (pois havia componentes que não estavam funcionando adequadamente) e uma otimização nesse sistema desidratador solar, para então se adquirir e instalar sensores e atuadores. Somente após a realização dessas atividades iniciou-se os experimentos.

5.1 Restauração e otimização do sistema desidratador

5.1.1 Restauração

A antiga resistência elétrica do sistema (Figura 6) deixou de funcionar, sendo substituída por outra de mesmo modelo, com potência declarada de 600 W, quando submetida a uma tensão de 220 V. É a resistência elétrica que atua como fonte de calor do equipamento, possibilitando o aquecimento do ar destinado à desidratação das frutas.

Figura 6 – Antiga resistência elétrica do sistema.



Fonte: Próprio autor.

Junto da resistência, manteve-se as muitas partículas de óxido de alumínio, que já vinham sendo utilizadas e que atuam como armazenador de calor, aumentando a eficiência do processo. Esses componentes foram novamente envoltos e mantidos agregados por uma pequena tela de aço inoxidável, e o conjunto foi mais uma vez armazenado em recipiente metálico (fixado na região inferior da câmara de secagem), dessa vez revestido de um isolamento térmico de poliestireno expandido (isopor), conforme Figura 7, em vez do que vinha sendo utilizado, de lã de vidro.

Figura 7 – Recipiente metálico da resistência elétrica, isolado termicamente.



Fonte: Próprio autor.

O recipiente que contém a resistência elétrica possui um furo em sua face inferior, com aproximadamente 7 cm de diâmetro, por onde é admitido ar ambiente (soprado pelo exaustor, posicionado logo abaixo). A região superior do recipiente é aberta e se encontra fixada à região inferior da câmara de secagem, que por sua vez também possui um furo (com um diâmetro de 6 cm) para condução de ar, dessa vez aquecido (após contato com a resistência elétrica).

Verificou-se, após ser recarregada, que a antiga bateria do sistema mantinha uma tensão de apenas 10 V, sendo necessária uma tensão de 12 V. Logo, substituiu-se a antiga bateria por uma nova, de mesmo modelo (Heliar Freedom Estacionária C-100 165 Ah, Figura 8). A bateria é recarregada pelos MF's, com intermédio do controlador de carga, e é descarregada pela resistência elétrica.

Figura 8 – Bateria Heliar Freedom Estacionária C-100 165 Ah.



Fonte: Próprio autor.

O sistema desidratador utiliza um total de quatro fusíveis (para proteção contra curtos-circuitos e seccionamento do circuito elétrico de CC, proveniente dos MF's), sendo que havia apenas dois nos compartimentos destinados a eles. Dessa forma, adquiriu-se e instalou-se quatro fusíveis de mesma especificação (Gave 16A 500 V CA 120 kA).

Por fim, reparou-se a borracha de vedação da câmara de secagem (Figura 9), que apresentava partes soltas, utilizando silicone. Essa borracha evita que o ar aquecido escape pelo vão existente entre a porta da câmara e a câmara.

Figura 9 – Borracha de vedação da câmara de secagem.



Fonte: Próprio autor.

5.1.2 Otimização

Houve melhorias em se tratando do armazenamento da maioria dos componentes elétricos que compõem o sistema de geração fotovoltaica de eletricidade. Tais componentes se encontravam fixados em peças de madeira já bastante gastas e danificadas (representadas na Figura 10, estando o inversor, o controlador de carga e os compartimentos dos fusíveis presentes no item “a”, enquanto que o item “b” representa o controlador de temperatura e o contactor) e foram montados em um quadro de energia próprio, representando externamente (Figura 11) e internamente (Figura 12).

Figura 10 – a) Inversor, controlador de carga e compartimentos dos fusíveis fixados em madeira;

b) Controlador de temperatura e contactor fixados em madeira.



a)

b)

Fonte: Próprio autor.

Figura 11 – Quadro de energia, exterior.



Fonte: Próprio autor.

Figura 12 – Quadro de energia, interior.



Fonte: Próprio autor.

Sobre o laboratório no qual produziu-se este trabalho encontra-se uma plataforma ao ar livre, na qual instalou-se um par de MF's (fabricante Waris, modelo WRS250-ST60F) ligados em paralelo, com CF's de silício multicristalino, gerando uma potência de pico combinada de 500 W e possuindo uma área combinada de 3,26 m². Orientou-se esses MF's na direção norte, com uma inclinação de aproximadamente 3° em relação à horizontal e a uma altura mínima de 17 cm acima da plataforma.

Para uma constante geração de fluxo de ar para a resistência elétrica, adquiriu-se um exaustor de ar (Loren Sid 30 cm bivolt 130 W, Figura 13), cuja rotação passou a ser controlada por meio da instalação de um dimmer regulador de tensão elétrica. Para um melhor direcionamento do fluxo de ar para a resistência, utilizou-se um bocal adaptado junto ao exaustor (Figura 14). Visando otimizar a saída de ar umidificado da câmara de secagem, abriu-se um furo lateral em sua parte superior, de 32 mm de diâmetro, utilizando-se uma serra-copo.

Figura 13 – Exaustor de ar Loren Sid 30 cm bivolt 130 W.



Fonte: Próprio autor.

Figura 14 – Sistema exaustor-bocal.



Fonte: Próprio autor.

Em testes realizados com o equipamento, constatou-se que o antigo inversor (Unitron iVolt 700), que fornecia corrente elétrica à resistência, não teve a capacidade de elevar a temperatura do ar dentro da câmara de secagem para além de 45 °C. O mesmo apresentou sinal sonoro e luminoso de erro, com desligamento involuntário, seguido de instabilidade no seu funcionamento, após ligar novamente, também de forma involuntária. Tendo isso em vista, optou-se pela aquisição de um novo inversor (Knup KP-550A 2000 W), dessa vez com maior capacidade (2000 W, frente aos 700 W do antigo), representado pela Figura 15.

Figura 15 – Inversor Knup KP-550A 2000 W.



Fonte: Próprio autor.

Também em testes realizados com o equipamento, verificou-se que o antigo controlador de carga do sistema (Schneider Xantrex C60 60A 12/24 V) não estava fornecendo corrente elétrica à bateria, o que impossibilitava a sua recarga automática por parte dos MF's. Dessa forma, obteve-se um novo controlador de carga (PWM Epever Solar 20A 12/24 V, modelo VS2024AU), representado na Figura 16:

Figura 16 – Controlador de carga PWM Epever Solar 20A 12/24 V.



Fonte: Próprio autor.

Além dos componentes elétricos citados, adquiriu-se outros mais para o equipamento, sendo principalmente utilizados na composição do quadro de energia. Todos os componentes adquiridos para o sistema elétrico do equipamento (com exceção dos utilizados no sensoriamento e armazenamento de dados, detalhados no próximo tópico), para a realização desse trabalho, se encontram listados na Tabela 1:

Tabela 1 – Componentes do sistema elétrico do equipamento.

Item	Quantidade
Quadro de comando (Cemar) QCS - (80x60x20) cm	1
Canaleta Heladuct aberta (30x30) mm HD-2P	1
Trilho Din para fixação de contactor CH20, 1m	2
Dispositivo de proteção contra surtos (DPS) Solar 1040V 40 kA	1
Conector de passagem 8WA1011-1DH11 6 mm	4
Conector de passagem 8WA1011-1DF11 2,5 mm	20
Cabo flexível 750 V Conduscabos PT 1,5 mm ²	30
Cabo controle 500V flex PT (20x1) mm	3
Fiação 6 mm ² (10 m vermelha, 10 m preta, 3 m verde)	1
Disjuntor 10 A	1
Resistência Elétricas 600 W 220 V	1
Bateria Heliar Freedom Estacionária C-100 165 Ah	1
Fusível Gave 16A 500 V CA 120 kA	4
Exaustor Loren Sid 30 cm bivolt 130 W	1
Dimmer regulador de tensão	1
Inversor Knup KP-550A 2000 W	1
Controlador de carga PWM Epever Solar 20A 12/24 V	1

Fonte: Próprio autor.

5.2 Aquisição e instalação de sensores e atuadores

Após a realização da restauração de alguns dos componentes e da otimização do sistema desidratador, realizou-se a aquisição dos sensores e dos atuadores utilizados nos experimentos, junto com a instalação desses componentes.

5.2.1 Sensores e atuadores

O microcontrolador utilizado no processo de obtenção e armazenamento de dados desse trabalho encontra-se presente em uma placa compatível com Arduino Mega 2560 (presente na Figura 17), alimentada por meio de uma fonte 5V (conectada à entrada USB da placa) ligada à rede industrial 220V CA.

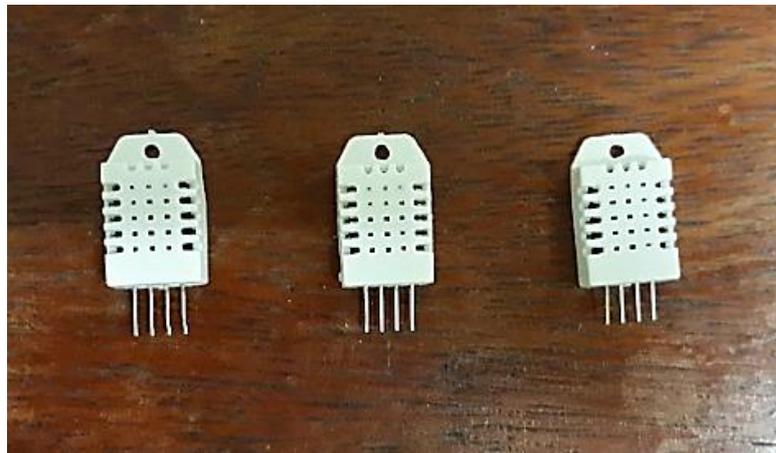
Figura 17 – Placa compatível com Arduino Mega 2560.



Fonte: Próprio autor.

Esse microcontrolador recebe dados dos sensores ligados à placa (GUIMARÃES, 2019), sendo três sensores de TBS e URA (DHT22, representados na Figura 18) e um sensor de corrente elétrica (ACS712, representado na Figura 19, com capacidade para corrente de até 20 A) e envia os dados que foram recebidos desses sensores para o atuador (um módulo de cartão micro SD, presente na Figura 20, onde são armazenados em um cartão micro SDHC ali inserido).

Figura 18 – Sensores DHT22.



