UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

KEYSE SANTOS ANDRADE

PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE UM SECADOR SOLAR HÍBRIDO PARA A SECAGEM DE ENTRECASCA DE MANDIOCA

São Cristóvão (SE)

2024

KEYSE SANTOS ANDRADE

PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE UM SECADOR SOLAR HÍBRIDO PARA SECAGEM DE ENTRECASCA DE MANDIOCA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado

São Cristóvão (SE)

2024

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

A553p

Andrade, Keyse Santos
Projeto, construção e avaliação da performance de um secador solar híbrido para a secagem de entrecasca de mandioca / Keyse Santos Andrade; orientador Manoel Marcelo do Prado. – São Cristóvão, SE, 2024.
137 f.; il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, 2024.

1. Engenharia química . 2. Biomassa. 3. Mandioca - secagem. 4. Radiação infravermelha. 5. Equipamento de secagem. 6. Tecnologia apropriada. I. Prado, Manoel Marcelo do, orient. II. Título.

CDU 66.047

KEYSE SANTOS ANDRADE

PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE UM SECADOR SOLAR HÍBRIDO PARA A SECAGEM DE ENTRECASCA DE MANDIOCA

Dissertação de Mestrado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe em 30 de agosto de 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado – Orientador
(DEQ/UFS)

Prof. Dr. Paulo Henrique Leite Quintela – Membro Interno ao PEQ/UFS
(DEQ/UFS)

Prof. Dr. José Aguiar dos Santos Júnior – Membro Externo ao PEQ/UFS
(DMEC/UFS)

RESUMO

A entrecasca da mandioca é um resíduo com alto teor de amido, o que possibilita sua aplicação em diversas áreas. Apresenta também grande potencial para a produção de biocombustíveis, como bio-óleo, biogás ou biocarvão. O adequado aproveitamento dessa biomassa é limitado por seu elevado teor de umidade, requerendo, assim, como operação de pré-tratamento, a secagem. Apesar de inúmeros trabalhos sobre a secagem de diferentes tipos de biomassa, no que diz respeito à entrecasca da mandioca são escassas as informações na literatura. Na busca por tecnologias de secagem eficientes que possam agregar valor aos resíduos sólidos do processamento da mandioca a custos competitivos, a secagem solar aparece como uma tecnologia verde, sustentável e que pode ser viável economicamente. Dentro desse contexto, o objetivo deste trabalho foi construir e avaliar o desempenho de um secador solar operando nos modos ativo e indireto, bem como no modo híbrido, no qual a convecção forçada de ar aquecido por energia solar foi combinada com a radiação infravermelho (IV), para a secagem da entrecasca de mandioca. A performance do secador foi analisada em termos da cinética de secagem da biomassa e das eficiências do coletor solar e do processo de secagem propriamente dito. Em ambos os modos de operação foram empregadas duas velocidades do ar, 1,3 e 3,7 m/s. No modo híbrido, a potência da fonte de radiação IV foi de 50 W. Durante os experimentos foram medidas a intensidade de irradiação solar (IR), a temperatura do coletor (T_p), as temperaturas (T_{ar}) e umidades relativas (UR_{ar}) do ar ao longo do secador, e massa e a temperatura da biomassa (T_{bio}). T_p, T_{ar} e UR_{ar} apresentaram valores coerentes, seguindo o comportamento de IR. O escoamento forçado sobre placa absorvedora corrugada de alumínio promoveu um aumento na temperatura do ar entre 5,2 e 13,7°C, com o maior aquecimento observado ao empregar $v_{ar,mín}$ = 1,3 m/s, embora a eficiência do coletor e a taxa de secagem tenham sido menores. O uso da radiação infravermelho como fonte auxiliar de aquecimento causou redução no tempo de secagem, mas aumentou o consumo energético, levando a uma menor eficiência do modo de secagem híbrida. Assim, em termos de custo e eficiência, o melhor desempenho do secador solar desenvolvido foi obtido com o modo indireto-ativo, com v_{ar} de 3,7 m/s, na qual foi possível atingir o teor de umidade alvo, em torno de 15% (b.u), em 260 min de secagem, com uma eficiência de 10,5%.

Palavras-chave: biomassa; bioenergia; secagem solar; radiação infravermelho.

ABSTRACT

The cassava inner bark is a starch-rich residue, which allows its application in several areas. It also has great potential for the production of biofuels, such as bio-oil, biogas or biochar. However, the proper use of this biomass is hindered due to its high moisture content, thus requiring drying as a pre-treatment operation. Despite numerous studies on the drying of different types of biomass, information regarding cassava peel is scarce in the literature. In the search for efficient drying technologies that can add value to cassava processing waste at competitive costs, solar drying emerges as a green, sustainable and economically viable technology. Within this context, the objective of this work was to construct and evaluate the performance of a solar dryer operating in active and indirect modes, as well as in a hybrid mode, where forced convection of air heated by solar energy is combined with infrared radiation (IR) for drying cassava inner bark. The performance of the dryer was analyzed in terms of the drying kinetics of the biomass and the efficiencies of the solar collector and the drying process itself. Two air velocities, 1.3 and 3.7 m/s, were used in both operating modes. In the hybrid mode, the power of the infrared radiation source was 50 W. During the experiments, solar irradiation intensity, collector temperature, air temperatures, and relative humidities along the dryer, as well as biomass mass and temperature, were measured. The collector temperature, air temperatures and relative humidities showed consistent values, following the behavior of solar irradiation. The forced airflow over a corrugated aluminum absorber plate promoted an increase in air temperature between 5.2 and 13.7°C, with the highest heating observed at 1.3 m/s, although the collector efficiency and drying rate were lower. The use of infrared radiation as an auxiliary heating source reduced drying time but increased energy consumption, leading to lower efficiency in the hybrid drying mode. Thus, in terms of cost and efficiency, the best performance of the developed solar dryer was achieved in the indirect-active mode, with an air velocity of 3.7 m/s, where a target moisture content of approximately 15% (wet basis) was reached in 260 minutes of drying, with an efficiency of 10.5%.

Keywords: biomass; bioenergy; solar drying; infrared radiation

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Mandioca (Adaptada de Carioly, 2019). 22
Figura 2.2: Típica estrutura da mandioca (Adaptado de Viera *et al.*, 2021). 22
Figura 2.3: Dez maiores produtores mundiais de mandioca (Adaptação de FAO,2022). 23
Figura 2.4: Cortes da mandioca (Adaptada de Carioly, 2019). 25
Figura 2.5: Bagaço da mandioca pós secagem (Fajardo *et al.*, 2022b). 28
Figura 2.6: Secador de bandejas (Fajardo *et al.*, 2022b). 28
Figura 2.7: Taxa de secagem versus teor de umidade de fatias de cenoura em diferentes potências de infravermelho à velocidade do ar de 1,0 m/s. (Fonte: Kocabiyik, 2010). 28
Figura 2.8: Composição do espectro solar (Fonte: Westphal, 2022)..... 30
Figura 2.9: Características da radiação solar para as massas de ar AM0 (fora da atmosfera) e AM1,5 (dentro da terra) (Fonte: Villalva, 2015).. 30
Figura 2.10: Irradiação, absorção, transmissão e reflexão (Fonte: Jun *et al*., 2010). 31
Figura 2.11: Classificação de secadores solares. 34
Figura 2.12: Secadores solares do tipo direto: (a) Mewa *et al.*, 2019; (b) Krabch *et al*., 2022 35
Figura 2.13: Secadores solares do tipo indireto. (a) Benhamza *et al.*, 2021; (b) Oliveira *et al.*, 2021; (c) Goud *et al*., 2019, e Mugi e Chandramohan, 2022. 37
Figura 2.14: Secador solar misto e híbrido (Fonte: Abedini *et al.*, 2022)..... 40
Figura 2.15: Esquema de secador solar híbrido (Fonte: Adaptado de Mirzaei *et al*, .2022). ... 41
Figura 2.16: Secador hibrido (Fonte: Warji e Tamrim, 2020)..... 42
Figura 2.17: Diagrama esquemático do secador solar de convecção forçada auxiliado por ETC. 1. Chaminé, 2. Câmara de secagem, 3. ETC, 4. Ventilador, 5. Bateria, 6. Inversor, 7. Painel fotovoltaico (Fonte: Veeramanipriya e Sundari, 2021). 43
Figura 2.18: Variação do ângulo de declinação solar ao longo do ano de acordo com a posição da Terra em sua órbita em torno do Sol (Fonte: Villalva, 2015)..... 50
Figura 2.19: Variabilidade do fotoperíodo ao longo do ano para diferentes latitudes (Fonte: Pereira *et al.*, 2015)..... 51
Figura 2.20: Posição do sol definida pelos ângulos azimutal, zenital e da altura solar (Fonte: Villalva, 2015)..... 51
Figura 2.21: Trajetória do movimento aparente do sol ao longo do ano (Fonte: Villalva, 2015). 52
Figura 2.22: Orientação correta voltada para o Norte (Fonte: Villalva, 2015). 53

Figura 2.23: Energia solar ao longo do ano em diferentes inclinações da placa (Fonte: Villalva, 2015). 54
Figura 2.24: Efeito da inclinação da placa (Fonte: Villalva, 2015). 54
Figura 2.25: Variação da energia anual total e energia total do inverno em função da inclinação da superfície para uma latitude de 45◦ N e ângulo azimutal da superfície de 0◦ (Fonte: Duffie e Beckman, 2013). 55
Figura 2.26: Placa Arduíno Mega 2560 (Fonte: Adaptada de Arduino, 2023). 57
Figura 3.1: Fluxograma com as etapas do trabalho. 59
Figura 3.2: Esquema do secador solar híbrido e ativo 60
Figura 3.3: Estrutura do coletor. (a) sem revestimento; (b) com revestimento interno. 63
Figura 3.4: Parte posterior do coletor com orifício. (a) vista externa; (b) vista interna. 63
Figura 3.5: Placa absorvedora. (a) construção; (b) vista frontal. 64
Figura 3.6: Vista superior do coletor com a placa absorvedora e a tampa de vidro. 64
Figura 3.7: Estrutura de madeira da cabine de secagem. 65
Figura 3.8: Cabine de secagem. (a) vista interna; (b) vista frontal; (c) vista traseira; (d) vista lateral. 66
Figura 3.9: Lâmpadas infravermelho. (a) Fora da cabine; (b) dentro da cabine. 67
Figura 3.10: Tubo de conexão. (a) sem isolamento; (b) com isolamento. 67
Figura 3.11: Célula de carga em estrutura 3D. 68
Figura 3.12: Célula de carga posicionada na cabine. 68
Figura 3.13: Célula de carga dentro da balança 69
Figura 3.14: Balança digital. (a) dentro da cabine; (b) fora da cabine. 69
Figura 3.15: Sistema de pesagem. (a) parte externa da cabine; (b) parte interna da cabine. 70
Figura 3.16: Vista lateral do secador solar montado no local de operação. 70
Figura 3.17: Imagens do secador solar. (a) vista frontal; (b) vista traseira. 71
Figura 3.18: Esquema de ligação no Arduíno Mega dos sensores automatizados. 72
Figura 3.19: Resíduo formado pela casca e entrecasca, antes do preparo. 74
Figura 3.20: Entrecasca, após separação e lavagem. 74
Figura 3.21: Entrecascas secas. 75
Figura 3.22: Pedaços da entrecasca. 75
Figura 3.23: Entrecasca triturada no liquidificador. 75
Figura 3.24: Entrecasca triturada. 75
Figura 3.25: Partículas de diâmetro médio de 4,375 mm, retidas na peneira de mesh 5. 76

Figura 4.1: Intensidade de irradiação solar (IR) e temperatura da placa (T_p) em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E1 85
Figura 4.2: Variáveis características do secador em função do tempo, durante o Ensaio E1 (dia nublado). (a) Temperaturas da placa, do ar e da biomassa; (b) umidade relativa do ar. 86
Figura 4.3: Comportamento de variáveis características do secador durante os Ensaios E1 e E2. (a) intensidade de radiação, IR; (b) temperatura da placa, T_p.. 87
Figura 4.4 : Curvas características de temperatura em função do tempo, durante os Ensaios E1 e E2. (a) T_{1e},; (b) T_{1s}; (c) T_{2s} ; (d) T_{bio} 88
Figura 4.5: Evolução temporal da umidade relativa do ar ao longo do secador solar, durante os Ensaios E1 e E2. (a) UR_{1e}; (b) UR_{1s}; (c) UR_{2s}. 89
Figura 4.6: Biomassa seca obtida do Ensaio E1. 90
Figura 4.7: Velocidade do ar (m/s) em diferentes posições da bandeja. 91
Figura 4.8: Bandeja com material centralizado, dentro da cabine. 91
Figura 4.9: Material concentrado na região central da bandeja. 91
Figura 4.10: Curvas características do secador em função do tempo, para o Ensaio E3 (v_{ar} = 3,7 m/s). (a) Temperatura do ar na entrada e saída do coletor e da câmara de secagem, temperatura da placa e temperatura da biomassa; (b) umidade relativa do ar na entrada e saída do coletor e da câmara de secagem.. 92
Figura 4.11: Intensidade de irradiação solar (IR) e temperatura da placa (T_p) em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E3 (v_{ar} = 3,7 m/s). 93
Figura 4.12: Intensidade de radiação solar (IR) em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E3, v_{ar} =3,7 m/s 94
Figura 4.13: Temperatura do ar na entrada, T_{1e}, e saída, T_{1s}, do coletor em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E3, v_{ar} =3,7 m/s. 95
Figura 4.14: Taxa de energia térmica útil (q_a) fornecida pela placa e variação de temperatura do ar no coletor ($\Delta T_{coletor}$) em função do tempo, durante o Ensaio E3.. 96
Figura 4.15: Calor útil de secagem (Q_e) e perda de água (m_w) em função do tempo, durante o Ensaio E3. 97
Figura 4.16: Curvas características de secagem obtidas no Ensaio E3, com v_{ar} = 3,7 m/s. (a) adimensional de umidade, XR, (b) taxa de secagem, -dX/dt, (c) temperatura da biomassa, T_{bio}, em função do tempo. 98
Figura 4.17 : Irradiação solar , IR, e temperatura da placa , T_p, em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E4, v_{ar} = 1,3 m/s. 100

Figura 4.18: Intensidade de radiação solar (IR) em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E4, com v_{ar} = 1,3 m/s. 100
Figura 4.19: Temperatura do ar na entrada, T_{1e}, e saída, T_{1s}, do coletor em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E4, v_{ar} = 1,3 m/s. 101
Figura 4.20: Variações de temperatura do ar (ΔT) no coletor em função do tempo, durante os Ensaios E3 e E4. 102
Figura 4.21: Curvas características de secagem dos Ensaios E3 e E4. (a) adimensional de umidade (XR), (b) taxa de secagem (-dX/dt), (c) temperatura da biomassa (T_{bio}), em função do tempo. 103
Figura 4.22: Intensidade de radiação solar (IR) em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E5 (P_{IV} = 50 W e v_{ar} = 3,7 m/s) 105
Figura 4.23: Temperatura do ar na entrada, T_{1e}, e saída,T_{1s}, do coletor em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E5 (P_{IV} = 50 W e v_{ar} = 3,7 m/s). 105
Figura 4.24: Taxa de energia térmica útil (q_a) fornecida pela placa e variação de temperatura do ar no coletor ($\Delta T_{coletor,}$) em função do tempo, durante o Ensaio E5. 106
Figura 4.25: Calor útil de secagem (Q_e,) e perda de água (m_w) em função do tempo durante o Ensaio E5. 107
Figura 4.26: Curvas características de secagem obtidas no Ensaio E5. (a) adimensional de umidade (XR), (b) taxa de secagem, (-dX/dt), (c) temperatura da biomassa (T_{bio}), em função do tempo. 107
Figura 4.27: Intensidade de radiação solar (IR) em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E6 (P_{IV} = 50 W e v_{ar} = 1,3 m/s)..... 108
Figura 4.28: Temperatura do ar na entrada, T_{1e}, e saída ,T_{1s}, do coletor em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E6 (P_{IV}= 50 W e v_{ar} = 1,3 m/s)..... 109
Figura 4.29: Curvas características de secagem dos Ensaios E5 e E6. (a) adimensional de umidade (XR), (b) taxa de secagem (-dX/dt), (c) temperatura da biomassa (T_{bio}), em função do tempo.. 110
Figura 4.30: Curvas características de secagem dos Ensaios E3 e E5. (a) adimensional de umidade (XR), (b) taxa de secagem (-dX/dt), (c) temperatura da biomassa (T_{bio})..... 113
Figura 4.31: Curvas características de secagem dos Ensaios E4 e E6. (a) Adimensional de umidade (XR), (b) Taxa de secagem (-dX/dt), (c) Temperatura da biomassa (T_{bio})..... 115

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição química da casca, entrecasca e de sua mistura (Fonte Embrapa, 2005) 26
Tabela 2.2: Dados de parâmetros térmicos e luminosos em função da espessura de vidro 45
Tabela 2.3: Propriedades e custo de alguns materiais isolantes. 47
Tabela 2.4: Escolha da inclinação da placa 55
Tabela 3.1: Irradiação solar diária média em função dos meses, para o plano horizontal, em Aracaju..... 71
Tabela 3.2: Componentes da placa Arduino. 73
Tabela 3.3: Distribuição das peneiras utilizadas por mesh, abertura e diâmetro médio de partícula 76
Tabela 3.4: Condições operacionais dos ensaios de secagem. 77
Tabela 3.5: Especificações dos instrumentos e sensores. 79
Tabela 4.1: Distribuição granulométrica das partículas de entrecasca. 83
Tabela 4.2: Principais resultados dos Ensaios E3 e E4, para um tempo de secagem de 200 min. 101
Tabela 4.3: Principais resultados dos Ensaios E5 e E6, para um tempo de secagem de 200 min. 109
Tabela 4.4: Principais resultados obtidos nos Ensaios E3 e E5, em seus respectivos tempos de secagem. 112
Tabela 4.5: Principais resultados obtidos nos Ensaios E4 e E6, para um tempo de secagem de 200 min. 114
Tabela 4.6: Dados de desempenho do secador nos ensaios realizados, considerando um tempo de 200 min. 116
Tabela A.1: Dados utilizados para cálculo das eficiências do Ensaio E3 (v_{ar} = 3,7 m/s)..... 130
Tabela A.2: Dados utilizados para cálculo das eficiências do Ensaio E4 (v_{ar} = 1,3 m/s)..... 131
Tabela A.3: Dados utilizados para cálculo das eficiências do Ensaio E5 (P_{IV} = 50 W, v_{ar} = 3,7 m/s). 132
Tabela A.4: Dados utilizados para cálculo das eficiências do Ensaio E6 (PIV = 50 W, v_{ar} = 1,3 m/s). 133
Tabela B.1: Sumário de trabalhos publicados nos últimos anos sobre a secagem solar. 135

NOMENCLATURA

A_c	Área da placa absorvedora	$[L^2]$
A_{duto}	Área da secção transversal do duto flexível	$[L^2]$
a_s	Absortividade solar	[-]
Bi_m	Número de Biot mássico	[-]
Cp_{ar}	Calor específico do ar	$[EM^{-1}\theta]$
-dX/dt	Taxa de secagem	$[M_{água}M_{s.s}\ T^{-1}]$
m_w	Massa de água evaporada	[M]
$\dot{m}_{ar}$	Vazão mássica de ar	$[M\ T^{-1}]$
IR	Intensidade de radiação solar	$[ET^{-1}\ L^{-2}]$
k	Condutividade térmica	$[ET^{-1}L^{-1}\theta^{-1}]$
P_{IV}	Potência lâmpada infravermelho	$[ET^{-1}]$
P_{vent}	Potência do ventilador	$[ET^{-1}]$
q_a	Taxa de energia térmica útil fornecida pelo coletor para aquecer o ar	$[ET^{-1}]$
q_{solar}	Taxa de energia solar incidente sobre o coletor	$[ET^{-1}]$
Q_e	Quantidade de energia necessária para vaporizar a umidade	[E]
Q_{LH}	Calor latente de vaporização	$[EM^{-1}]$

Q_{total}	Quantidade total de toda energia fornecida para a secagem	[E]
t	tempo	[T]
T_{1e} ou T_{in}	Temperatura do ar na entrada do coletor	[θ]
T_{1s} ou T_{out}	Temperatura do ar na saída do coletor	[θ]
T_{2e}	Temperatura do ar na entrada da cabine	[θ]
T_{2s}	Temperatura do ar na saída da cabine	[θ]
T_{bio}	Temperatura da biomassa	[θ]
T_p	Temperatura da placa absorvedora	[θ]
U	Coeficiente global de transferência de calor	$[ET^{-1} L^{-2}θ^{-1}]$
UR	Umidade relativa do ar	[-]
UR_{1e}	Umidade relativa do ar na entrada do coletor	[-]
UR_{1s}	Umidade relativa do ar na saída do coletor	[-]
UR_{2e}	Umidade relativa do ar na entrada da cabine	[-]
UR_{2s}	Umidade relativa do ar na saída da cabine	[-]
v_{ar}	Velocidade superficial do ar	$[LT^{-1}]$

X	Teor de umidade da biomassa, em base seca ou em base úmida	[$M_{água}M_{s.s.}^{-1}$] ou [$M_{água}M_{s.u.}^{-1}$]
XR	Adimensional de umidade	[-]

Símbolos Gregos

δ	Declinação solar	[º]
$\Delta T_{coletor}$	Variação de temperatura do ar no coletor	[θ]
ε	Emissividade	[-]
λ	Comprimento de onda	[L]
η_{col}	Eficiência do coletor	[-]
η_{sec}	Eficiência de secagem	[-]
ρ_{ar}	Massa específica do ar	[ML^{-3}]

Siglas e Abreviações

AMO	Massas de ar fora da atmosfera
AM1,5	Massas de ar dentro da Terra
AMISD	Secador indireto no modo ativo
b.s.	Base seca
b.u.	Base úmida

COOFAMA	Cooperativa dos Produtores de Farinha de Mandioca de Campo do Brito
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
enso	ensolarado
ETC	Coletor de tubo evacuado
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IV	Infravermelho
LTA	Laboratório de Tecnologias Alternativas
máx	máximo
mín	mínimo
N	Norte
nub	nublado
PMISD	Secador indireto no modo passivo
PVB	Polivinil butiral
PV/T	Coletor solar térmico fotovoltaico
S	Sul
SHGC	Coeficiente de ganho de calor
s.s.	sólido seco
s.u.	sólido úmido

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO 17

CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA 22

2.1 Mandioca 22

2.2 Resíduos da mandioca 24

2.3 Secagem 28

2.4 Radiação eletromagnética 29

2.5 Secagem infravermelha 32

2.6 Secagem solar 33

2.6.1 Secadores do tipo direto 34

2.6.2 Secador do tipo indireto 36

2.6.3 Secador solar híbrido 39

2.7 Informações técnicas sobre materiais empregados em secadores solares 43

2.7.1 Vidro 43

2.7.2 Placa absorvedora 46

2.7.3 Isolantes 46

2.7.4 Madeira 48

2.8 Posicionamento do coletor solar relacionado ao movimento do sol 49

2.9 Instrumentação e aquisição de dados da secagem solar 56

2.10 Análise da revisão 58

CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS 59

3.1 Desenvolvimento do secador solar híbrido 59

3.1.1 Projeto do equipamento 59

3.1.2 Construção do equipamento 62

3.1.3 Localização do equipamento 70

3.1.4 Instrumentação e sistema de aquisição de dados 72
3.2 Metodologia experimental 74
3.2.1 Material 74
3.2.2 Preparo e caracterização física da biomassa 74
3.2.3 Experimentos de secagem 77
3.2.4 Análise da cinética de secagem 80
3.2.5 Avaliação da performance do secador solar 80
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 83
4.1 Caracterização física da biomassa 83
4.2 Performance do secador 84
4.2.1 Testes preliminares em condições climáticas distintas 84
4.2.2 Modo de secagem ativa e indireta 92
4.2.3 Modo de secagem ativa, indireta e híbrida 104
4.2.4 Avaliação comparativa dos modos de operação do secador 111
4.2.5 Avaliação da melhor condição operacional 116
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES 118
5.1 Conclusões 118
5.2 Sugestões para trabalhos futuros 120
REFERÊNCIAS 121
APÊNDICE A 129
APÊNDICE B 135

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As raízes da mandioca têm grande importância socioeconômica, visto que é uma matéria prima em diversos setores da indústria e é um alimento base para uma ampla faixa da população, sendo consumidas como farinha, amido, polvilho, goma (tapioca) ou cozido (in natura), representando uma importante fonte de carboidratos. O Brasil é um país de destaque no cultivo de mandioca. Entre os anos de 2017 a 2022 manteve a 5ª ou 6ª posição no ranking de produção mundial, com uma produção em torno de 18 milhões de ton/ano (FAO, 2022).

Segundo últimos dados do IBGE (2022), as regiões Norte e Nordeste detêm 50% da quantidade produzida de mandioca pelo Brasil. Nas famílias nordestinas de baixa renda o consumo da raiz representa 10% na despesa, perdendo apenas para o feijão. O cultivo da mandioca também é fonte geradora de emprego e renda em toda a cadeia produtiva, a exemplo as casas de farinha. É muito comum a comercialização da mandioca através de feiras livres, que utilizam matéria prima e mão de obra proveniente da agricultura familiar. Ocorre também a distribuição através de organizações estruturadas, como cooperativas e associações, que são criadas através de estímulos de fomento à agricultura familiar. Elas contribuem para facilitar o escoamento da produção do pequeno produtor, aumentando a participação no mercado e o desenvolvimento socioeconômico (RIBEIRO, 2021). A título de exemplo, a COOFAMA (Cooperativa dos Produtores de Farinha de Mandioca de Campo do Brito) tem avançado e gerado renda no estado de Sergipe.