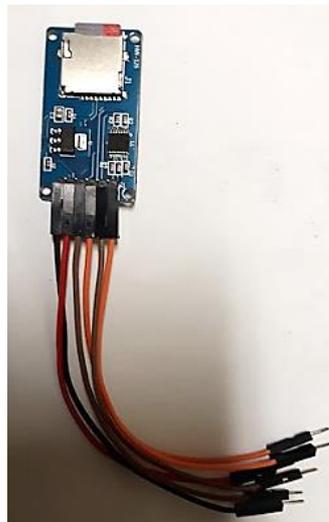
Fonte: Próprio autor.

Figura 19 – Sensor ACS712.



Fonte: Próprio autor.

Figura 20 – Módulo de cartão micro SD com cartão micro SDHC inserido e jumpers.



Fonte: Próprio autor.

Os processos de obtenção e armazenamento de dados foram geridos por meio de um código para cada fruta (escritos utilizando a interface específica do Arduino Mega 2560, disponível no site do fabricante da placa original), códigos esses inseridos no microcontrolador por meio de uma conexão USB presente na placa. O código completo utilizado na desidratação de maçã encontra-se no Apêndice A.

Independentemente da placa compatível com Arduino Mega 2560, temos o termopar do tipo J (Figura 21, item “a”), responsável por enviar dados de TBS para o controlador de temperatura do sistema (Inova INV-20002, representado na Figura 21, item “b”).

Figura 21 – a) Termopar do tipo J; b) Controlador de temperatura; c) Contactor.



Fonte: Próprio autor.

No controlador de temperatura é determinada uma temperatura-limite superior (no caso, 75 °C), que quando alcançada há um desligamento da resistência elétrica. Ela será ligada novamente quando a temperatura lida pelo termopar do tipo J for igual a temperatura-limite inferior estabelecida, de 72 °C. Nessa configuração, verificou-se, utilizando-se três termômetros Prolab max/min DIG-20+70/-50+70 SH-102, que a temperatura nas bandejas utilizadas para a desidratação tende a estabilizar em 60 °C, temperatura em que, no geral, a maioria dos alimentos pode ser desidratada (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011). O contactor do sistema (Figura 21, item “c”) vai atuar nessa função de ligar ou desligar a resistência, se comportando, nessa situação, como um atuador, visto que o controlador de temperatura envia comandos a ele.

5.2.2 Instalação

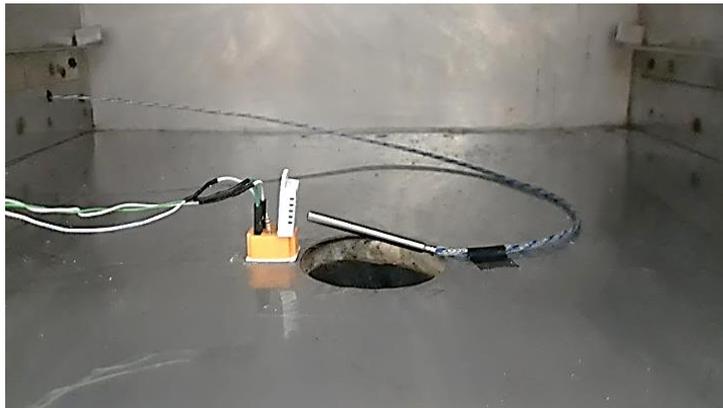
Os três sensores DHT22 foram instalados em três locais distintos: no suporte externo da câmara de secagem (aqui convencionou-se chamar de DHT22 1, Figura 22, que coleta dados para TBS e URA ambiente), na entrada da câmara de secagem (DHT22 2, Figura 23) e na saída da câmara de secagem (DHT22 3, Figura 24)

Figura 22 – DHT22 1.



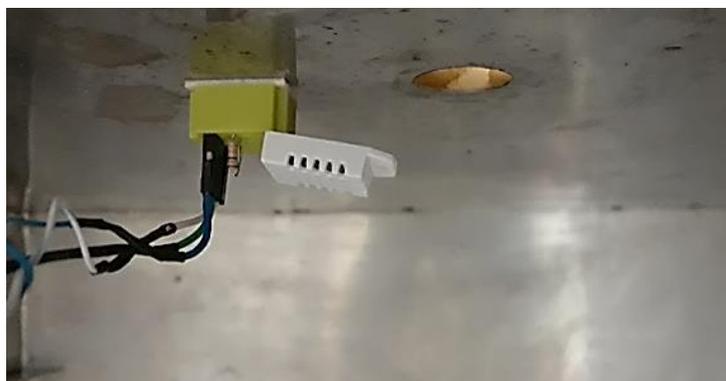
Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – DHT22 2.



Fonte: Próprio autor.

Figura 24 – DHT22 3.



Fonte: Próprio autor.

Os DHT22 possuem quatro pinos cada e foram conectados cada um a uma pequena protoboard (MAGANHA, 2019), fixadas com fita dupla-face às suas respectivas superfícies. Da esquerda para a direita, o primeiro e o último pinos são para alimentação, e são conectados em

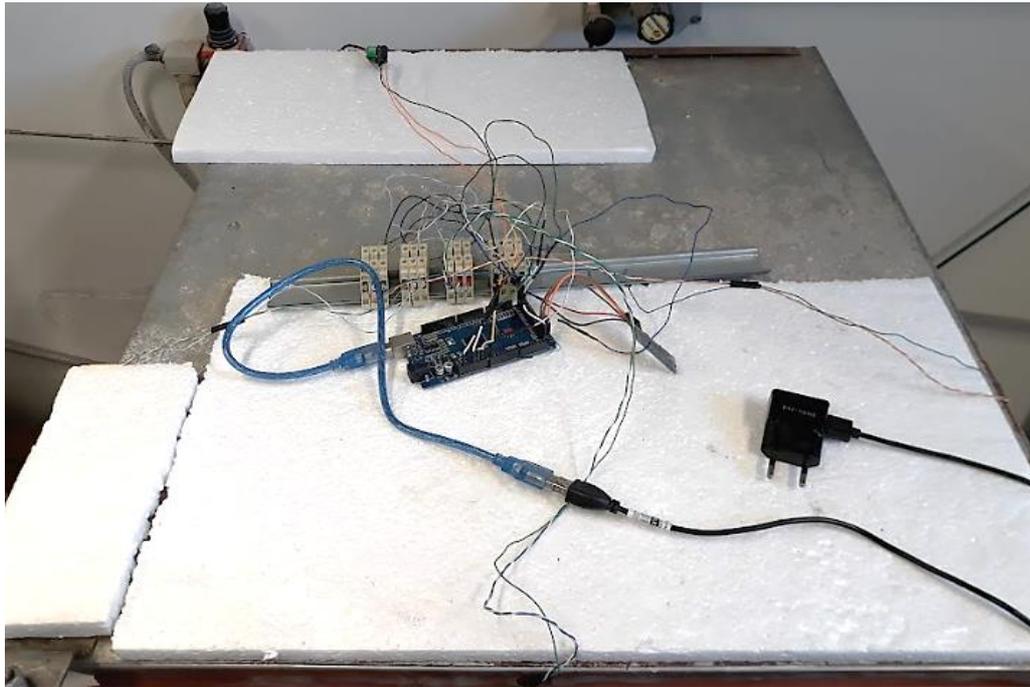
portas “5V” e “GND” da placa compatível com Arduino, respectivamente. O segundo pino é o de dados (pino OUT), e é conectado a alguma das portas digitais da placa, uma vez que o sensor é digital. O terceiro pino não possui função (SHAMSHIRI, 2018).

Em cada uma das protoboards fez-se uma ligação utilizando-se um resistor de 10 k Ω , na função de *pull-up*, entre a fileira correspondente ao pino de alimentação “5V” e a fileira correspondente ao pino de dados (GUIMARÃES, 2018). Por fim, devido à considerável distância entre os DHT22 e a placa controladora, fez-se necessário o prolongamento dos jumpers conectores, utilizando-se cabos de rede soldados, de aproximadamente 2,0 m de comprimento.

O sensor ACS712 foi posicionado logo acima da câmara de secagem. Possui três pinos, sendo o primeiro e o terceiro para alimentação (ligados em portas GND e 5V da placa, respectivamente) e o segundo pino, dados (conectado a alguma das portas analógicas da placa, uma vez que o sensor é analógico). O sensor possui, em sua outra extremidade, dois conectores, onde se ligam em série as seções dos filamentos onde há corrente elétrica. No caso desse sistema desidratador, ligou-se dessa forma um dos fios de alimentação da resistência elétrica, que foi previamente seccionado (JOSÉ, 2015). Para se evitar alguma possível interferência eletromagnética ocasionada pelo fio da resistência elétrica, optou-se por manter o ACS712 a uma distância de aproximadamente 35 cm da placa, das conexões e do módulo de cartão micro SD, também utilizando-se prolongamentos soldados, feitos com cabos de rede.

O módulo de cartão micro SD e a placa compatível com Arduino Mega 2560 também foram posicionados externamente, logo acima da câmara de secagem. O módulo de cartão micro SD possui seis pinos, sendo os dois primeiros de alimentação (também ligados em portas GND e 5V da placa, respectivamente) e os quatro pinos restantes ligados em portas digitais específicas da placa (para uma placa compatível com Arduino Mega 2560, portas 50 a 53) (RAMBO, 2018) (STRAUB, 2018). Como auxílio às ligações realizadas entre os diversos componentes e a placa compatível com Arduino Mega 2560, optou-se por utilizar uma régua de bornes, também colocada acima da câmara de secagem. Posicionou-se folhas de isopor entre a parede superior externa da câmara e os componentes localizados acima dela, para um maior isolamento térmico desses componentes, conforme a Figura 25:

Figura 25 – Componentes localizados acima da câmara de secagem.



Fonte: Próprio autor.

As ligações realizadas entre os sensores, junto do atuador, e a placa compatível com Arduino Mega 2560 (excluindo-se as ligações de alimentação GND e 5V) podem ser resumidas na Tabela 2:

Tabela 2 – Ligações entre sensores, atuador e a placa compatível com Arduino Mega 2560.

Sensor / Atuador	Pino do sensor / atuador	Pino da placa
DHT22 1	OUT	22
DHT22 2	OUT	23
DHT22 3	OUT	24
ACS712	OUT	A0
Módulo de cartão micro SD	CS	53
	SCK	52
	MOSI	51
	MISO	50

Fonte: Próprio autor.