O processamento da mandioca para a produção de farinha, em cooperativas e indústrias, gera uma série de resíduos, dentre eles a manipueira, casca, entrecasca e pontas de mandioca. A cada tonelada de mandioca processada, 10-15% (125 kg/ton) são perdidos na forma de cascas úmidas (OBONUKUT *et al.*, 2023). Com a casca pode sair certa quantidade de entrecasca, o que acarreta perda de amido que não está sendo aproveitado pela indústria de produção de fécula de mandioca, gerando grandes volumes diariamente que fermentam de forma descontrolada e produz odores desagradáveis (EMBRAPA, 2005; FAJARDO *et al.*, 2022). A entrecasca da mandioca, embora rica em fibras e amido residual, como outros resíduos da mandioca é mal aproveitada, descartada como lixo ou queimada. Esses métodos de descarte,

embora fáceis e baratos, não são ambientalmente corretos devido à sua elevada carga orgânica, poluição e desperdício (TEIXEIRA *et al*., 2011).

Segundo Engel *et al*. (2021), a entrecasca da mandioca tem alto teor de amido (47%), o que possibilita o estudo da aplicação do resíduo em diversas áreas como: substituto do amido de mandioca no desenvolvimento de polímeros biodegradáveis (SHEKAR & RAMACHANDRA, 2018; ENGEL *et al*., 2021) e no recobrimento de frutos de maracujá para conservação pós-colheita (SILVA *et al.,* 2019).

A casca e entrecasca residual da mandioca, além do alto teor de amido, têm em sua composição lignina, celulose e hemicelulose, apresentando grande potencial para a produção sustentável de biocombustíveis, como etanol (ONA *et al.,* 2018; SOUTO *et al.*,2017). A biomassa pode ser utilizada em processos de combustão para geração de energia na forma de calor e em processos de pirólise para a obtenção de bio-óleo, biogás ou biocarvão (RUENGSAN *et al*., 2021). Existem muitos estudos sobre a produção de bio-óleo usando resíduos de mandioca, mas poucas são as informações reportadas sobre o biochar de resíduos de mandioca (PATTIYA, 2007; PATTIYA *et al.,* 2011)

O biocarvão ou biochar produzido a partir da casca e entrecasca de mandioca vem ganhando atenção crescente como material orgânico que pode ser efetivamente utilizado na agricultura como condicionador de solo, para aumentar a fertilidade, estimular o crescimento das plantas e aumentar a produtividade agronômica (ENAIME &LÜBKEN, 2021).

O principal problema encontrado durante o gerenciamento desses resíduos é a pouca utilização por outros setores industriais, devido a questões de manuseio, armazenamento, transporte e conservação (FAJARDO *et al.*, 2022a). A alta umidade das cascas e entrecascas dificulta sua aplicação prática, devido à rápida deterioração, então normalmente sua reutilização, entre os feirantes, cooperativas e casas de farinha, se restringe ao uso e venda para alimentação animal. Isso é feito na forma de raspas ou pedaços triturados que são secos ao ar livre, processo sujeito a intempéries e agente externos, sem controle, demandando longos tempos de secagem e espaços grandes.

O aproveitamento correto e eficiente dos resíduos provenientes do processamento da mandioca permite agregar valor econômico a um material cuja aplicação é limitada devido à alta umidade. Assim, a biomassa deve ser submetida a uma etapa prévia de secagem para reduzir o teor de umidade de 50-75% até 10-15% b.u., para assegurar sua estabilidade física, química e microbiológica, e por conseguinte, sua conservação por longos períodos

(CHOJNACKA *et al.*, 2021). Ademais, o uso da biomassa desidratada é essencial para aumentar o rendimento dos processos de conversão termoquímica e a qualidade dos biocombustíveis produzidos, seja para a produção do bioetanol, bio-óleo, biogás ou biocarvão, seja para a geração de energia térmica em reatores de combustão (ZHANG et al., 2016). Logo, especial atenção deve ser direcionada à secagem como uma etapa de pré-tratamento da biomassa.

Os estudos existentes na literatura sobre a secagem de resíduos da mandioca envolvem particularmente a massa fibrosa (CASTIGLIONI *et al.*, 2013) e a casca da mandioca (VILHALVA *et al*., 2012) e se limitam ao emprego de tecnologias básicas como a secagem em bandejas, que apresenta baixa eficiência, tempos de processo longos e elevado custo energético. Um artigo recente sobre secagem do bagaço de mandioca focou nos parâmetros operacionais para aplicação da desidratação osmótica como pré-tratamento para melhoria de eficiência na secagem convectiva (FAJARDO *et al.*, 2022)

Como a entrecasca é obtida manualmente e gerada apenas durante o descascamento da mandioca, geralmente retirada junto com a casca, há poucas informações na literatura a respeito da sua secagem (ENGEL, 2021). Nos poucos trabalhos encontrados sobre a aplicação da entrecasca de mandioca há uma etapa de secagem no seu processo, mas não há estudo detalhado a respeito dessa operação (SOUTO *et al.*,2017, SHEKAR & RAMACHANDRA, 2018; ENGEL *et al*., 2021).

Há, portanto, uma necessidade de estudos sobre a secagem da biomassa em questão. Na busca por tecnologias de secagem eficientes e que possam agregar valor aos resíduos, alguns setores como as indústrias de alimentos, cooperativas agrícolas e a agroindústria têm considerado abordagens para reduzir as emissões de hidrocarbonetos e outras emissões tóxicas. A secagem solar vem se mostrando muito promissora, por ser uma tecnologia verde e sustentável e por ser viável economicamente, pois a fonte de energia é o próprio sol.

Nesse cenário, a energia solar é extremamente vantajosa principalmente em países tropicais, por ser uma energia abundante, devido à alta intensidade de radiação solar e mais horas de luz do sol. Através de secadores solares com diferentes designs, que superem as desvantagens do método a céu aberto, é possível obter alto rendimento usando o efeito sinérgico entre a energia solar e eólica, num ambiente controlado (LINGAYAT *et al.*, 2020; MOHANA *et al*., 2020).

Existem diversos tipos de secadores solares que são classificados como direto, indireto e híbrido, que fazem uso da convecção natural (passivo) ou forçada (ativo). Outra classificação também recorrente é o secador misto que usa os princípios dos secadores direto e indireto.

No secador direto o material é exposto diretamente à luz solar incidente através de uma cobertura transparente (MEWA *et al.*,2019; KRABCH *et al*., 2022). Algumas limitações dos secadores diretos podem ser superadas com os secadores indiretos (BENHAMZA *et al*., 2021; GOUD *et al*., 2019), pois este resulta em melhor qualidade do produto, retenção da cor do produto, e maior eficiência. No secador indireto a placa absorvente, dentro do coletor, absorve a radiação solar e aquece o ar que passar por ela, o qual vai promover a secagem do material dentro da cabine.

O secador híbrido utiliza a energia solar e outra fonte de energia, como a radiação infravermelho, para auxiliar a secagem em locais que tem baixa incidência solar. Além disso, adicionar um sistema de aquecimento auxiliar pode melhorar a qualidade dos produtos secos, diminuindo o tempo de secagem e aumentando a eficiência (WARJI E TAMRIM, 2020; VEERAMANIPRIYA E SUNDARI, 2021; MIRZAEI *et al.,* 2021; ABEDINI *et al*., 2022;)

Ziaforoughi e esfahani (2016) compararam a secagem solar, secagem infravermelha e secagem solar híbrida usando energia infravermelho e painéis fotovoltaicos, obtendo redução de tempo de secagem e dos custos de energia elétrica ao aplicar o terceiro método de secagem. Abedini *et al*. (2022) obtiveram uma redução de 50 min no tempo de secagem ao colocar vidro na cabine de secagem, para realizar secagem solar híbrida e mista (direta e indireta).

Entre os trabalhos reportados na literatura sobre secadores híbridos destacam-se aqueles que usaram a parte amilácea para estudo. Warji e Tamrim (2020) produziram chips de mandioca, enquanto Veeramanipriya e Sundari (2021) realizaram análise física. No primeiro trabalho a umidade foi reduzida de 60% para 10 - 12% (b.u.), em 12 h, e no segundo de 91,5% para 10,67% (b.u.), em 8 h. Oliveira *et al*. (2021) produziram amido ácido usando um secador solar misto e passivo a partir de amostras de amido de mandioca.

Apesar de estudos existentes sobre a secagem solar da polpa ou da parte amilácea da mandioca, ainda não há informações disponíveis na literatura sobre a aplicação de secadores solares para a secagem da casca e/ou entrecasca de mandioca. O avanço nessa área depende do projeto, construção e operação de equipamento com materiais, configuração e sistema de aquisição de dados que maximizem a eficiência, bem como do conhecimento do processo de secagem do resíduo e de seus custos energéticos.

Diante desse cenário e visando a redução de custos energéticos empregados no processo de secagem e, consequentemente, o aproveitamento viável de resíduos sólidos do processamento da mandioca, o objetivo geral do presente trabalho foi desenvolver um secador solar híbrido, ativo e misto, com energia auxiliar via radiação infravermelho, para secagem da entrecasca de mandioca. Para isso, os objetivos específicos foram:

- Projetar, dimensionar e construir as partes físicas do equipamento;
- Instrumentar o secador para coleta contínua de dados por meio de uma placa Arduino®, de modo a monitorar e analisar a variação da temperatura e umidade relativa do ar, temperatura e massa da biomassa durante o processo de secagem;
- Caracterizar fisicamente as partículas da entrecasca da mandioca em termos de granulometria e teor de umidade;
- Realizar testes de secagem com o secador solar operando no modo indireto e ativo, assistido ou não por uma fonte de radiação IV, a fim de avaliar a cinética do processo, em termos da evolução temporal do teor de umidade, da temperatura e da taxa de secagem do material;
- Efetuar avaliação de desempenho, a partir do cálculo das eficiências térmicas do coletor e do secador;
- Analisar a influência da velocidade do ar e da radiação IV sobre o comportamento de secagem da biomassa;
- Comparar e estabelecer o modo de secagem solar mais adequado, bem como as condições de operação ótimas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são abordados o cenário produtivo da mandioca e as informações técnicas acerca da raiz e seus resíduos, em especial a entrecasca. Também é apresentada a fundamentação teórica necessária para o entendimento do trabalho, que inclui os princípios de secagem, os tipos e componentes de secadores assistidos por energia solar, e informações sobre sistemas de aquisição de dados. Para completar a revisão da literatura, é feito um levantamento de trabalhos recentes envolvendo o desenvolvimento e a aplicação de secadores com uso de energia solar para a secagem de diferentes materiais, que evidencia a aplicabilidade da tecnologia, bem como as lacunas ainda existentes.

2.1 Mandioca

A raiz de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), mostrada na Figura 2.1, pertence à família “Euphorbiaceae” e é também conhecida como aipim, macaxeira ou maniva. Sua estrutura (Figura 0.1) é basicamente formada pela casca ou periderme, córtex ou entrecasca, tecido vascular central e órgãos de reserva ricos em amido, característica comum nos alimentos amiláceos como cereais, tubérculos e raízes. Sua composição tem 65% de água, 25% de amido, 3% de proteína, 2% de celulose e 5% de outros compostos (SEBRAE, 2015).



Figura 0.1: Mandioca.
(Fonte: Adaptada de Carioly, 2019)

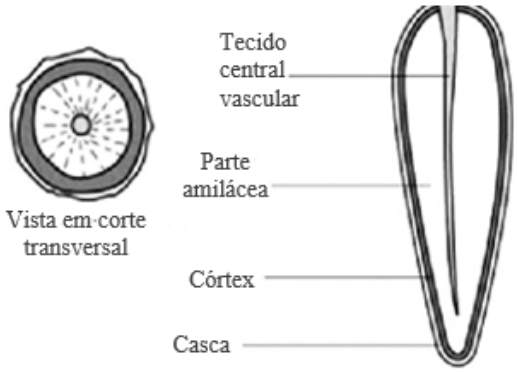
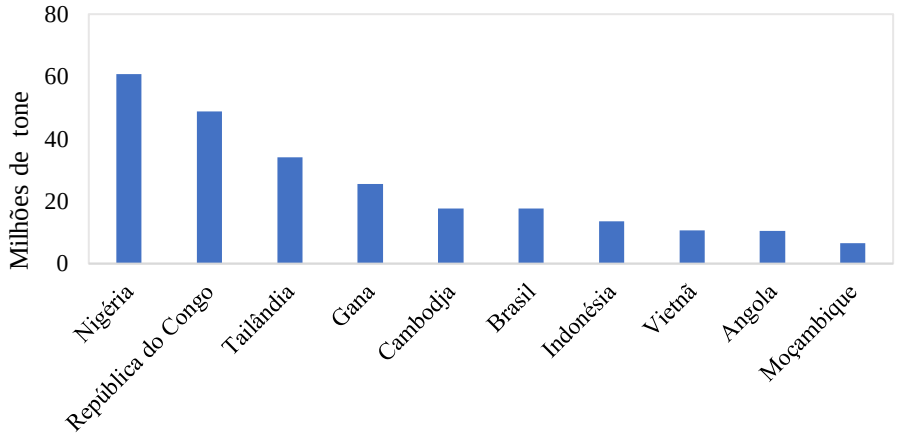


Figura 0.2: Típica estrutura da mandioca.
(Fonte: Adaptada de Viera *et al.*, 2021).

A partir de uma análise dos dados da FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) para o ranking de produção mundial de mandioca, 1991 é o ano em que o Brasil perde a posição de primeiro colocado para Nigéria e em 2009, perde o segundo lugar para a Tailândia. Isso ocorre devido ao crescimento da produção da mandioca na Nigéria impulsionado por um aumento substancial de 44% nos rendimentos. Este avanço também é atribuído a várias intervenções e iniciativas de institutos e do governo nigeriano sobre a mandioca. Até hoje a Nigéria mantém o primeiro lugar no ranking de produção (OBONUKUT, *et al.*, 2022).

O último levantamento da FAO revela que o Brasil foi, em 2022, o 6° maior produtor (Figura 0.3), produzindo em torno de 17,6 milhões de toneladas de mandioca. Além disso, após a cana de açúcar, soja, milho e leite, a mandioca é a quinta maior *comodity* produzida pelo Brasil. Segundo últimos dados do IBGE, em 2022 o norte foi o primeiro na produção do tubérculo, gerando 6,3 milhões de toneladas, e o Nordeste o segundo, com 3,8 milhões de toneladas.



.

Figura 0.3: Dez maiores produtores mundiais de mandioca
(Fonte :Adaptação de FAO,2022).

A mandioca apresenta alto volume e alto teor de umidade de 60-90%, representando desvantagens em termos de transporte de elevado custo e vida útil curta. Assim, a secagem vem se mostrando como alternativa para minimizar esses problemas e aumentar seu valor de mercado (VERA *et al.*, 2021).

Kosasih *et al*. (2020) estudaram a cinética de secagem das fatias de mandioca elefante usando a convecção natural, a partir de um analisador de umidade, e a convecção forçada,

fornecida por um sistema de secagem em batelada combinado com um sistema de refrigeração. Foram utilizadas temperaturas de 60, 80 e 100°C, e vazões de ar de 120, 240 e 360 L/min. Verificou-se que a menor energia de ativação foi 22,915 kJ/mol, obtida na maior vazão e temperatura de secagem no teste de convecção forçada. Por outro lado, a maior energia de ativação foi 27,17 kJ/mol, a qual foi obtida na temperatura mais baixa na secagem por convecção natural do segmento base.

Oladejo *et al. (*2020) investigaram os efeitos do pré-tratamento com ultrassom em fatias de mandioca amarela durante a secagem convectiva com ar quente num secador convencional. A temperatura de secagem foi 70 °C e com uma velocidade do ar de 1 m/s, escoando paralelo à superfície das amostras. Os resultados mostraram que o pré-tratamento permitiu a redução do tempo de secagem em 33% em comparação com amostras não tratadas. As difusividades de umidade efetivas das amostras foram significativamente maiores (entre 2,18 e 3,33 x 10^{-10} m^2/s) que as não tratadas (2,13 x 10^{-10} m^2/s). Os números de Biot de transferência de massa (Bi_m) para as amostras tratadas estavam na faixa de $0,1 < Bi_m < 100$.

2.2 Resíduos da mandioca

A raiz da mandioca pode ser usada na alimentação humana na forma cozida, frita, em bolos, pães e tortas e na alimentação animal (crua, cozida ou desidratada). Na indústria ela produz amido fermentado (pães e biscoitos), farinhas (farinha de mesa), raspas (rações), álcool (combustível, bebidas, farmacêutica e perfumarias) e fécula. Este último é um insumo para diversos processos industriais, tanto no setor alimentício para fabricação de pães, como em diferentes ramos da indústria: farmacêutica, de cosmético, têxtil, de papel e celulose, alimentícia, mobiliária, de cerâmica, bélica, petroquímica e para perfuratriz de petróleo em alto mar (RIBEIRO, 2021).

Considerando-se os principais tipos de processamento das raízes de mandioca no Brasil, como a fabricação de farinha de mandioca e a extração de fécula ou goma, os subprodutos gerados podem ser sólidos ou líquidos. Alguns dos subprodutos sólidos são a casca marrom, a entrecasca, descarte, a crueira, fibra, bagaço e varredura (EMBRAPA 2005). Entre

os subprodutos líquidos, tem -se a manipueira, resultante da água residual do processamento (SEBRAE, 2015).

A casca da mandioca, apresentada na Figura 0.4, é o resíduo resultante da limpeza do descascamento da raiz que chega à indústria, sendo composta por casca externa, interna e pontas de mandioca (SOUTO *et al*., 2017).



Figura 0.4: Cortes da mandioca
(Fonte: Adaptada de Carioly, 2019).

A casca ou epiderme corresponde de 2% a 5 % do peso total das raízes, constituindo-se em uma fina camada celulósica, com espessura de aproximadamente 1 a 4 mm e cor marrom clara ou escura (EMBRAPA, 2005; ZULKIFLI e KARIM, 2022) Possui alto teor de fibra, de 41%, conforme mostra composição centesimal na Tabela 0.1.

A entrecasca da mandioca é uma camada interna parenquimatosa, esbranquiçada, mais espessa que a casca marrom. Pode ser chamada de casca interna da mandioca, representando 12,8% do peso da raiz (ENGEL, *et al*., 2021). Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2005), a entrecasca apresenta alto teor de amido (58%) e umidade (65,60%).

Nos trabalhos, nem sempre se faz a distinção entre casca e entrecasca, e por vezes, o termo casca já considera a mistura da parte marrom e esbranquiçada. A Tabela 0.1 é um dos poucos resultados encontrados sobre a composição das duas partes separadas, bem como da mistura.

Tabela 0.1: Composição química da casca, entrecasca e de sua mistura.

Subproduto	Casca marrom	Entrecasca	Mistura
	g/% de matéria seca		
Cinzas	4,0	3,0	1,45
Carboidratos solúveis	-	-	
Amido	0,0	58,0	32,0
Lipídios	3,0	2,0	0,63
Nitrogênio	0,64	1,29	2,1
Fibra	41,0	6,0	

(Fonte: Embrapa ,2005)

Souto *et al.* (2017) investigaram a caracterização e a hidrólise enzimática da casca de mandioca, a qual foi coletada diretamente do processo de limpeza da mandioca, na etapa de descascamento da Fecularia de Bela Vista Ltda (Febela). Eles utilizaram a mistura da casca marrom juntamente com a entrecasca. Para produzir a farinha e realizar as caracterizações, o material foi seco em estufa de convecção forçada a 55°C por 24 h, mas o foco do estudo não foi a secagem. Dentre os resultados obtidos tem-se os teores de: umidade inicial, 75,53%; umidade final, 11,75%, amido, 60,68%; cinzas, 1,63 %, e lipídios, 0,86%. A mistura apresentou alta concentração de amido em comparação ao valor de 32% obtido pela EMBRAPA (2005). Os autores justificam que isso pode estar relacionado à quantidade de entrecasca presente no material que depende do ajuste do equipamento de descascamento. Por fim, concluíram que a hidrólise enzimática da casca de mandioca é viável e permite a utilização do hidrolisado em processos fermentativos para produção de diversos produtos, como álcool, bebidas, vinagre, entre outros.

Engel *et al*. (2021) utilizaram a entrecasca da mandioca e amido gelatinizado no desenvolvimento de espumas, como substitutos do amido de mandioca nativo. Os autores caracterizaram a entrecasca já seca, mas não especificaram o processo de secagem. Obtiveram como resultados: 47% de amido, 4,5% de cinzas, 6,5% de proteínas, 1% de lignina, 5% de celulose, 17% de hemicelulose. O valor mais alto do teor de cinzas em comparação com aquele reportado na Tabela 0.1 é atribuído à presença de restos da casca marrom no material.

Embora tenham sido relatados estudos que fornecem alternativas para o uso do bagaço de mandioca, estes estudos deixam sem solução o acúmulo diário de grandes volumes deste resíduo nas fábricas de fécula de mandioca com os consequentes problemas de manejo e poluição ambiental. Com isso, não só é importante continuar avançando nos estudos sobre o

aproveitamento desse resíduo, mas também é necessário avançar nos estudos que visem alcançar uma secagem eficiente desse resíduo que permita seu manuseio e posterior aproveitamento e impulsione a produção de mandioca (FAJARDO *et al*, 2022a)

Vilhalva *et al*. (2012), investigaram a cinética de secagem das cascas da mandioca em um secador convectivo de bandejas. Empregou-se diferentes temperaturas (53 - 67ºC) e vazões volumétricas especificas do ar (0,0159 - 0,0206 $m^3 kg^{-1} s^{-1}$). Não foi especificada qual parte da casca, mas por serem coletadas após descascamento da mandioca na mesma fecularia relatada por Souto *et al.* (2017), provavelmente é a mistura. A umidade inicial, em base seca, do material ficou entre 2,33 e 2,85. A melhor condição de secagem das cascas de mandioca foi a combinação da temperatura do ar de 67ºC e vazão volumétrica do ar de 0,0183 $m^3 kg^{-1} s^{-1}$, pois obteve-se o menor tempo de secagem (420 min) e a melhor qualidade da farinha de casca, com cor mais clara e menos avermelhada, menor variação de cor final durante a secagem, menor acidez titulável e maior pH.

Castiglioni *et al.* (2013) secaram a massa fibrosa da mandioca, a fim de elaborar um modelo matemático. A secagem foi feita no mesmo secador usado por Vilhalva *et al*. (2012), e as amostras foram coletadas na saída da centrífuga da mesma fecularia. As variáveis independentes foram a temperatura (52,9-67,1°C) e o vazões volumétricas especificas (0,019-0,023 $m^3 kg^{-1} s^{-1}$). A caracterização mostrou que os dados médios obtidos para umidade, proteína, extrato etéreo e cinzas da massa fibrosa da mandioca, foram de 89,10, 1,68, 0,97 e 1,85%, respectivamente. Nas condições de 67 ºC e 0,023 $m^3 kg^{-1} s^{-1}$,verificou-se a maior perda de umidade da massa fibrosa de mandioca em um menor tempo.

As técnicas tradicionais de secagem, como a secagem convectiva, apresentam desvantagens, principalmente pois exigem um longo tempo de processamento e geram alterações nas propriedades dos produtos (PROSAPIO e NORTON, 2017).

Fajardo *et al.* (2022b) propuseram a aplicação da desidratação osmótica do bagaço de mandioca (Figura 0.5) como pré-tratamento para melhoria da eficiência na secagem convectiva. Amostras com espessura de 0,005 m foram secas em um secador de bandejas, Figura 0.6, com convecção forçada e aquecimento do ar via resistências elétricas, nas condições de 45°C e 1 m/s; 40°C e 1.5 m/s; 35°C e 2 m/s. Usando uma concentração de 20% de NaCl e condições de secagem de 40°C e 1,5 m/s, foi possível reduzir a umidade do bagaço de mandioca de 87,7% para 12%, em 440 min. Esse tempo foi 38% menor que aquele da secagem do bagaço sem tratamento osmótico prévio.



Figura 0.5: Bagaço da mandioca pós secagem.
(Fonte: Fajardo *et al.*, 2022b).



Figura 0.6: Secador de bandejas.
(Fonte: Fajardo *et al.*, 2022b).

2.3 Secagem

A secagem é um processo simples de remover o excesso de água de um produto agrícola ou industrial para prolongar a vida útil, reduzindo o teor de umidade a um valor especificado. A remoção de umidade por mecanismo de secagem envolve dois processos simultâneos: o primeiro é a transferência de calor ao produto para a evaporação, e o segundo é a transferência da massa de umidade do produto para o ar (VIJAYAN *et al*, 2017; VERA *et al*, 2021).

Na secagem combinando a radiação infravermelho e a convecção forçada de ar quente, a taxa de secagem pode normalmente ser dividida em três regiões como mostrado na Figura 0.7.

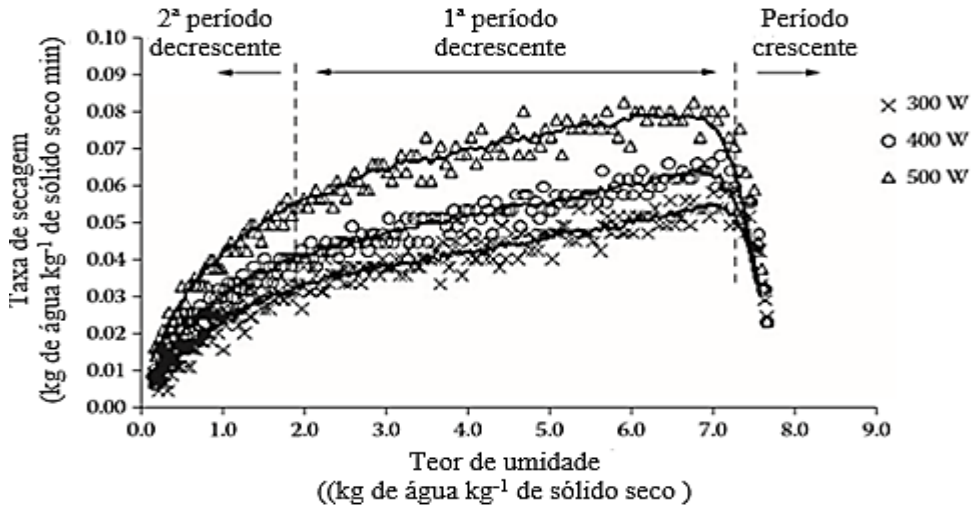


Figura 0.7: Taxa de secagem versus teor de umidade de fatias de cenoura em diferentes potências de infravermelho à velocidade do ar de 1,0 m/s.
(Fonte : Kocabiyik, 2010).