Posicionou-se o termopar do tipo J junto à entrada da câmara de secagem, conforme Figura 23 (ao lado do sensor DHT22 2), sendo inserido na câmara através de um furo passante de 8,0 mm de diâmetro, aberto na lateral do compartimento. O controlador de temperatura foi fixado a um rasgo feito na tampa do quadro de energia, conforme a Figura 11. Por fim, fixou-se o contactor

dentro do quadro de energia. Todos os componentes elétricos do equipamento (com suas respectivas ligações) encontram-se representados no diagrama elétrico presente no Apêndice B.

5.3 Experimentos

Para a realização dos experimentos de desidratação de maçã e banana, utilizou-se três das bandejas disponíveis na câmara de secagem (as quais convencionou-se chamar inferior, intermediária e superior, conforme pode ser visto na Figura 26). Procurou-se dispor as frutas na região mais central de cada bandeja.

Figura 26 – Bandejas utilizadas nos experimentos.



Fonte: Próprio autor.

Cada tipo de fruta foi desidratado individualmente, durante 14 h, dividido em dois dias não-consecutivos de 7 h cada (deu-se pelo menos um dia de intervalo entre os dias em que houve desidratação, chegando até a três dias de intervalo, para que a bateria pudesse ser recarregada, no qual as frutas foram mantidas em geladeira, dentro de recipientes fechados). Para desidratação solar indireta, tem-se que produtos agrícolas são desidratados de 15 a 30 h (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011). No entanto, optou-se por desidratações com durações um pouco inferiores a esse período médio. Segundo o Global Solar Atlas, a irradiação direta normal e a irradiação horizontal difusa médias obtidas para o Campus do Pici (onde realizou-se os experimentos) são de 5,269 kWh/m².dia e 2,168 kWh/m².dia, respectivamente.

5.3.1 Desidratação de maçã

Fatiou-se as seis maçãs utilizadas no experimento (duas maçãs dispostas em cada bandeja) de forma longitudinal, conforme ilustra a Figura 27. A Tabela 3 indica a massa inicial de maçã presente em cada bandeja, obtida por meio de uma balança digital (Útil Eletro SF-400):

Figura 27 – Maçãs fatiadas, antes da desidratação.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 3 – Massa inicial de maçã em cada bandeja.

Bandeja	Massa inicial (g)
Inferior	212
Intermediária	193
Superior	208

Fonte: Próprio autor.

Após a colocação das maçãs, fechou-se a porta da câmara de secagem e ligou-se a fonte 5V na placa compatível com Arduino Mega 2560, já contendo o cartão de memória inserido no módulo próprio. Carregou-se o código destinado à obtenção de dados para a desidratação de maçã (utilizando-se um notebook), ligou-se a resistência e o exaustor (em uma rotação intermediária) e teve início o experimento, durante o qual manteve-se as caixas dos fusíveis (no quadro de energia) fechadas, para que os MF's também fornecessem energia à resistência, e a porta do quadro de energia, aberta (para um melhor resfriamento do inversor). O primeiro dia de desidratação durou de 08 h 50 min às 15 h 50 min, e o segundo, de 08 h 44 min às 15 h 44 min. Coletou-se e armazenou-se os dados no cartão de memória a cada 2 min.

5.3.2 Desidratação de banana

Fatiou-se as seis bananas utilizadas no experimento (duas bananas dispostas em cada bandeja) também de forma longitudinal, conforme ilustra a Figura 28. A Tabela 4 indica a massa inicial de banana presente em cada bandeja:

Figura 28 – Bananas fatiadas, antes da desidratação.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 – Massa inicial de banana em cada bandeja.

Bandeja	Massa inicial (g)
Inferior	123
Intermediária	114
Superior	121

Fonte: Próprio autor.

Após a disposição das bananas nas bandejas, adotou-se procedimento idêntico ao realizado na desidratação das maçãs, mas dessa vez carregando-se na placa compatível com Arduino o código destinado à obtenção de dados para a desidratação de banana. O primeiro dia de desidratação durou de 08 h 51 min às 15 h 51 min, e o segundo, de 08 h 53 min às 15 h 53 min.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Maçã

Após as 14 h de desidratação (divididas em dois dias), desligou-se a fonte da placa

compatível com Arduino, o inversor e o exaustor. Retirou-se as bandejas contendo maçãs fatiadas da câmara de secagem (estando as maçãs representadas na Figura 29) e verificou-se novamente a massa das frutas, além de se calcular a redução percentual de massa (Tabela 5). Maçãs possuem 85,56% de água em sua composição (BRENNAN, 2020).

Figura 29 – Maçãs fatiadas, após a desidratação.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 – Massa final de maçã em cada bandeja e percentual de massa perdido.

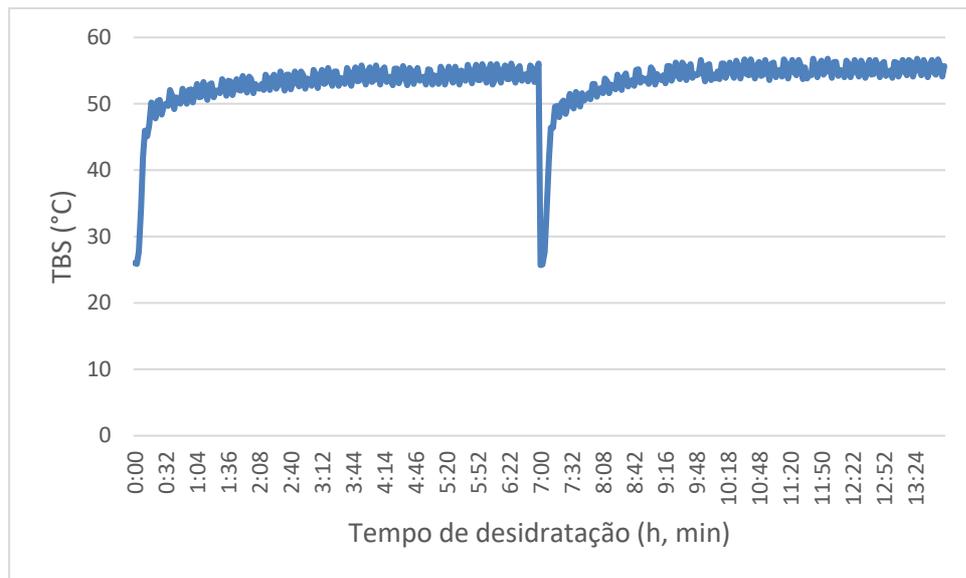
Bandeja	Massa final (g)	Redução de massa (%)
Inferior	59	72
Intermediária	40	79
Superior	46	78

Fonte: Próprio autor.

Houve uma redução média da massa de água total de 89%.

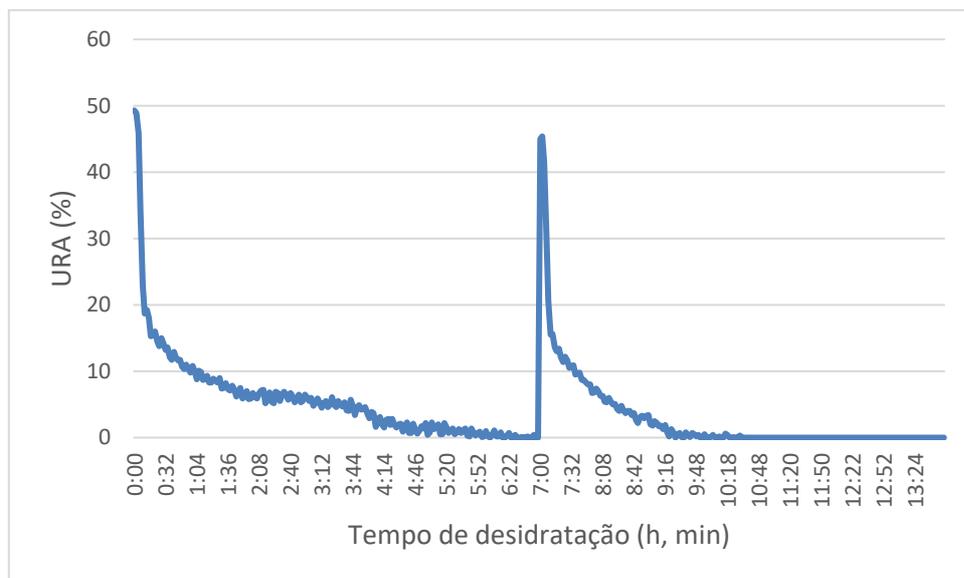
O sensor DHT22 1 apresentou os valores médios de TBS e URA ambiente de 25,8 °C e 43,9 %, respectivamente. A partir dos dados coletados nos sensores DHT22 2 (entrada da câmara de secagem) e DHT22 3 (saída da câmara), pode-se plotar os Gráficos 5 a 8. Todos os gráficos expostos como resultados foram elaborados com auxílio de Excel.

Gráfico 5 – TBS ao longo da desidratação de maçã na entrada da câmara.



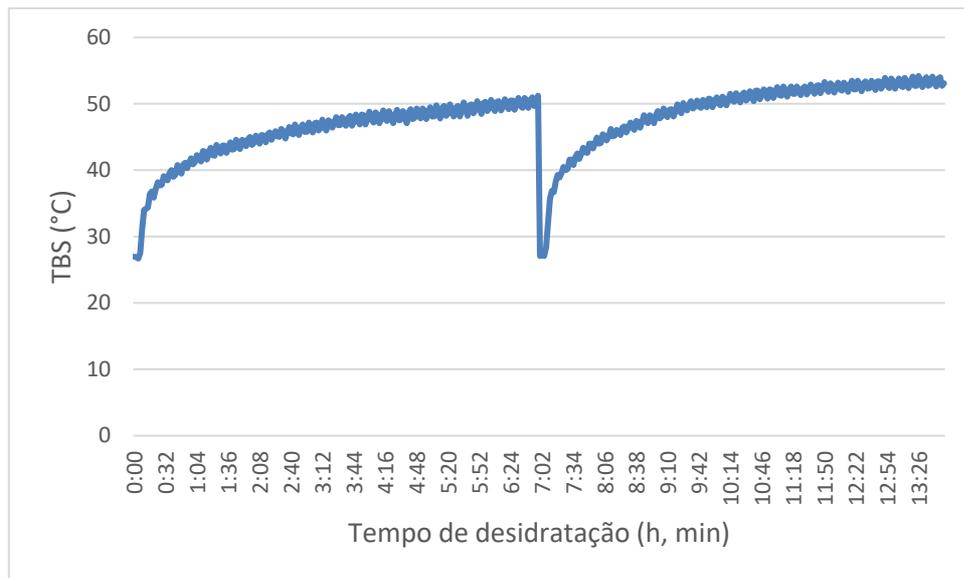
Fonte: Próprio autor.