No início da secagem, que corresponde ao lado direito do gráfico onde a umidade tem o seu maior valor, a temperatura do produto começa a aumentar à medida que a energia radiante é absorvida por ele, fazendo com que a água no interior do produto atinja temperatura de vaporização e a taxa de secagem aumente continuamente (VIJAYAN *et al.*, 2017). Este período é chamado de aquecimento, cujo duração é curta em comparação com o tempo total de secagem.

Após esse período, a taxa de secagem tende a diminuir, resultando em dois períodos de taxa decrescente. O primeiro período de queda, tem o maior tempo de secagem e maior quantidade de água removida, sendo que a taxa de secagem tende a ficar próxima a uma taxa constante. Nesse momento, a taxa de evaporação de água da superfície equivale à taxa de água transferida do interior do material para a superfície por difusão. Toda energia fornecida é então utilizada na forma de calor latente para vaporizar a quantidade de água disponível na superfície do produto na forma de água livre, e, portanto, a temperatura se mantém constante (KOCABIYIK, 2010; PARK et al ,2014).

Quando a difusão interna de umidade deixa de compensar a evaporação na superfície, dá-se início ao segundo período de taxa decrescente, caracterizado pela formação de regiões secas na superfície e subsequente diminuição de água livre dentro do produto. e, portanto, resta é a água ligada,. Nessa etapa a resistência interna à transferência de massa passa a comandar o processo e a pressão de vapor d'água na superfície da matriz sólida decresce com a redução do teor de água, acarretando na diminuição da velocidade de secagem, principalmente nos estágios finais em que predomina água ligada. Ademais, parte do calor fornecido volta a ser utilizado na forma de calor sensível e, consequentemente, a temperatura do produto aumenta. Essa etapa se prolonga até atingir a umidade de equilíbrio, que corresponde a umidade mínima atingida sob determinadas condições de temperatura e umidade relativa do ar.

2.4 Radiação eletromagnética

A radiação eletromagnética compreende diversos comprimentos de ondas, mas somente parte dela é capaz de transferir calor como radiação térmica. Segundo Duffie e Beckman (2013) essa faixa se estende de 0,1 a 1000 μm, correspondente a parte do ultravioleta e toda região do espectro visível. A radiação térmica é emitida pelos corpos em virtude de sua temperatura. Os átomos, moléculas ou elétrons são elevados a estados excitados, retornam

espontaneamente a estados de energia mais baixos e, ao fazê-lo, emitem energia na forma de radiação eletromagnética (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

Para a maioria das aplicações de energia solar, apenas a radiação térmica é importante, já que a radiação solar compreende parte da radiação térmica, desde o ultravioleta até a região de ondas médias do infravermelho. A Figura 0.8 apresenta a composição em porcentagem do espectro solar, o qual tem maior parcela de radiação infravermelha (51%). Conforme mostra a Figura 0.9, a radiação solar fora da atmosfera (AM0) tem fluxo de energia ou irradiância solar de 1135 W/m^2, na faixa de 0 ,25 a 3 µm, enquanto o fluxo na superfície terrestre é reduzido para 950 W/m^2 (0,29 a 2,5 µm). Isso ocorre porque os diferentes comprimentos de onda da radiação interagem de forma distinta com os constituintes atmosféricos, sofrendo processos de absorção por O_3, H_2O e CO_2 e moléculas de ar, água e poeira (ÇENGEL e GHAJAR, 2012; PEREIRA *et al*., 2017).

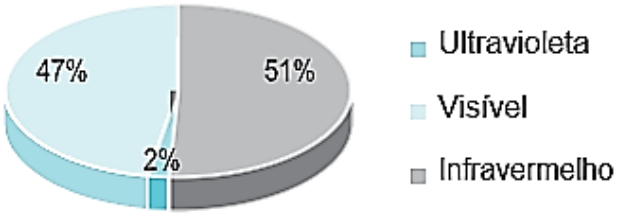


Figura 0.8 : Composição do espectro solar
(Fonte: Westphal, 2022).

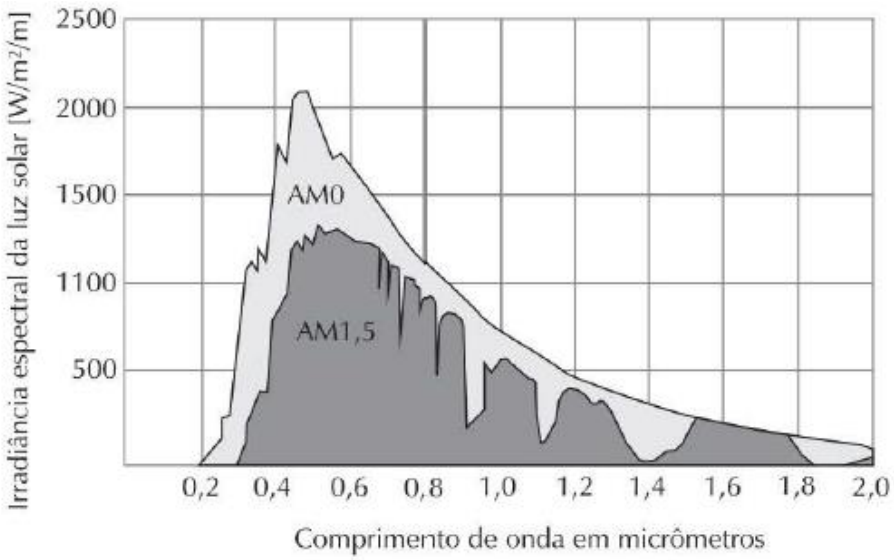


Figura 0.9: Características da radiação solar para as massas de ar AM0 (fora da atmosfera) e AM1,5 (dentro da terra).
(Fonte: Villalva, 2015)

Todo corpo emite radiação constantemente. A emissividade representa a razão entre a radiação emitida pela superfície em determinada temperatura e a radiação emitida por um corpo negro (absorvedor e emissor perfeito) na mesma temperatura. Expressa a capacidade do material em emitir radiação, de forma que materiais com alta emissividade emitem mais radiação térmica e, portanto, esfriam mais rápido. Já os materiais com baixa emissividade têm maior dificuldade para emissão da radiação calor, mantendo sua temperatura alta por mais tempo (ÇENGEL e GHAJAR, 2012; WESTPHAL, 2022).

Quando um corpo emite radiação, ele está incidindo radiação sobre os corpos ao redor. Este corpo pode absorver, transmitir e refletir a radiação incidente, e também emitir radiação. Sendo que a soma das componentes que saem da superfície, chamada de radiosidade, compreende a emissão e a reflexão. A Figura 0.10 ilustra esses fenômenos.

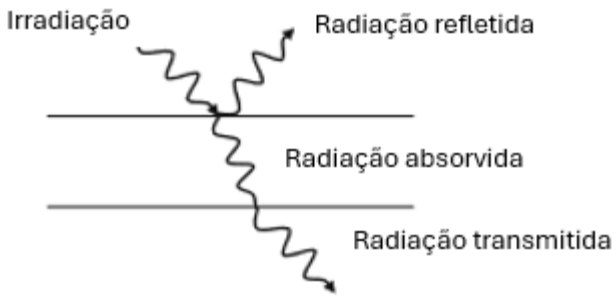


Figura 0.10: Irradiação, absorção, transmissão e reflexão
(Fonte: Jun *et al*., 2010).

Em aplicações de energia solar, a distribuição espectral da radiação solar incidente é diferente da distribuição espectral das radiações emitidas pelos corpos, já que a primeira está concentrada na região de ondas mais curtas, e a segunda na região infravermelho. Dessa forma considera-se que as superfícies tem dois conjuntos de propriedades, um para absorção da radiação solar dada pela absortividade solar (a_s) e outro para emissão da radiação infravermelha dado pela emissividade (ε) (ÇENGEL E GHAJAR, 2012).

2.5 Secagem infravermelha

Na secagem infravermelha (IV) a energia emitida pela fonte de calor irradia para a superfície do material e penetra diretamente na camada interna do material. Essa radiação é absorvida pela água presente no material a ser seco, fazendo com que suas ligações O-H comecem a girar com a mesma frequência da radiação incidente. Portanto, há uma transformação da radiação IV em energia rotacional e, por conseguinte, em energia térmica, causando a evaporação da água. Como a energia da radiação infravermelha é absorvida diretamente pelas moléculas do material e a densidade de energia da radiação infravermelha é muito alta, a temperatura da superfície aumenta rapidamente, em comparação à transferência de calor por condução e convecção (HUANG, *et al*., 2021).

A secagem por infravermelho de onda média e curta é considerada um método eficiente, se destacando dentre os métodos de secagem convencionais, devido à taxa de secagem significativamente maior, eficiência energética, aquecimento uniforme dos materiais, qualidade do produto, curto tempo de processamento, alto coeficiente de transferência de calor e baixo consumo de energia. Semelhante a outras ondas eletromagnéticas, a radiação infravermelha não requer um meio para ser transmitida, concentrando a energia no alvo, o que reduz perdas de calor pelo meio, provoca redução dos tempos de secagem e dispensa o uso de um invólucro caro e isolado para reter e recircular o calor. Além disso é uma tecnologia limpa que praticamente não produz compostos orgânicos voláteis, monóxido de carbono (CO) e nitrogênio óxidos (NOX) (LI *et al*., 2023; DAS e DAS, 2010).

Uma das desvantagens da secagem IV é que a profundidade de penetração da radiação infravermelha é de apenas alguns milímetros (0,5-4 mm) e, portanto, o efeito de aquecimento interno diminui à medida que a espessura do produto aumenta (LI *et al*., 2023). O efeito sinérgico entre duas ou mais formas de aquecimento melhora o desempenho da secagem, permitindo a secagem de materiais mais espessos. A combinação entre os métodos é frequentemente usada também devido a fácil modificabilidade, adaptabilidade, simplicidade do equipamento, instalação e uso baratos e descomplicados do aquecimento infravermelho (HUANG, *et al*., 2021).

É importante estar atento aos parâmetros envolvidos como potência da radiação, distância emissor-material e emissor-emissor. De acordo com Das e Das (2010), a intensidade radiante na superfície receptora varia inversamente com o quadrado de sua distância da fonte

de radiação. Assim, aumentar a potência de radiação e diminuir a distância de radiação acelera a taxa de secagem. No entanto, devem ser evitadas potências de radiação, temperaturas de secagem muito altas e distâncias de radiação muito curtas para evitar o superaquecimento dos produtos agrícolas (LI *et al*., 2023).

O efeito do espaçamento emissor-emissor de radiação também é muito significativo, de forma que influencia a distância ideal entre a fonte e o objeto. A depender da distância entre os emissores haverá superposição completa do contorno de radiação do emissor individual, de forma que quanto mais próximos entre si, maior a potência emitida. Sendo assim, segundo Das e Das (2010), o espaçamento ideal é tal que a razão entre as distancias emissor-emissor e emissor-material seja menor ou igual a 1,2.

2.6 Secagem solar

A secagem solar utiliza a radiação térmica fornecida pelos raios solares. A secagem ao ao ar livre, que utiliza o efeito sinérgico de sol e energia eólica, é um método popular e econômico usado para secar e preservar produtos agrícolas, alimentos e muitos outros produtos, sendo de fácil manejo e não necessita de mão de obra qualificada. No entanto possui grandes desvantagens como grande dependência das condições climáticas, longos tempos de secagem, perdas por não uniformidade ou secagem insuficiente durante o processo, deterioração da qualidade das colheitas devido a fatores externos como microrganismos, chuva, poeira, raios ultravioletas e animais (CHAVAN *et al*., 2021).

Apesar desses fatores negativos, o uso da energia solar é muito proveitoso porque é uma energia limpa e é altamente disponível em países tropicais que normalmente estão localizados em zonas climáticas que recebem maior insolação do que a média mundial, que varia de 1600 a 2200 kWh/m^2/ano. Geralmente, essas zonas são caracterizadas por altas intensidades de radiação solar e mais horas de luz do sol (MOHANA *et al*., 2020).

Dessa forma, tem-se desenvolvido vários tipos de secadores solares que através dos diferentes designs é possível controlar os fatores que influenciam a secagem e superar as desvantagens do método a céu aberto. Além disso, na secagem solar controlada, é possível armazenar a energia solar como calor sensível e calor latente, que pode ser aproveitado durante

a noite para dar continuidade à secagem por um determinado período de tempo (LINGAYAT *et al*., 2020).

Existem diversas formas de classificar os secadores a depender do autor. Utilizando as definições de Mohana *et al*. (2020) e de Singh e Gaur (2020), os secadores são separados baseados na forma de incidência da radiação solar no produto e no movimento do ar aquecido. A primeira contempla os secadores do tipo direto, indireto e hibrido, já na segunda forma, tem-se a secagem no modo ativo ou convecção forçada e modo passivo ou convecção natural. Além disso, se o secador combinar a secagem direta e a indireta pode ser considerado misto. A Figura 0.11 ilustra essa a classificação.