Gráfico 6 – URA ao longo da desidratação de maçã na entrada da câmara.



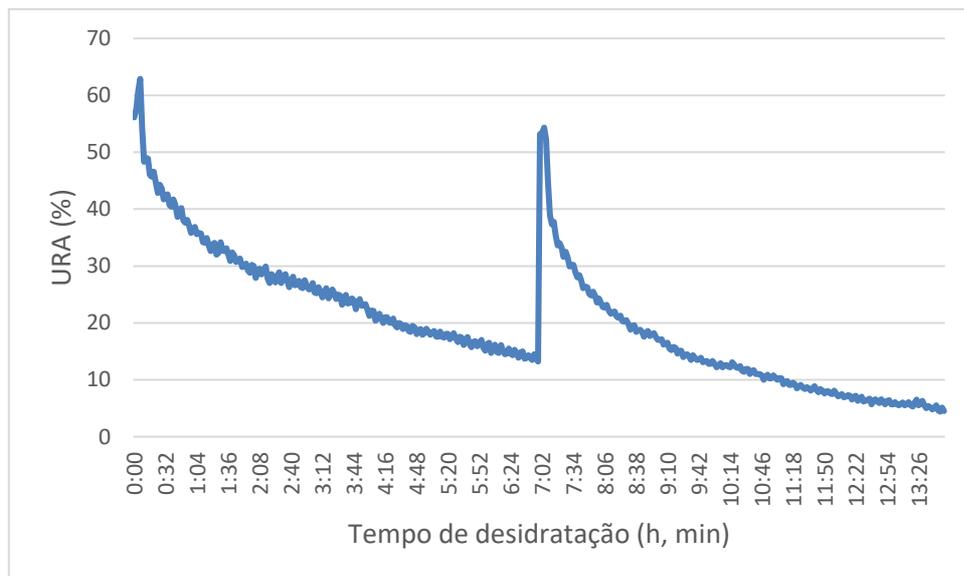
Fonte: Próprio autor.

Gráfico 7 – TBS ao longo da desidratação de maçã na saída da câmara.



Fonte: Próprio autor.

Gráfico 8 – URA ao longo da desidratação de maçã na saída da câmara.



Fonte: Próprio autor.

O sensor ACS712 forneceu dados de intensidade de corrente elétrica na resistência ao longo da desidratação (tanto ligada quanto desligada), com um valor eficaz médio de 1,070 A. A parte do programa destinada ao ACS712 também forneceu dados de potência elétrica dissipada pela resistência, sendo simplesmente o produto da intensidade de corrente elétrica eficaz pela tensão elétrica eficaz (constante e igual a 220 V). Logo, foi obtido o valor eficaz médio para a potência elétrica dissipada de 235,34 W.

6.2 Banana

Após o término da desidratação de banana, adotou-se procedimento idêntico ao realizado ao fim da desidratação de maçã. A Figura 30 ilustra as bananas após a desidratação, com a Tabela 6 indicando a massa final e a redução percentual de massa das frutas. Bananas possuem 74,9 % de água em sua composição (U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2019).

Figura 30 – Bananas fatiadas, após a desidratação.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 – Massa final de banana em cada bandeja e percentual de massa perdido.

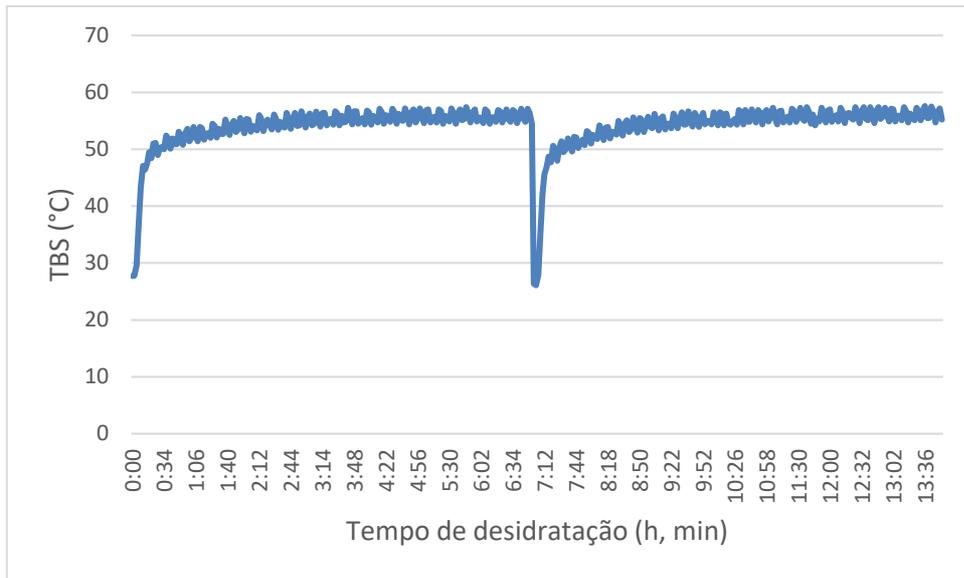
Bandeja	Massa final (g)	Redução de massa (%)
Inferior	42	66
Intermediária	43	62
Superior	45	63

Fonte: Próprio autor.

Houve uma redução média da massa de água total de 85%.

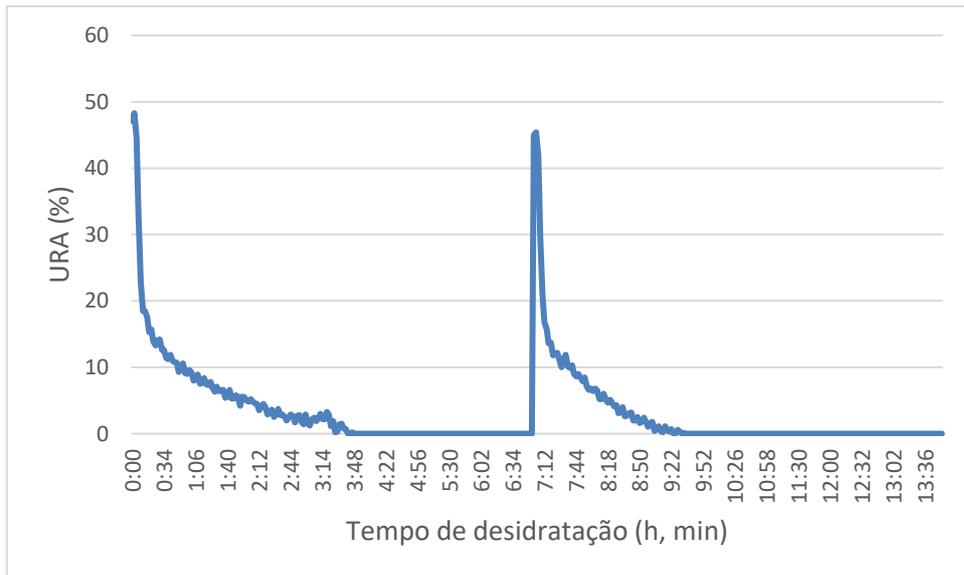
O sensor DHT22 1 apresentou os valores médios de TBS e URA ambiente de 26,0 °C e 42,9 %, respectivamente. Plotou-se os Gráficos 9 a 12 a partir dos sensores DHT22 2 e DHT22 3:

Gráfico 9 – TBS ao longo da desidratação de banana na entrada da câmara.



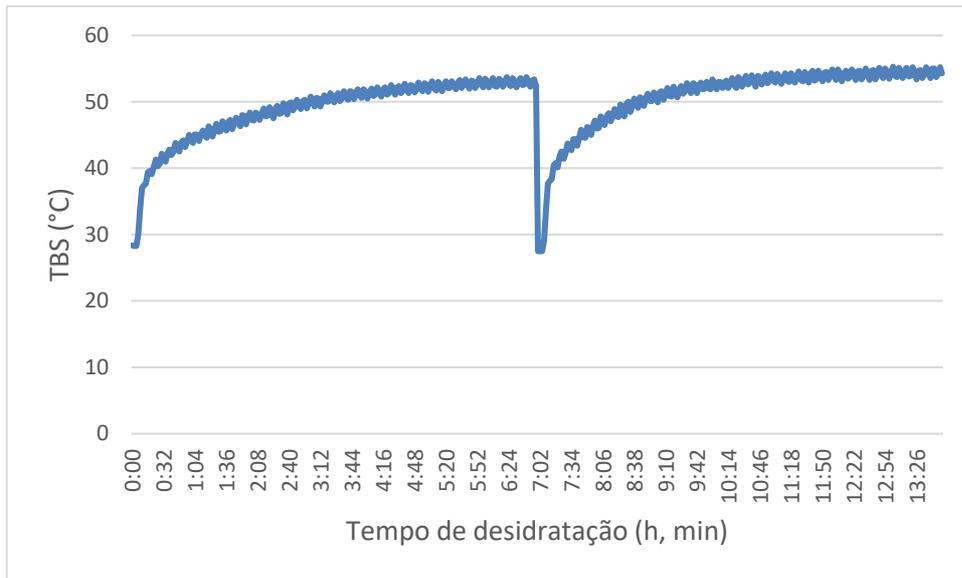
Fonte: Próprio autor.

Gráfico 10 – URA ao longo da desidratação de banana na entrada da câmara.



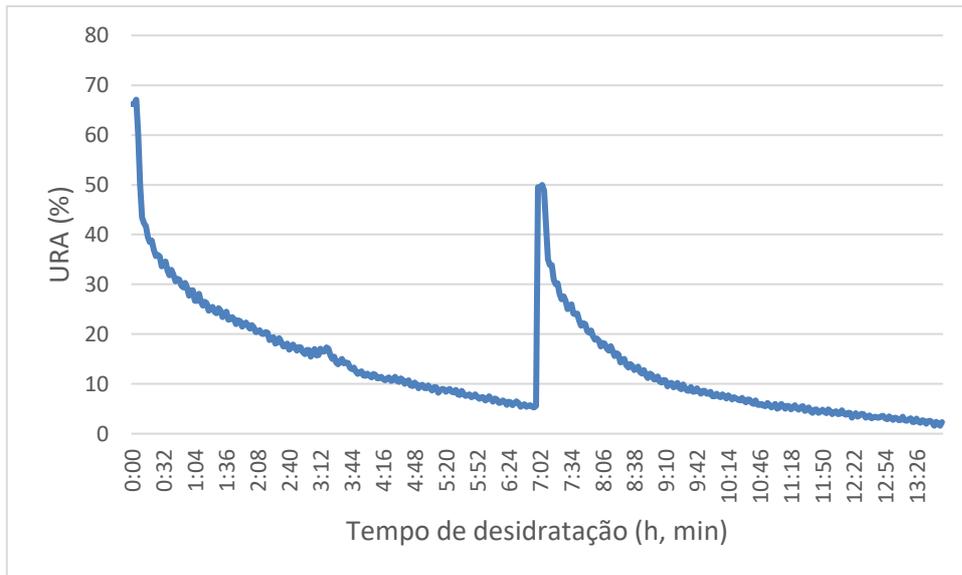
Fonte: Próprio autor.

Gráfico 11 – TBS ao longo da desidratação de banana na saída da câmara.



Fonte: Próprio autor.

Gráfico 12 – URA ao longo da desidratação de banana na saída da câmara.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, a partir dos dados obtidos por meio do sensor ACS712, obteve-se o valor eficaz médio de intensidade de corrente elétrica de 1,054 A e o valor eficaz médio de potência elétrica dissipada de 231,95 W.

7. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que os objetivos foram plenamente alcançados e que o equipamento desidratador solar via ar aquecido apresentou um funcionamento adequado, após realizadas as operações de restauração e otimização. Passadas as 14 h de desidratação, as frutas perderam grande parte de sua massa de água total, não havendo grandes diferenças de percentual de redução de massa de uma bandeja para outra, na desidratação de cada fruta, indicando um equilíbrio psicrométrico na câmara.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ligar o exaustor e a fonte da placa compatível com Arduino no inversor, de modo que eles também possam ser alimentados por meio de energia solar.
- Melhorar a refrigeração do inversor no quadro de energia (sugestão: utilização de coolers acoplados ao quadro).
- Utilizar mini-balanças impressas em impressora 3D e acoplar nelas células de carga (para monitoramento da variação de massa das frutas enquanto desidratam). Complementar o código para esse fim, utilizar sensores HX711.
- Utilizar um MF a mais, para se reduzir o tempo de recarga da bateria.

REFERÊNCIAS

AMANOR-ATIEMOH, Robert *et al.* Effect of simultaneous dual-frequency ultrasound aided ethanolic pretreatment on drying kinetics, bioactive compounds, antioxidant activity, and physicochemical properties of apple slices using pulsed vacuum dryer. **Journal of Food Process Engineering**, [S.L.], v. 43, n. 11, 11 set. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jfpe.13535>.

Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpe.13535>>. Acesso em: 01 dez. 2020.

BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E.. Solar drying. **Solar Energy**, [S.L.], v. 85, n. 8, p. 1665-1691, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.001>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09002333?via%3Dihub>>.

Acesso em: 01 dez. 2020.

BIESUZ, Mattia *et al.* A review of electromagnetic processing of materials (EPM): heating, sintering, joining and forming. **Journal of Materials Science & Technology**, [S.L.], v. 69, n. 8, p. 239-272, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2020.06.049>.

Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030220307106?via%3Dihub>>.

Acesso em: 01 dez. 2020.

BRENNAN, Dan (ed.). **Foods High in Water**. 2020. Disponível em: <<https://www.webmd.com/diet/foods-high-in-water>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

CHEN, Aiqiang *et al.* Experimental study on moisture kinetics and microstructure evolution in apples during high power microwave drying process. **Journal of Food Engineering**, [S.L.], v. 292, p. 110-362, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110362>. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877420304489?via%3Dihub>>.

Acesso em: 01 dez. 2020.

CIURZYŃSKA, Agnieszka; LENART, Andrzej. Freeze-Drying - Application in Food Processing and Biotechnology - a Review. **Polish Journal Of Food And Nutrition Sciences**, [S.L.], v. 61, n. 3, p. 165-171, 30 set. 2011. Institute of Animal Reproduction and Food Research of the Polish Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.2478/v10222-011-0017-5>.

DONADO-PESTANA, Carlos M. *et al.* Polyphenols of cambuci (*Campomanesia phaea* (O. Berg.)) fruit ameliorate insulin resistance and hepatic steatosis in obese mice. **Food Chemistry**, [S.L.], v. 340, p. 128-169, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128169>. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814620320318?via%3Dihub>>.

Acesso em: 01 dez. 2020.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A.. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4th ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013

EL-SEBAIL, A.A.; SHALABY, S.M.. Solar drying of agricultural products: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 37-43, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.134>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111003819#bib0015>>. Acesso em: 23 mar. 2021.

FERNANDES, Beatriz Pasquali. **O Papel da Atividade de Água na Indústria Alimentícia**, 10 set. 2020. Disponível em < <https://www.btaaditivos.com.br/br/blog/o-papel-da-atividade-de-agua-na-industria-alimenticia-/106/>>. Acesso em: 12 set. 2022.

GLOBAL SOLAR ATLAS. **Fortaleza, -03°44'47", -038°34'45", Rua Planalto do Pici, Fortaleza, Ceará, Brasil**. Disponível em <<https://globalsolaratlas.info/detail?c=-3.741958,-38.547592,11&s=-3.746412,-38.579178&m=site>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

GUIMARÃES, Flávio. **Arduino nos Laboratórios – Curso de Arduino para Iniciantes, primeiros passos – Aula 03**, 9 jul. 2019. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=idcF9H4yXXk&list=PL7CjOZ3q8fMe3KCjvLPid3xD3VvOUPdvU&index=5>>. Acesso em: 03 set. 2021.

GUIMARÃES, Flávio. **Sensor de Temperatura e Umidade Relativa do Ar**, 28 set. 2018. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=DsV6eajPUdo>>. Acesso em: 05 set. 2021.

HAMMAMI, Chokri; RENÉ, Frédéric. Determination of freeze-drying process variables for strawberries. **Journal Of Food Engineering**, [S.L.], v. 32, n. 2, p. 133-154, maio 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0260-8774\(97\)00023-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0260-8774(97)00023-x). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026087749700023X>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

JOSÉ, Lucas. **Como usar o sensor de corrente ACS712 com Arduino**, 26 Set. 2015. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=GBysmlfuKmg&t=196s>>. Acesso em: 14 dez. 2021.

LIU, Fangze *et al.* Highly efficient photoelectric effect in halide perovskites for regenerative electron sources. **Nature Communications**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 1-12, 29 jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-021-20954-6>. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41467-021-20954-6>>. Acesso em: 19 maio 2021.

LUCHESE, Cláudia Leites; GURAK, Poliana Deyse; MARCZAK, Ligia Damasceno Ferreira. Osmotic dehydration of physalis (*Physalis peruviana* L.): evaluation of water loss and sucrose incorporation and the quantification of carotenoids. **Lwt - Food Science And Technology**, [S.L.], v. 63, n. 2, p. 1128-1136, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2015.04.060>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643815003424>>. Acesso em: 24 mar. 2021.

MAGANHA, Gabriel V. Silva. **Curso Arduino: conheça os sensores de temperatura e umidade DHT11 e DHT22**, 14 out. 2019. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=RH8xTOYVBYg>>. Acesso em: 20 maio 2022.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2009.

MOREIRA, José Roberto Simões (Org.). **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. Rio de Janeiro: Ltc, 2017.

NOWACKA, Małgorzata; DADAN, Magdalena; TYLEWICZ, Urszula. Current Applications of Ultrasound in Fruit and Vegetables Osmotic Dehydration Processes. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 1269-1276, 30 jan. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app11031269>. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/3/1269/htm>>. Acesso em: 24 mar. 2021.

ONWUDE, Daniel I.; HASHIM, Norhashila; CHEN, Guangnan. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. **Trends in Food Science & Technology**, [S.L.], v. 57, n. 1, p. 132-145, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.012>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224416303302#bib62>>. Acesso em: 16 mar. 2021.

ONWUDE, Daniel I. *et al.* Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: a review. **Comprehensive Reviews in Food Science And Food Safety**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 599-618, 4 fev. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.12196>. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1541-4337.12196>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

ORELLANA, Jaime *et al.* Self-Healing Polymer Nanocomposite Materials by Joule Effect. **Polymers**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 649-656, 22 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym13040649>. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/13/4/649/htm>>. Acesso em: 03 jun. 2021.

ORTIZ-RODRÍGUEZ, N.M. *et al.* Drying kinetics of natural rubber sheets under two solar thermal drying systems. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 165, n. 1, p. 438-454, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.035>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120317766?via%3Dihub>>. Acesso em: 02 dez. 2020.

RADOJČIN, Milivoj *et al.* Effect of Selected Drying Methods and Emerging Drying Intensification Technologies on the Quality of Dried Fruit: a review. **Processes**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 132-139, 9 jan. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/pr9010132>. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-9717/9/1/132/htm>>. Acesso em: 11 mar. 2021.

RAMBO, Wagner. **Cartão SD com Arduino de um jeito muito simples**, 10 jun. 2018. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=uj5eSph5KuM&t=177s>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

SHAMSHIRI, Ahmad. **How to use DHT22 AM3302 Temperature and Humidity sensor with Arduino**, 7 jan. 2018. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=oi_GPSLjgBY>. Acesso em: 16 maio 2022.

SILVA JUNIOR, Ivo Chaves da. **CEL033 Circuitos Lineares I**: Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Juiz de Fora. 2012. Disponível em: <https://www.ufjf.br/ivo_junior/files/2010/01/CEL033_AULA_02_2012.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2021.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. Saiz. **Refrigeração Industrial**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

STRAUB, Matheus Gebert. Projeto Arduino SD Card: Leitura e Escrita de Dados no Cartão Micro SD. **Usinainfo Eletrônica e Robótica**, 6 ago. 2018. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/blog/projeto-arduino-sd-card-leitura-e-escrita-de-dados-no-cartao-micro-sd/>>. Acesso em: 15 dez. 2021.