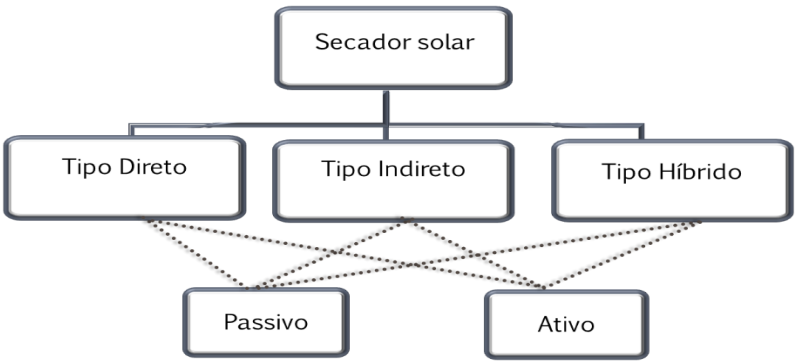


Figura 0.11: Classificação de secadores solares.
(Fonte: Autoria própria)

2.6.1 Secadores do tipo direto

Na secagem direta o material a ser seco é exposto diretamente à luz solar incidente através de uma cobertura transparente (vidro, material de policarbonato ou cobertura plástica). Esta cobertura transparente permite a passagem da radiação solar, que é então absorvida pela amostra e seu entorno imediato. Com a incidência da radiação solar, a temperatura dos materiais aumenta, resultando na emissão da radiação absorvida. A tampa de vidro transparente restringe o escape da radiação emitida para a atmosfera, aumentando a eficiência térmica do secador. Nesse processo, a temperatura no interior da câmara torna-se mais elevada, suficiente para a secagem do produto úmido (MOHANA *et al*., 2020).

Lingayat *et al*. (2020) elencam algumas vantagens e desvantagens do secador direto. Vantagens: baixa contaminação no produto, proteção contra chuva devido ao invólucro fornecido por tampa transparente; simples e menos oneroso de fabricar do que o secador

indireto para a mesma capacidade. Desvantagens: a qualidade e a cor do produto se deterioram quando o produto é exposto diretamente à luz solar; a remoção inadequada da umidade resulta em taxas de secagem mais lentas; menor capacidade e, portanto, útil apenas para aplicações em pequena escala; a transmissividade da tampa de vidro reduz após algum tempo, pois a condensação de umidade ocorre sobre a tampa de vidro.

A Figura 0.12 ilustra secadores solares do tipo direto utilizados em trabalhos recentes.



(a) (b)

Figura 0.12: Secadores solares do tipo direto. (a) Mewa *et al.,* 2019; (b) Krabch *et al*., 2022

Mewa *et al*. (2019) estudaram a cinética de secagem de carne bovina em um secador de túnel solar e a céu aberto nas condições climáticas do condado de Isiolo, Quênia, entre os meses de agosto e setembro. O teor de umidade do produto ficou entre 2,32 e 9,56% (base seca) após 11h de secagem no túnel solar, e em 24,76% (base seca) quando uma amostra semelhante foi submetida ao método tradicional de secagem ao sol. Todos os processos de secagem da carne bovina ocorreram no período de taxa decrescente.

O secador do tipo túnel é classificado como do tipo direto e ativo (devido à convecção forçada), sendo mais usados quando há necessidade de secar grandes quantidades de material. Geralmente, esse sistema também é útil como um abrigo físico para evitar a contaminação dos produtos.

No equipamento utilizado por Mewa *et al*. (2019), um módulo solar fotovoltaico fornecia energia para operar os ventiladores, que forneciam o fluxo de ar necessário dentro do secador. O seu funcionamento é tal que a radiação solar chega à superfície absorvente, passando pela tampa transparente do coletor fornecendo energia térmica que é transferida para o ar. Do coletor, o ar aquecido segue para a câmara de secagem, transfere o calor e absorve a umidade dos produtos, promovendo a desidratação. Os produtos dentro da câmara de secagem também são aquecidos por radiação solar direta que passa pela tampa transparente.

Krabch *et al.* (2022) secaram fatias de laranja em um secador solar direto com convecção natural, onde todas as faces possuem paredes duplas de vidro com vácuo para impedir a perda de calor. Abaixo do vidro interno de cada face existem placas absorvedoras que permitem aquecer o ar dentro do secador e consequentemente o material. Dessa forma, o secador atua como uma estufa mantendo todo o calor absorvido dentro do compartimento, com uma temperatura mais alta que uma estufa comum devido a presença das placas absorvedoras.

Para otimizar a absorção do fluxo de energia solar, a face voltada para o sul foi construída em dois ângulos diferentes. A face inferior com inclinação de 50 graus, maximizando a energia no período frio, e a superior com 34 graus, otimizando a recepção do sol o ano todo. A partir dos resultados, observou-se que o lado sul permitiu aquecer o ar no interior obtendo temperatura máxima nas faces superior e inferior às 12:00 h. Para o lado leste a secagem começou imediatamente após o nascer do sol, enquanto que para o lado oeste, o processo de secagem prosseguiu após o pôr do sol. Dessa forma, a temperatura dentro do secador ficou aproximadamente constante por mais tempo, contribuindo para uma menor umidade relativa do ar e uma maior difusividade de umidade efetiva no sólido em comparação a outros secadores que foram estudados.

2.6.2 Secador do tipo indireto

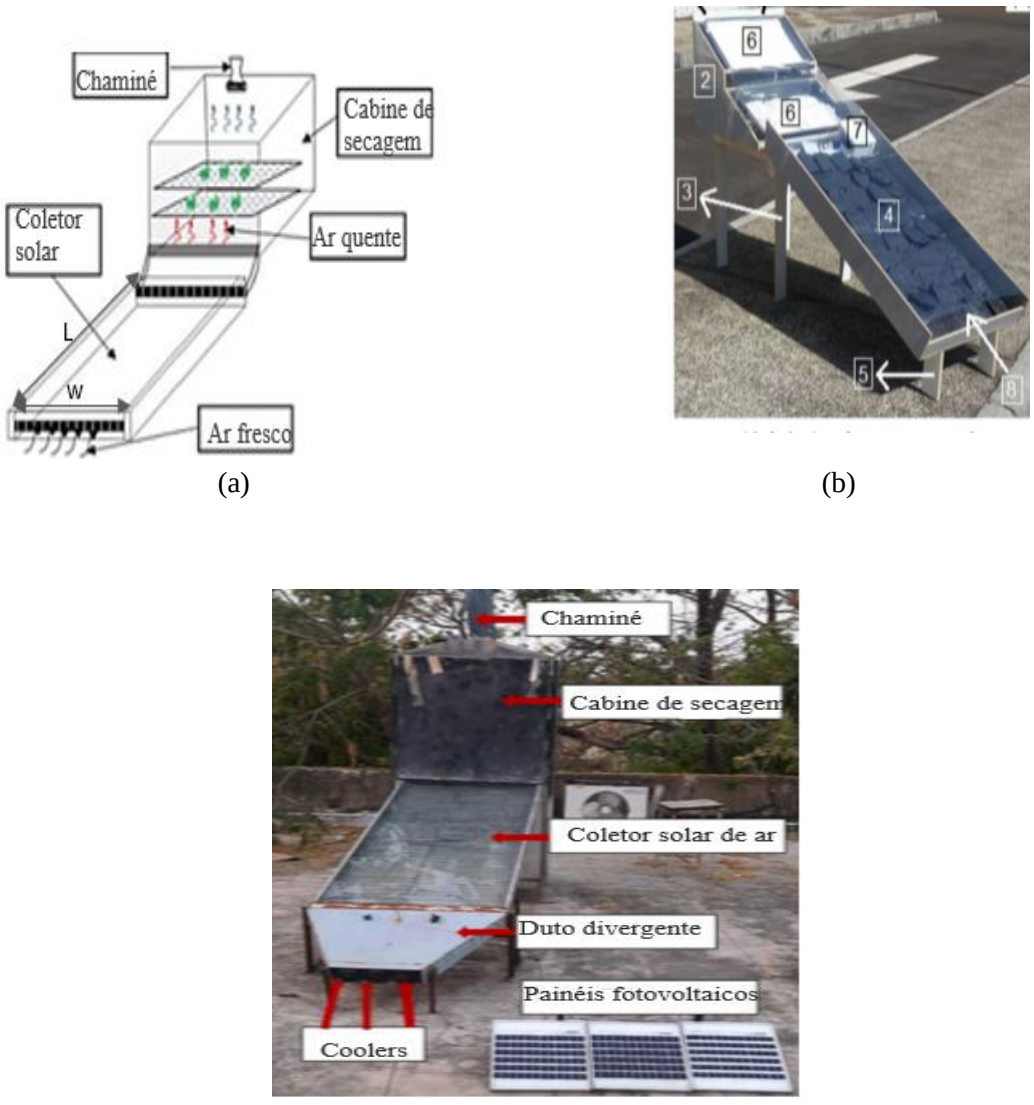
Nos secadores indiretos, a radiação solar incide sobre um coletor que aquece o ar que passa por ele. Este ar aquecido então se move para a câmara de secagem, normalmente feita de material opaco, para transferir calor e remover a umidade do produto por convecção (MOHANA *et al*., 2020).

O coletor é normalmente uma caixa de madeira composta por uma cobertura de vidro e absorvedor ou placa absorvente lisa ou corrugada. Esta pode ser posicionado no fundo do coletor, onde o ar passa por cima da placa ou no centro da caixa coletora, de forma que o ar entre em contato com as duas faces, superior e inferior da placa. O material da placa é, comumente, de alumínio ou material que tenha alta absortividade e emissividade, a fim de absorver a radiação solar e ser aquecida.

Algumas limitações dos secadores diretos podem ser superadas com os secadores indiretos. As vantagens deste método são: melhor qualidade do produto, pois atinge as temperaturas exigidas; retenção da cor do produto, pois não é exposto à radiação solar; maior eficiência do que a secagem solar direta. Já as desvantagens são: a variação da intensidade da

radiação solar com o tempo, podendo ser necessário armazenamento térmico e fonte de energia auxiliar durante os dias nublados e à noite; a radiação solar tem baixa densidade de energia e, portanto, uma grande superfície é necessária para o coletor; alto investimento inicial e considerável custos de energia se houver ventiladores ou sopradores (LINGAYAT *et al*., 2020).

As Figuras 2.13 (a), (b) e (c) ilustram alguns secadores do tipo indireto, utilizados em alguns trabalhos recentes.



(a) (b)

Figura 0.13: Secadores solares do tipo indireto.
(a) Benhamza *et al*., 2021; (b) Oliveira *et al*., 2021; (c) Goud *et al*., 2019, e Mugi e Chandramohan, 2022.

Benhamza *et al*. (2021) estudaram um secador indireto no modo passivo e ativo para determinar os parâmetros geométricos e operacionais ideais de um coletor aletado na secagem

de alimentos. O secador foi composto por um coletor solar, uma câmara de secagem (material opaco) e uma chaminé com ventilador para exaustão no modo ativo. O coletor consiste em vidro seguido de vácuo e placa absorvedora, a qual tem aletas longitudinais na parte inferior. O ar aquecido passa pelos canais do coletor, gerados pela superfície aletada, para chegar à câmara de secagem e escoar através das amostras. O ar úmido sai pela chaminé localizada acima da câmara de secagem.

Os experimentos foram realizados em setembro de 2019, entre 10:00 e 16:00h, em Marrakesh, Marrocos. Verificou-se que a altura do coletor (D2) tem impacto positivo na eficiência térmica, já a razão comprimento/largura (L/W) não tem efeito significativo. A eficiência máxima (72,27%) foi obtida para L/W = 3, D2 = 0,2 m e número de aletas= 60.

Oliveira *et al*. (2021) produziram amido ácido usando um secador solar, com convecção natural, a partir de amostras de amido de mandioca. O secador é similar ao utilizado por Benhamza *et al.* (2021), no entanto tanto o coletor solar quanto a câmara de secagem possuem cobertura feita de material transparente. Assim, é possível aquecer as amostras tanto através do método direto (incidência dos raios diretamente na amostra), como do indireto (ar aquecido). Alguns autores consideram que esse é um tipo de secador misto quanto à forma de incidência da radiação solar. Os resultados mostraram que o secador solar proporcionou secagem mais rápida e níveis de umidade mais baixos do que o controle. Os volumes específicos dos produtos desidratados ao sol foram semelhantes aos do controle, com contaminação minimizada.

Goud *et al*. (2019) e Mugi e Chandramohan (2022) utilizaram o mesmo secador solar indireto no modo ativo sob as condições climáticas de Warangai, India. O equipamento possui entrada trapezoidal com furos na junção com o coletor para medir a velocidade do ar com anemômetro de fio quente. Nessa entrada existem três ventiladores que fornecem um fluxo de ar para o coletor. Os painéis fotovoltaicos fornecem a energia elétrica necessária para suportar o ventilador, de forma que a velocidade do ar varia automaticamente em resposta à intensidade da radiação solar.