U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **FoodData Central Search Results – Bananas, raw**. 2019. Disponível em: <<https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/173944/nutrients>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

ZHU, Zhengjie; MAO, Kaitian; XU, Jixian. Perovskite tandem solar cells with improved efficiency and stability. **Journal of Energy Chemistry**, [S.L.], set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jechem.2020.09.022>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495620306574?via%3Dihub>>. Acesso em: 01 dez. 2020

APÊNDICE A – CÓDIGO UTILIZADO NA OBTENÇÃO DE DADOS DURANTE A DESIDRATAÇÃO DE MAÇÃ

Encontra-se a seguir o código completo utilizado na obtenção e armazenamento de dados durante a desidratação de maçã. O código para o processo de desidratação de banana difere apenas nos nomes dos arquivos .txt utilizados no armazenamento de dados (presentes, por exemplo, na seção “Criação e teste dos arquivos .txt” desse código), para que dados correspondentes à desidratação de frutas diferentes não fossem armazenados em um mesmo arquivo. Adotou-se a convenção de nomes de arquivos começando com “M” e “B” para maçã e banana, respectivamente.

/*

CÓDIGO PARA DESIDRATAÇÃO DE MAÇÃ.

Para a realização dos experimentos, utilizou-se 4 sensores em 4 portas do Arduino Mega 2560, sendo 1 analógica e 3 digitais. Além disso, para o módulo de cartão micro SD, utilizou-se 4 portas digitais.

*/

// INCLUSÃO DE BIBLIOTECAS

// BIBLIOTECA DOS SENSORES DHT22 (TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR)

#include <dht.h>

/* NÃO FORAM NECESSÁRIAS BIBLIOTECAS PARA O SENSOR ACS712 (CORRENTE ELÉTRICA) */

// BIBLIOTECAS DO MÓDULO DE CARTÃO MICRO SD

#include <SPI.h>

#include <SD.h>

// NOMENCLATURA UTILIZADA PARA AS PORTAS

#define Temp_umidade_1 22

#define Temp_umidade_2 23

#define Temp_umidade_3 24

int Corrente_Eletrica = A0;

/*

MÓDULO DE CARTÃO MICRO SD

CS 53

SCK 52

MOSI 51

MISO 50

*/

// CRIANDO VARIÁVEIS E INSTANCIANDO OBJETOS

// DHT22 (TEMPERATURA DE BULBO SECO E UMIDADE RELATIVA DO AR)

dht sensorDHT_1;

dht sensorDHT_2;

dht sensorDHT_3;

// ACS712 (CORRENTE ELÉTRICA)

int sensorValue_aux = 0;

float sensorValue = 0;

float currentValue = 0;

float voltsporUnidade = 0.004887586; // 5% DE 1023

float sensibilidade = 0.100; // PARA O SENSOR DE 20A

int tensao = 220;

// MÓDULO DE CARTÃO MICRO SD

File TempUmidade_1;

File TempUmidade_2;

File TempUmidade_3;

File CorrenteEletrica;

void setup() {

// PISCAR O LED ONBOARD UMA VEZ, QUANDO SE CONECTA A FONTE DE ENERGIA OU QUANDO HÁ RESET

pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);

digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);

delay(400);

digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);

// INTERVALO DE 25s PARA FAZER UPLOAD DE PROGRAMA NOVO, CASO NECESSÁRIO

```
delay(25000);

// PISCAR O LED ONBOARD DUAS VEZES, DEPOIS HÁ OS TESTES DOS ARQUIVOS
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
delay(400);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
delay(200);
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
delay(400);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);

// MÓDULO DE CARTÃO MICRO SD

// INICIALIZAR O MÓDULO DE CARTÃO MICRO SD
SD.begin(53);

// CRIAÇÃO E TESTE DOS ARQUIVOS .TXT
// DHT22 N°1 (TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA, 1)
TempUmidade_1 = SD.open("M_Tp_Um1.txt", FILE_WRITE);
TempUmidade_1.println("Testando 1, 2, 3.");
TempUmidade_1.close();

// DHT22 N°2 (TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA, 2)
TempUmidade_2 = SD.open("M_Tp_Um2.txt", FILE_WRITE);
TempUmidade_2.println("Testando 1, 2, 3.");
TempUmidade_2.close();

// DHT22 N°3 (TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA, 3)
TempUmidade_3 = SD.open("M_Tp_Um3.txt", FILE_WRITE);
TempUmidade_3.println("Testando 1, 2, 3.");
TempUmidade_3.close();

// ACS712
CorrenteEletrica = SD.open("M_Cor_EL.txt", FILE_WRITE);
CorrenteEletrica.println("Testando 1, 2, 3.");
CorrenteEletrica.close();
```

```

// DHT22 (TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA)

// DHT22 N° 1
TempUmidade_1 = SD.open("M_Tp_Um1.txt", FILE_WRITE);
TempUmidade_1.println("Status,\tUmidade(%) ,\tTemperatura(C)");
TempUmidade_1.close();

// DHT22 N° 2
TempUmidade_2 = SD.open("M_Tp_Um2.txt", FILE_WRITE);
TempUmidade_2.println("Status,\tUmidade(%) ,\tTemperatura(C)");
TempUmidade_2.close();

// DHT22 N° 3
TempUmidade_3 = SD.open("M_Tp_Um3.txt", FILE_WRITE);
TempUmidade_3.println("Status,\tUmidade(%) ,\tTemperatura(C)");
TempUmidade_3.close();

// NÃO FOI NECESSÁRIO SETUP PARA O SENSOR ACS712 (CORRENTE ELÉTRICA)

// INTERVALO DE 15 s PARA LIGAR A RESISTÊNCIA E O EXAUSTOR
delay(15000);

// LIGAR O LED ONBOARD
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
}

void loop() {

// LOOP DOS SENSORES DHT22 (TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA)

// DHT22 N°1:
// LEITURA DOS DADOS
int chk1 = sensorDHT_1.read22(Temp_umidade_1);

// VERIFICA SE HOVE ERRO
switch (chk1) {

```

```
case DHTLIB_OK:
    TempUmidade_1 = SD.open("M_Tp_Um1.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_1.print("OK,\t");
    TempUmidade_1.close();
    break;
case DHTLIB_ERROR_CHECKSUM:
    TempUmidade_1 = SD.open("M_Tp_Um1.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_1.print("Checksum error,\t");
    TempUmidade_1.close();
    break;
case DHTLIB_ERROR_TIMEOUT:
    TempUmidade_1 = SD.open("M_Tp_Um1.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_1.print("Time out error,\t");
    TempUmidade_1.close();
    break;
case DHTLIB_ERROR_CONNECT:
    TempUmidade_1 = SD.open("M_Tp_Um1.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_1.print("Connect error,\t");
    TempUmidade_1.close();
    break;
case DHTLIB_ERROR_ACK_L:
    TempUmidade_1 = SD.open("M_Tp_Um1.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_1.print("Ack Low error,\t");
    TempUmidade_1.close();
    break;
case DHTLIB_ERROR_ACK_H:
    TempUmidade_1 = SD.open("M_Tp_Um1.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_1.print("Ack High error,\t");
    TempUmidade_1.close();
    break;
default:
    TempUmidade_1 = SD.open("M_Tp_Um1.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_1.print("Unknown error,\t");
    TempUmidade_1.close();
    break;
}
```

```

// EXIBINDO DADOS LIDOS
TempUmidade_1 = SD.open("M_Tp_Um1.txt", FILE_WRITE);
TempUmidade_1.print(sensorDHT_1.humidity, 1 /*FORMATAÇÃO PARA UMA
                                     CASA DECIMAL*/);

TempUmidade_1.print(",\t");
TempUmidade_1.println(sensorDHT_1.temperature, 1 /*FORMATAÇÃO PARA
                                     UMA CASA DECIMAL*/);

TempUmidade_1.close();

// DHT22 N°2:
// LEITURA DOS DADOS
int chk2 = sensorDHT_2.read22(Temp_umidade_2);

// VERIFICA SE HOUE ERRO
switch (chk2) {
  case DHTLIB_OK:
    TempUmidade_2 = SD.open("M_Tp_Um2.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_2.print("OK,\t");
    TempUmidade_2.close();
    break;

  case DHTLIB_ERROR_CHECKSUM:
    TempUmidade_2 = SD.open("M_Tp_Um2.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_2.print("Checksum error,\t");
    TempUmidade_2.close();
    break;

  case DHTLIB_ERROR_TIMEOUT:
    TempUmidade_2 = SD.open("M_Tp_Um2.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_2.print("Time out error,\t");
    TempUmidade_2.close();
    break;

  case DHTLIB_ERROR_CONNECT:
    TempUmidade_2 = SD.open("M_Tp_Um2.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_2.print("Connect error,\t");
    TempUmidade_2.close();
    break;

  case DHTLIB_ERROR_ACK_L:

```

```

    TempUmidade_2 = SD.open("M_Tp_Um2.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_2.print("Ack Low error,\t");
    TempUmidade_2.close();
    break;
case DHTLIB_ERROR_ACK_H:
    TempUmidade_2 = SD.open("M_Tp_Um2.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_2.print("Ack High error,\t");
    TempUmidade_2.close();
    break;
default:
    TempUmidade_2 = SD.open("M_Tp_Um2.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_2.print("Unknown error,\t");
    TempUmidade_2.close();
    break;
}

// EXIBINDO DADOS LIDOS
TempUmidade_2 = SD.open("M_Tp_Um2.txt", FILE_WRITE);
TempUmidade_2.print(sensorDHT_2.humidity, 1 /*FORMATAÇÃO PARA UMA
                                CASA DECIMAL*/);

TempUmidade_2.print("\t\t");
TempUmidade_2.println(sensorDHT_2.temperature, 1 /*FORMATAÇÃO PARA
                                UMA CASA DECIMAL*/);

TempUmidade_2.close();

// DHT22 N°3:
// LEITURA DOS DADOS
int chk3 = sensorDHT_3.read22(Temp_umidade_3);

// VERIFICA SE HOUE ERRO
switch (chk3) {
    case DHTLIB_OK:
        TempUmidade_3 = SD.open("M_Tp_Um3.txt", FILE_WRITE);
        TempUmidade_3.print("OK,\t");
        TempUmidade_3.close();
        break;