Os resultados de Goud *et al*. (2019), para secagem de quiabo e pimenta verde, apontaram que a eficiência do coletor foi de 74-78% frente aos valores de 38, 46 e 40%, encontrados por Hegde e*t al*. (2015), Rabha e Muthukumar (2017) e Abubakar e*t al*. (2018), respectivamente. A alta eficiência se deve à boa radiação solar em Warangai, ondulações em V na placa absorvedora, que aumentam a taxa de transferência de calor, e os ventiladores, que

aumentam o fluxo das massas de ar. A temperatura do ar de secagem ficou entre 43 e 64 °C, também maior do que nos estudos citados.

Mugi e Chandramohan (2022) realizaram análises energética, exergética, econômica e ambiental (4E) do secador indireto, nos modos passivo e ativo (PMISD e AMISD), durante a secagem de fatias de goiaba. A análise econômica revelou que o período de retorno percebido foi de 2,24 e 1,38 anos para PMISD e AMISD, respectivamente. Os períodos de retorno de energia de PMISD e AMISD são 1,01 e 1,5 anos, respectivamente. A emissão de CO_2, a mitigação de CO_2 e o crédito máximo de carbono obtido para ambos os secadores foram estimados em uma vida útil de 35 anos. A análise 4E concluiu que o desempenho do AMISD é superior ao do PMISD e ambos são economicamente viáveis e sustentáveis com menor impacto sobre o meio ambiente.

2.6.3 Secador solar híbrido

Segundo Abedini *et al*. (2022), a falta de acesso permanente à energia solar adequada e a intensidade variável da radiação solar durante o dia levaram os pesquisadores a utilizar um sistema de aquecimento auxiliar em secadores híbridos. O secador híbrido utiliza duas fontes de energia, uma é solar e a outra pode ser um aquecedor elétrico, um queimador a gás e biomassa, um aquecedor a gás liquefeito de petróleo (GLP), uma lâmpada infravermelha, trocadores de calor e materiais capazes de armazenar de energia. Adicionar um sistema de aquecimento auxiliar aos secadores solares pode melhorar a qualidade dos produtos secos, diminuindo o tempo de secagem e aumentando o desempenho do secador.

A Figura 0.14 mostra um secador híbrido usado por Abedini *et al*. (2022) para a secagem de camarão. Nesse equipamento a energia necessária é fornecida através de uma fonte solar e de uma fonte infravermelha auxiliar presente na câmara de secagem. Para promover um fluxo de ar uniforme sobre o camarão na bandeja existe uma caixa divisora na parte inferior da câmara e quatros canais de fluxo que conectam a saída do coletor a diferentes pontos da parte inferior da câmara. A placa absorvedora é corrugada e posicionada no centro do coletor, permitindo que o ar aqueça ao entrar em contato com a parte superior e inferior da placa. O topo da cabine tem forma de um telhado em V, sendo que um lado é de vidro, que pode ou não ser coberto, permitindo a secagem mista.

São analisados dois tipos de pré-tratamento com ebulição por 7 min: em água pura e em solução salina, e quatro modos de secagem: secagem solar indireta com sombra (vidro da

cabine coberto); secagem solar mista sem sombra (vidro da cabine exposto); secagem híbrida com sombra; secagem híbrida sem sombra.

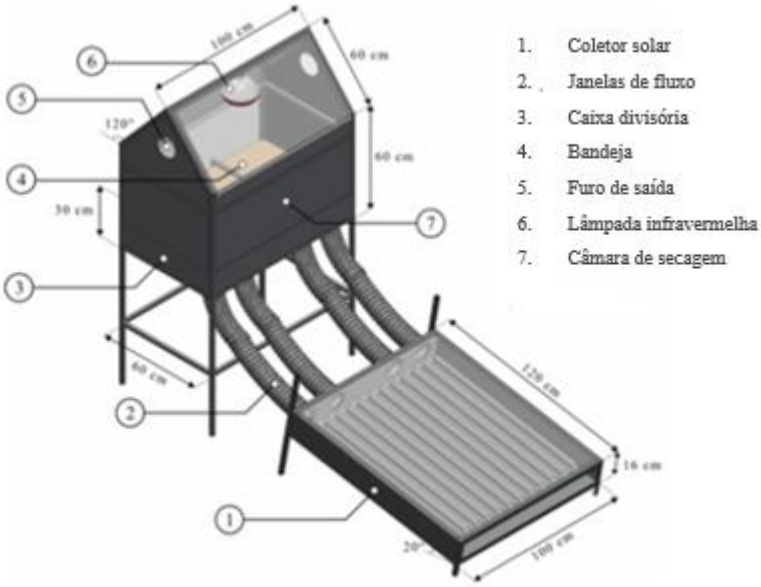


Figura 0.14: Secador solar misto e híbrido.
(Fonte: Abedini *et al.*, 2022)

Os experimentos de determinação da capacidade do secador mostraram que utilizar o aparelho com massa inicial de 2500 g é a condição ótima do secador, o que proporciona maior eficiência. A utilização do infravermelho aumentou o parâmetro colorimétrico a*, indicando que o camarão seco apresentou cor mais próximo do laranja e, portanto, foram mais desidratados. A quantidade de energia consumida pelo infravermelho dependeu do tempo de secagem, sendo assim quanto menor tempo, menor o custo. Os dois pré-tratamentos diminuíram o tempo consideravelmente. A exposição direta do material (casos sem sombra) também diminuiu o tempo, mas com menor efeito. O caso de secagem híbrida sem sombra combinada com pré-tratamento em solução salina levou à maior eficiência.

Mirzaei *et al.* (2021) construíram e testaram um secador solar (Figura 0.15) equipado com fonte infravermelho, um ventilador na entrada e coletor solar térmico fotovoltaico (PV/T) para secagem de fatias de batata. A conexão entre o coletor e a câmara é feita por um tubo de plástico, sendo que na parte inferior da câmara há uma entrada trapezoidal para melhor distribuição do fluxo de ar. Para pesagem, existem duas células de carga instaladas no suporte da bandeja do produto.

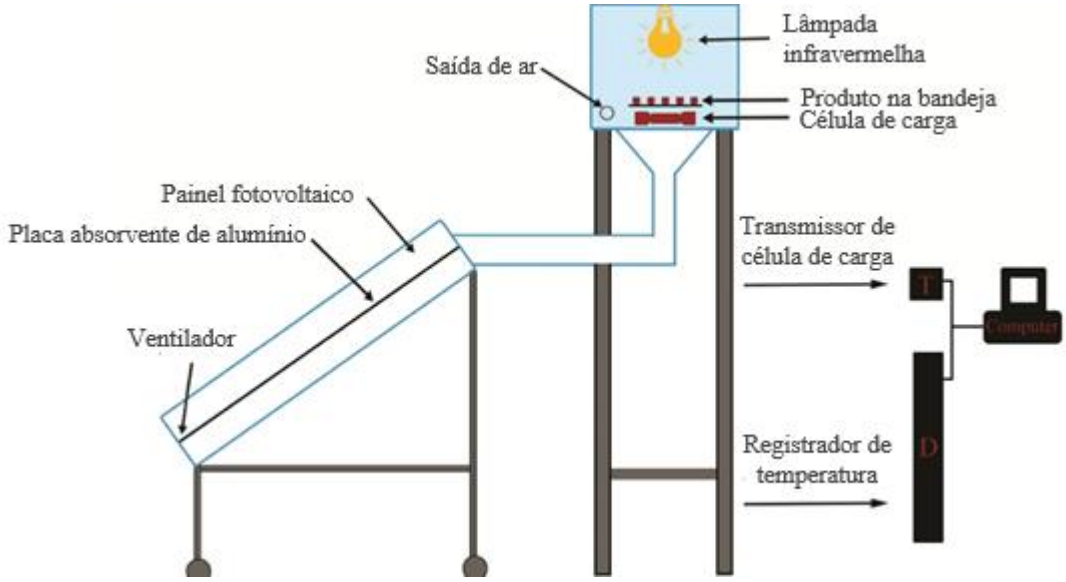


Figura 0.15: Esquema de secador solar híbrido.
(Fonte: Adaptado de Mirzaei *et al*, .2022).

A placa fotovoltaica está acoplada à caixa coletora. Uma folha de alumínio preto (antirreflexo), localizada no centro do corpo principal e sob os painéis fotovoltaicos, desempenha o papel de absorvente da radiação solar. A radiação que chega ao absorvedor foi utilizada para elevar a temperatura do ar passando acima e abaixo dele. À medida que o ar passa pelo espaço entre o painel fotovoltaico e o absorvedor térmico de alumínio, a temperatura do painel diminui devido a troca de calor com ar, produzindo energia elétrica com maior eficiência. Isso porque, diminuir a temperatura dos painéis diminui a eficiência térmica em detrimento do aumento da eficiência elétrica. A energia elétrica é destinada primeiramente ao ventilador e o restante, que varia com a intensidade do sol, para a lâmpada infravermelho.

Este estudo analisou a influência de uma tampa de vidro sobre o sistema PV/T nos últimos meses do verão no hemisfério norte (agosto e setembro) em Kerman, Irã. Com a cobertura de vidro, o ar entre o vidro e os painéis, ficou aprisionado. Depois de um tempo, a temperatura dos painéis aumentou e a radiação recebida foi reduzida, devido à presença da tampa. Assim, a potência gerada pelos painéis também diminuiu e, portanto, a potência da fonte IV foi menor. Em consequência, o tempo de secagem aumentou, mesmo que o ar tenha atingido temperaturas maiores, pois a radiação IV teve maior influência que o ar quente. O tempo de secagem, em comparação com experimentos não vidrados, foi prolongado de 12 a 25% para espessuras de batata de 3 mm, e entre 5 e 25% para espessuras de 7 mm.

Warji e Tamrim (2020) realizaram a secagem de chips de mandioca em secador híbrido e misto usando energia solar e elétrica (Figura 0.16). A principal fonte de energia vem da energia solar e quando chove a principal energia de secagem vem da energia de combustão do biogás, que é convertida em energia elétrica. O secador tem paredes transparentes para absorver a energia solar diretamente, um ventilador que serve para movimentar o ar dentro do equipamento e um exaustor para que a umidade seja sugada para fora da câmara de secagem. Verificou-se que o teor de umidade inicial de 60% foi reduzido para 10% - 12% em base úmida. A secagem dos chips de mandioca usando energia solar requereu 18 horas de secagem, 16 horas usando energia elétrica e 12 horas usando um híbrido de energia solar com energia elétrica.



Figura 0.16: Secador hibrido.
(Fonte: Warji e Tamrim, 2020)

Veeramanipriya e Sundari (2021) utilizaram o secador solar apresentado na Figura 0.17. Esse equipamento consiste em um secador solar térmico fotovoltaico (PV/T) auxiliado por coletor de tubo evacuado (ETC), para a secagem de fatias de mandioca nas condições meteorológicas de Thanjavur, Índia. O coletor solar consiste em um conjunto de tubos de vidro concêntricos, onde a região anular é um espaço vazio. Assim, perda de calor é eliminada devido ao vácuo, o que aumenta a eficiência do coletor. O soprador funciona com a ajuda do painel fotovoltaico. A energia elétrica gerada no painel fotovoltaico é armazenada em uma bateria e quando precisa ser usada passa pelo inversor para converter em corrente alternada.

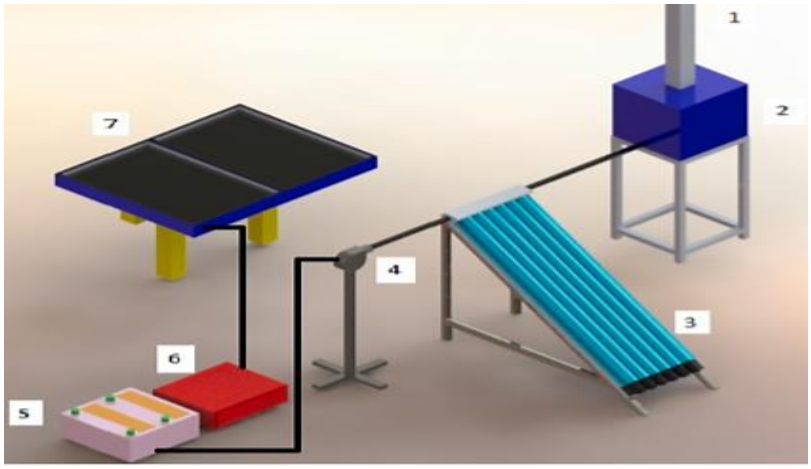


Figura 0.17 - Diagrama esquemático do secador solar de convecção forçada auxiliado por ETC. 1. Chaminé, 2. Câmara de secagem, 3. ETC, 4. Ventilador, 5. Bateria, 6. Inversor, 7. Painel fotovoltaico. (Fonte: Veeramanipriya e Sundari, 2021).

Após a secagem, o teor de umidade da mandioca, em base úmida, foi reduzido de 91,5 para 10,67%, em 8 h. A temperatura do ar dentro da câmara aumentou 30–40◦C em relação a temperatura ambiente. A análise estrutural, morfológica e de composição centesimal revelou que a qualidade da mandioca seca por secagem híbrida foi melhor, em termos de composição física e química, do que a mandioca seca ao sol.