```

```

case DHTLIB_ERROR_CHECKSUM:
    TempUmidade_3 = SD.open("M_Tp_Um3.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_3.print("Checksum error,\t");
    TempUmidade_3.close();
    break;
case DHTLIB_ERROR_TIMEOUT:
    TempUmidade_3 = SD.open("M_Tp_Um3.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_3.print("Time out error,\t");
    TempUmidade_3.close();
    break;
case DHTLIB_ERROR_CONNECT:
    TempUmidade_3 = SD.open("M_Tp_Um3.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_3.print("Connect error,\t");
    TempUmidade_3.close();
    break;
case DHTLIB_ERROR_ACK_L:
    TempUmidade_3 = SD.open("M_Tp_Um3.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_3.print("Ack Low error,\t");
    TempUmidade_3.close();
    break;
case DHTLIB_ERROR_ACK_H:
    TempUmidade_3 = SD.open("M_Tp_Um3.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_3.print("Ack High error,\t");
    TempUmidade_3.close();
    break;
default:
    TempUmidade_3 = SD.open("M_Tp_Um3.txt", FILE_WRITE);
    TempUmidade_3.print("Unknown error,\t");
    TempUmidade_3.close();
    break;
}

// EXIBINDO DADOS LIDOS
TempUmidade_3 = SD.open("M_Tp_Um3.txt", FILE_WRITE);
TempUmidade_3.print(sensorDHT_3.humidity, 1 /*FORMATAÇÃO PARA
UMA CASA DECIMAL*/);
TempUmidade_3.print(",\t");

```

```

TempUmidade_3.println(sensorDHT_3.temperature, 1 /*FORMATAÇÃO PARA
UMAS CASAS DECIMAL*/);

TempUmidade_3.close();

// LOOP DO SENSOR ACS712 (CORRENTE ELÉTRICA)

// LAÇO DE REPETIÇÃO COM DURAÇÃO DE 10 s
for(int index = 10000; index > 0; index--) {
  sensorValue_aux = (analogRead(Corrente_Eletrica) - 510); // LÊ O SENSOR NO PINO
ANALÓG. A0 E AJUSTA O VALOR LIDO
  sensorValue += pow(sensorValue_aux,2); // SOMA OS QUADRADOS DAS LEITURAS
  delay(1);
}
  sensorValue = (sqrt(sensorValue/10000)) * voltsporUnidade; /*FINALIZA O CÁLCULO
DA MÉDIA QUADRÁTICA E AJUSTA O VALOR LIDO PARA VOLTS*/

// CÁLCULO DA CORRENTE CONSIDERANDO A SENSIBILIDADE DO SENSOR
(100 mV POR AMPÈRE)
  currentValue = (sensorValue/sensibilidade);

// TRATAMENTO PARA POSSÍVEL RUÍDO
if(currentValue <= 0.227){ // ORIGINALMENTE 0.095
  currentValue = 0;
}
  sensorValue =0;

// MOSTRA O RESULTADO
  CorrenteEletrica = SD.open("M_Cor_EL.txt", FILE_WRITE);
  CorrenteEletrica.print("Corrente : ");
  CorrenteEletrica.print(currentValue, 3 /*FORMATAÇÃO PARA TRÊS CASAS
DECIMAIS*/);

  CorrenteEletrica.print(" A ");
  CorrenteEletrica.print(" Potencia (Consumo) : "); /* CALCULA E MOSTRA O VALOR
DA POTÊNCIA*/
  CorrenteEletrica.print(currentValue * tensao);
  CorrenteEletrica.println(" Watts ");

```

```
CorrenteEletrica.close();
```

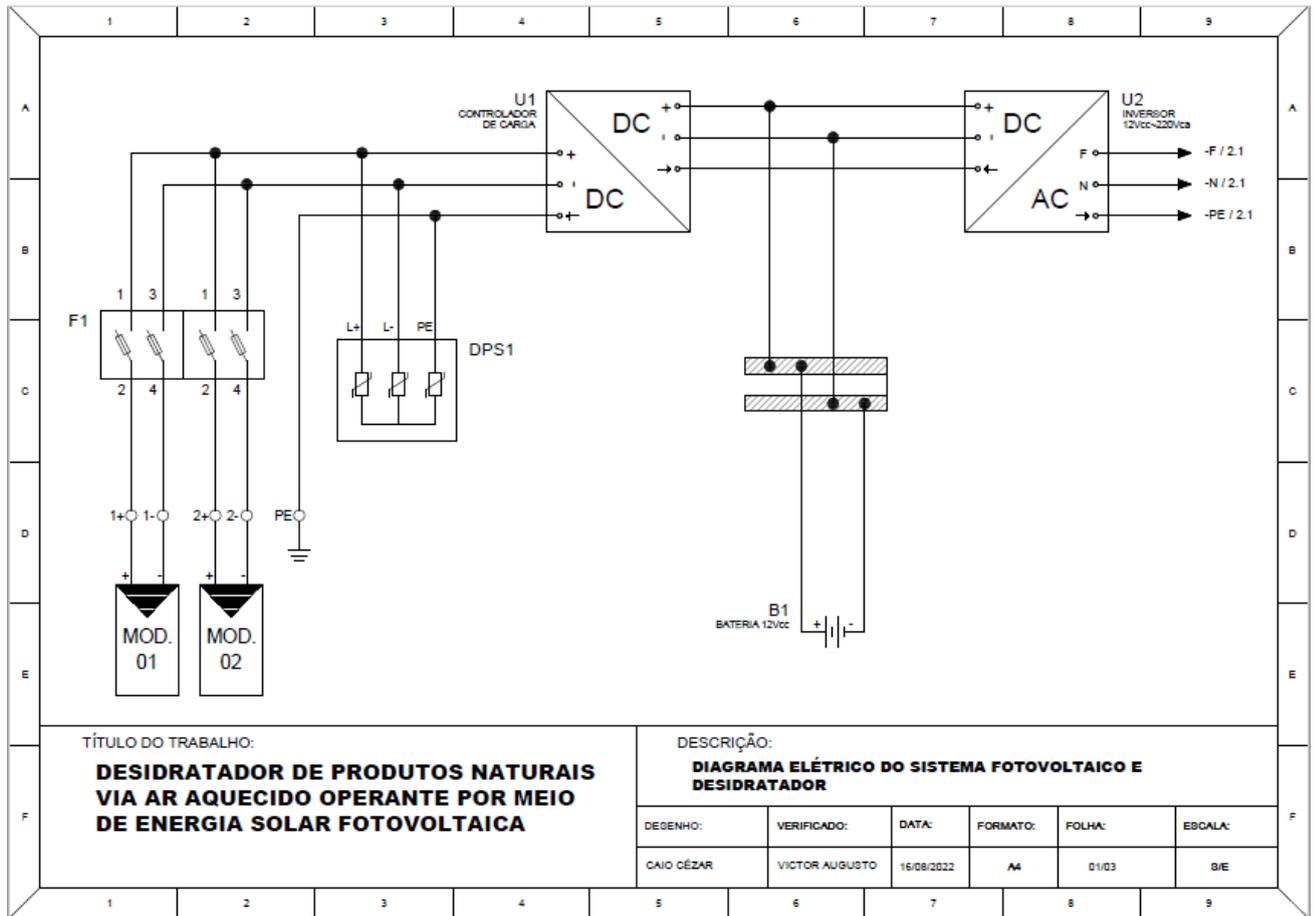
```
// DETERMINAÇÃO DE UM INTERVALO DE 120 s (2 min) ENTRE AS SÉRIES DE  
DADOS
```

```
// JÁ CONSIDERANDO O DELAY DE 10 s EXISTENTE NO SENSOR ACS712  
(CORRENTE ELÉTRICA)
```

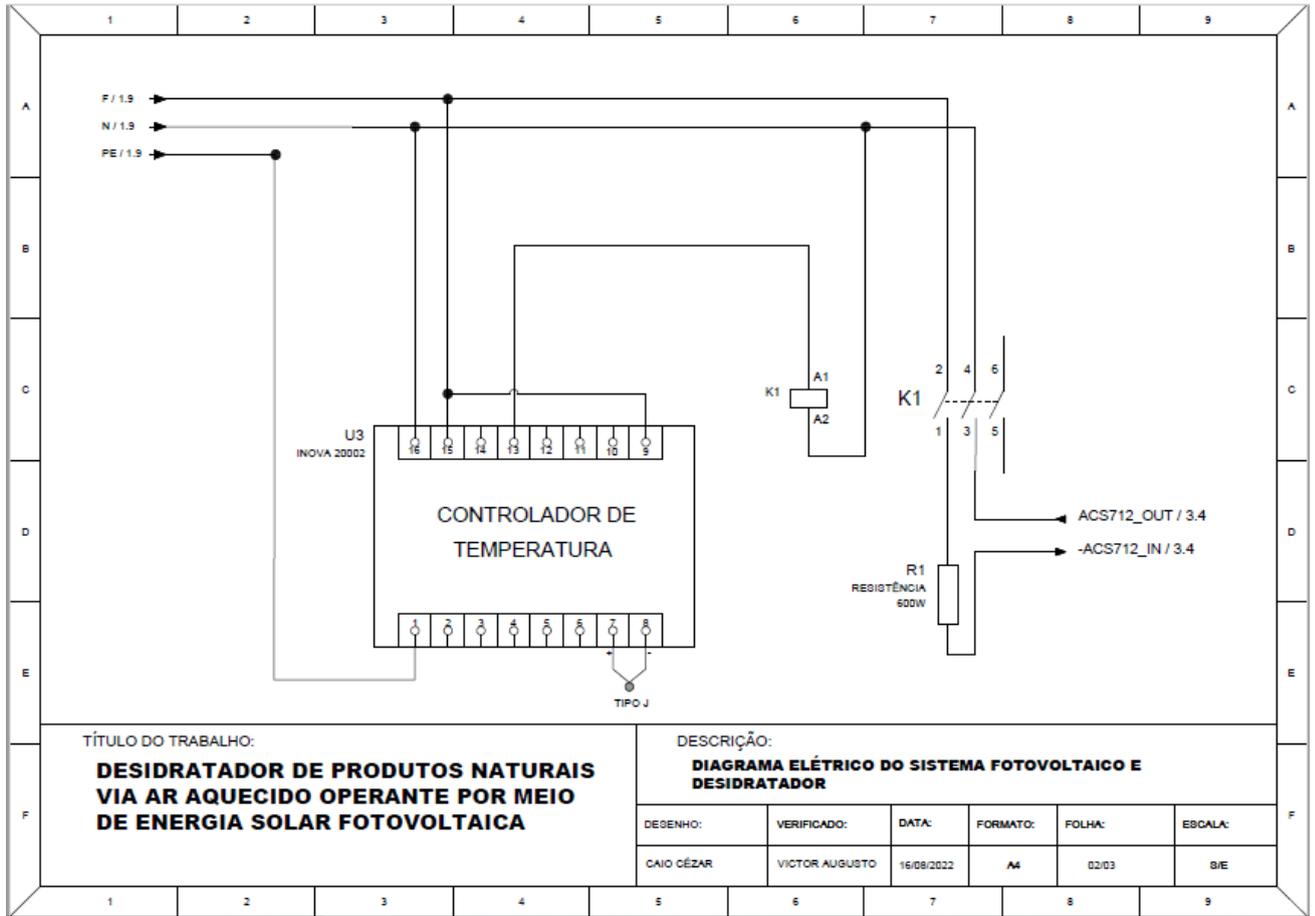
```
delay(110000);
```

APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO

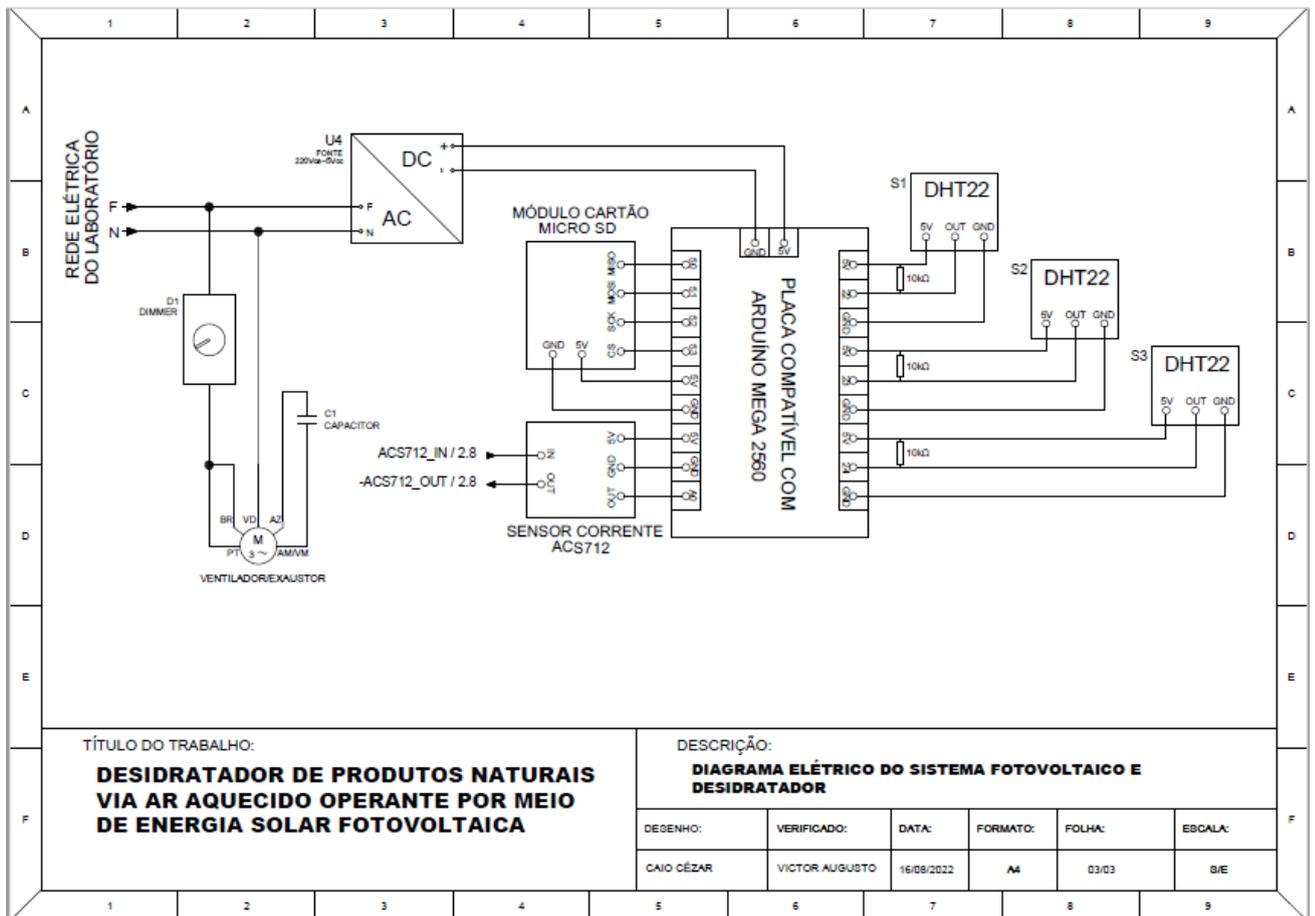
Encontram-se representados no diagrama elétrico a seguir todos os componentes elétricos do equipamento, com suas respectivas ligações.



Fonte: Próprio autor.



Fonte: Próprio autor.



Fonte: Próprio autor.

ANEXO A – PRESSÃO DE SATURAÇÃO DA ÁGUA

Encontra-se representado a seguir um trecho da tabela de propriedades termodinâmicas da água saturada (líquido-vapor), na qual pode-se obter valores da PSA (em bar) de acordo com a temperatura (em °C).

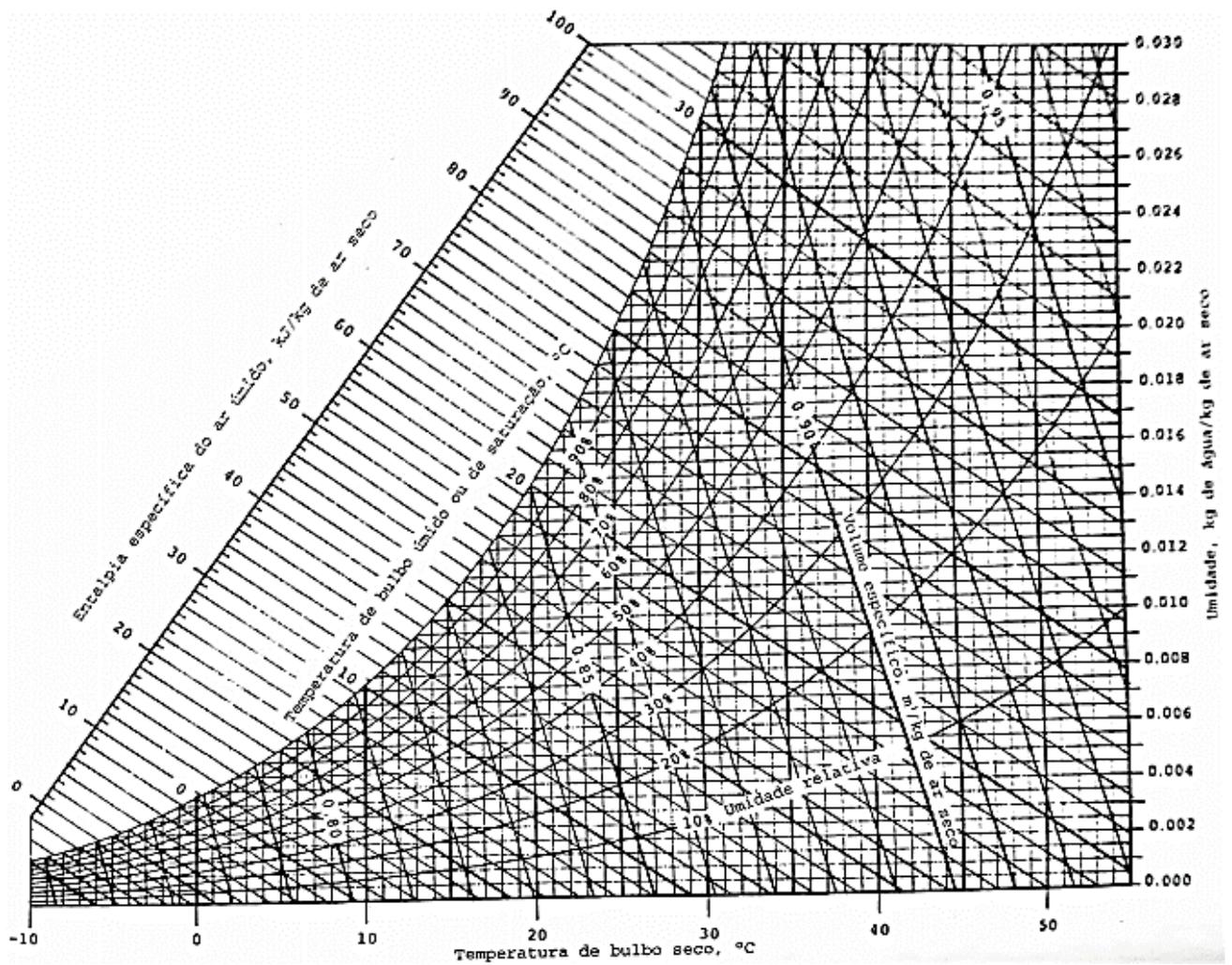
Temp. °C	Press. bar
0,01	0,00611
4	0,00813
5	0,00872
6	0,00935
8	0,01072
10	0,01228
11	0,01312
12	0,01402
13	0,01497
14	0,01598
15	0,01705
16	0,01818
17	0,01938
18	0,02064
19	0,02198
20	0,02339
21	0,02487
22	0,02645
23	0,02810
24	0,02985
25	0,03169
26	0,03363
27	0,03567
28	0,03782
29	0,04008
30	0,04246
31	0,04496
32	0,04759
33	0,05034
34	0,05324
35	0,05628
36	0,05947
38	0,06632
40	0,07384
45	0,09593

Temp. °C	Press. bar
50	0,1235
55	0,1576
60	0,1994
65	0,2503
70	0,3119
75	0,3858
80	0,4739
85	0,5783
90	0,7014
95	0,8455
100	1,014
110	1,433
120	1,985
130	2,701
140	3,613
150	4,758
160	6,178
170	7,917
180	10,02
190	12,54
200	15,54
210	19,06
220	23,18
230	27,95
240	33,44
250	39,73
260	46,88
270	54,99
280	64,12
290	74,36
300	85,81
320	112,7
340	145,9
360	186,5
374,14	220,9

Fonte: Moran e Shapiro (2009, p. 688).

ANEXO B – CARTA PSICROMÉTRICA PARA PRESSÃO BAROMÉTRICA DE 101,325 kPa

A CP a seguir traz a representação de diversas grandezas para o AU a uma pressão barométrica de 101,325 kPa.



Fonte: Moran e Shapiro (2009, p. 790).