2.7Informações técnicas sobre materiais empregados em secadores solares

2.7.1 Vidro

Numa estufa, nos carros ou nos secadores solares, as superfícies transparentes, em especial os vidros, transmitem mais de 90% da radiação na faixa visível, mas é praticamente opaco (não transparente) à radiação infravermelha de comprimento de onda maior que 3 µm. Assim, o vidro permite que a radiação solar entre livremente, mas bloqueia a saída da radiação infravermelha emitida pelas superfícies internas. Isso dificulta seu esfriamento por radiação e causa uma elevação da temperatura interior, como decorrência do acúmulo de energia térmica. Assim, o interior acaba aquecendo de forma significativa e a perda de calor ocorre por condução e convecção de forma mais lenta. Esse efeito de aquecimento é conhecido como efeito estufa (ÇENGEL e BOLES, 2013).

Um vidro incolor de 3 mm de espessura, por exemplo, transmite 86%, reflete 8% e absorve 2%. Sendo que parte dessa radiação absorvida é posteriormente transferida para o exterior, configurando uma perda de calor e para o interior por convecção e radiação, aquecendo todos os componentes de um coletor solar. Dessa forma a soma da radiação solar transmitida, absorvida e reemitida para o interior é considerada ganho de calor solar e pode ser determinada pelo coeficiente de ganho de calor (SHGC) ou também conhecido como fator solar. Este representa a razão entre o ganho de calor e a incidência da radiação (ÇENGEL e GHAJAR, 2012). Um vidro incolor ou "branco aguado" (com baixo teor de ferro) de 3 mm de espessura possui fator solar de 87%. Um vidro verde (com alto teor de Fe_2O_3) de mesma espessura tem fator solar de 62%. Já um vidro com controle solar possui fator solar menor que 40% (WESTPHAL, 2022).

Shaik *et al.* (2021) estudaram as propriedades de transmissão solar de diferentes materiais de envidraçamento transparente, como vidros acrílicos, com baixo, médio e alto teor de ferro. A eficiência térmica do coletor no modo de convecção natural foi comparada para diferentes coberturas transparentes. O vidro com baixo teor de ferro (LiG-12 mm) tem eficiência térmica 16,3 e 20% maior do que os vidros de médio e alto teor de ferro (HiG-12 mm), respectivamente, para um dia de pico de verão. O efeito da espessura do vidro no desempenho térmico é mais notável nos vidros do que nas folhas de vidro acrílico

Para o vidro incolor a transmissão não é uma função forte do comprimento de onda no espectro solar. No entanto para alguns plásticos há uma dependência do comprimento de onda, de forma que a transmitância também será significativa no espectro infravermelho em $\lambda > 3$ μm, diferente no que ocorre para o vidro que é opaco a essa faixa (DUFFIE e BECKMAN, 2013). Assim, para um coletor solar é melhor vidros do que plásticos transparentes, porque vai reter a radiação infravermelha emitida. Além de que a opção com baixo teor de ferro também é a ideal por ter maior eficiência térmica.

A Tabela 0.2 apresenta alguns parâmetros em relação à espessura do vidro, mostrando que quanto menor a espessura maior transmitância solar e luminosa, e o coeficiente global de transferência de calor. Este último é inversamente proporcional à resistência térmica, de forma que um vidro mais fino tem baixa resistência térmica, o que significa que o calor vai ser transmitido facilmente, mas também haverá perda de calor. No entanto, como os valores do coeficiente são próximos e visando redução de custos, é preferível usar vidros de menor espessura.

Tabela 0.2: Dados de parâmetros térmicos e luminosos em função da espessura de vidro.

Espessura (mm)	Coeficiente global de transferência de calor, U (W/ m^2 k)	Transmitância solar (radiação solar)	Transmitância luminosa (espectro visível)
3	5,8	0,86	0,88
6	5,7	0,78	0,85
12	5,5	*0,72-0,67	0,79

*Interpolação linear entre as espessuras de 10 e 13 mm
(Fonte: Westphal ,2022; Çengel e Ghajar, 2012)

Além das características já abordadas existem diversos tipos de vidro como: comum, temperado e laminado. Quando um vidro comum quebra, forma fragmentos e lascas maiores. O vidro laminado consiste de duas partes de vidro comum, com uma camada central de polímero (polivinil butiral ou PVB) entre elas. Quando ocorre a quebra, os vidros laminados mantêm seus fragmentos firmemente colados na camada de PVB. A camada de PVB ocasiona a redução da radiação ultravioleta em até 99%, o que não é ideal para coletores solar. O vidro temperado é produzido artificialmente pela indução de estresses ao vidro, por meio do aquecimento da chapa a altas temperaturas (em torno de 620°C), seguido de um resfriamento rápido. Esse processo, chamado de têmpera, confere ao vidro uma resistência térmica e mecânica cerca de 4 a 5 vezes maior do que o vidro comum e quando quebra, fragmenta-se em pequenos pedaços (SHACKELFORD, 2008; WESTPHAL, 2022)

Segundo Incropera (2008)**,** o vidro com baixo teor de ferro, que é o vidro comum ou de janela, tem maior transmitância solar (0,88) que o temperado (0,79). Assim, havendo impedimento financeiro, o vidro comum é uma boa opção devido à maior transmitância, menor custo (metade do valor) e facilidade de encontrar, mesmo o temperado sendo mais resistente a choques térmicos e mecânicos. A seguir, tem-se os valores de outras propriedades radiantes e térmicas do vidro comum, obtidas em Incropera (2008) e Çengel e Ghajar (2012): transmitância, 0,88; emissividade, 0,90-0,95; condutividade térmica 0,7 W/m K; capacidade térmica, 750 J/kg K.

2.7.2 Placa absorvedora

Um absorvedor de placa plana é amplamente utilizado em secadores indiretos. A energia solar é convertida em energia térmica, que é transferida para o ar que flui pelo sistema. Sua estrutura simples é vantajosa para a fabricação, mas apresenta falta de desempenho térmico devido ao baixo coeficiente de transferência de calor (h) entre a placa absorvedora e o fluido de trabalho (PRAJAPATI, 2022). Seu desempenho pode ser melhorado com a utilização de placas corrugadas que promovem maior turbulência, aumentando a transferência de calor para o fluido devido ao aumento do número de Nusselt e do coeficiente de transferência de calor. Diversos estudos (PRAJAPATI, 2022; NIDHUL *et al*., 2022; NIDHUL *et al*., 2020) com diferentes configurações de corrugações corroboram com essa conclusão.

Ao contrário da emissividade, a absortividade de um material independe de sua temperatura, mas depende fortemente da temperatura da fonte da radiação incidente. Para os metais a absortividade aumenta com a temperatura da fonte, e oposto ocorre para materiais não condutores e superfícies brancas (ÇENGEL E GHAJAR, 2012). Além disso, os metais são excelentes condutores térmicos, características que favorecem a sua aplicação em placas absorvedoras.

Para a maioria das superfícies transparentes como o vidro, a radiação é um fenômeno volumétrico. Já para as superfícies opacas a radiação emitida resultante se origina nas moléculas que se encontram na superfície. De forma que a emissividade é uma propriedade física relacionada ao acabamento superficial de um material e representa o quanto de radiação térmica ele emite, quando comparado à um corpo negro à mesma temperatura. Materiais com alta emissividade emitem mais calor por radiação. Assim, ao aplicar uma camada fina de tinta preta a um material, esta passa a atingir alta absortividade e emissividade característica da superfície escura ($\varepsilon = a_s = 0{,}98$) (WESTPHAL, 2022). Dessa forma, como o vidro que está acima da placa absorvedora é opaco a radiação infravermelha emitida, esta permanece confinada na região entre as duas superfícies causando o efeito estufa já descrito na seção anterior.

2.7.3 Isolantes

Existem diferentes tipos de isolantes térmicos, cuja função é reduzir a perda de calor devido a sua baixa condutividade térmica e alta resistência térmica. A Tabela 0.3 apresenta algumas informações sobre esses materiais, conforme Hasanzadeha *et al*. (2023).

Tabela 0.3: Propriedades e custo de alguns materiais isolantes.

Material isolante	Condutividade térmica, k (W/m K)	Densidade (kg/m^3)	Temperatura máxima (°C)	Custo * ($R\$/m^2$)
Poliuretano	0,024	62,5	120	328,04
Poliestireno expandido	0,035	30	80	177,92
Lã de rocha	0,039	126,4	750	200,16
Lã de vidro	0,038	79	500	239,08

* Valores convertidos considerando que o 1 € equivale a 5,56 R$, no dia 26/04/2023.
(Fonte: Hasanzadeha *et al*., 2023)

As lãs minerais como a lã de vidro, de rocha e de escória são comumente usadas como isolante térmico, inclusive em secadores solares (MIRZAEI *et al.*, 2021; MUGI E CHANDRAMOHAN, 2022). Segundo Hasanzadeha *et al*. (2023), esses materiais têm condutividade térmica tipicamente na faixa de 0,030 a 0,050 W/m K e temperatura de operação máxima em torno de 500 e 750°C. No entanto, uma das desvantagens das lãs minerais é a enorme influência da absorção de água em seu desempenho de isolamento térmico, visto que a presença de umidade causa aumento da condutividade. Além disso, possui alto custo e densidade e dificuldade no manuseio devido às irritações à pele e ao pulmão.

As propriedades especiais dos polímeros, como peso leve, baixo custo e flexibilidade, aumentaram seu uso em sistemas de fabricação. Uma das principais necessidades da indústria do plástico é diminuir o consumo de material para levar a uma produção mais econômica. Essa necessidade é atendida criando uma estrutura celular em polímeros ou, em outras palavras, formando espuma. Juntamente com a redução de peso e custo, a espuma melhora as propriedades de isolamento térmico, visto que é formada pela absorção de gás. Além disso, é um material de fácil manuseio e instalação e nenhuma absorção de água (HASANZADEHA *et al*., 2023).

O poliuretano (PU) expandido é formado por um polímero termorrígido o que confere resistência e rigidez. Material comumente encontrado em colchões e esponjas de lavar pratos, foi usado por Gupta *et al*. (2022) como isolante térmico em um secador solar. Possui baixíssima condutividade térmica (0,024 W/m K) e temperatura de operação alta (120°C). No entanto, tem um custo alto, maior que das lãs minerais e não é reciclável, por ser um material termorrígido, portanto causa sérios problemas ambientais (ASKELAND *et al*., 2008; HASANZADEHA *et al*., 2023).

Segundo Askeland *et al*. (2008), o poliestireno (PS) é um homopolímero, termoplástico, amorfo e de cadeia linear formado pela polimerização por adição do monômero estireno. O poliestireno expandido (EPS), mais conhecido como isopor, é formado por 98% de ar e 2 % de polímero. Dessa forma, o isolamento térmico se dá devido a presença de ar entre as células, visto que o ar tem baixa condutividade térmica. Esse princípio é encontrado no isolamento entre duas placas através de uma camada de ar ou vácuo e também na teoria de resistências térmicas de contato, onde as lacunas entre os matérias são preenchidas por ar, o que confere um aumento de resistência térmica (ÇENGEL e GHAJAR, 2012). O isopor foi aplicado como isolante térmico em secadores solares do tipo estufa e misto com convecção forçada construídos, respectivamente, por Djebli *et al*. (2019) e Khanlari *et al*., (2020).

Apesar de ter uma temperatura de operação baixa (80°C) em comparação com os outros, o isopor é isolante térmico muito promissor, por ter condutividade térmica baixa (0,035 W/m K), ser extremamente leve, fácil de encontrar, de fácil manuseio e colagem e com menor custo entre os materiais discutidos. A cola comum ou cola branca pode ser usada para colagem entre isopor e madeira pois tem ótima aderência na faixa de temperatura de operação do isopor. O poliestireno expandido é também um material reciclável pois pode ser novamente conformado pelo seu aquecimento, tendo o código de reciclagem de número 6.

É importante comentar que revestir o material isolante com um filme de alumínio vai ajudar também a manter o calor no ambiente, devido as propriedades reflexivas do alumínio. Princípio parecido, mas com objetivo de reduzir em 60% o ganho de calor, é usado em janela com filme reflexivo na parte externa, a fim de refletir o máximo de radiação infravermelha, mantendo um conforto térmico e reduzindo custo com refrigeração em edifícios (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

2.7.4 Madeira

Existem diversos tipos de madeiras, dentre elas o compensado que é uma madeira de engenharia multiuso com um enorme mercado global de aproximadamente 106 milhões de metros cúbicos, sendo considerado um produto básico nas indústrias de construção e móveis há mais de 100 anos. Compensados convencionais são painéis produzidos construído por meio da colagem de folhas finas de madeira, normalmente em número ímpar, com orientação perpendicular alternada, resultando em um produto com propriedades mecânicas e estabilidade aprimoradas (MATOS *et al*., 2019; YUE *et al*., 2023).

O compensado de virola é feito a partir de árvores da espécie *Virola surinamensis*, popularmente chamada de virola ou ucuuba. Esta é uma madeira branca de baixa densidade que é geralmente encontrada nas regiões norte e nordeste do Brasil, especificamente nas margens alagáveis de rios e igapós, assim como nas várzeas. O compensado de virola é um muito fácil de se trabalhar, podendo ser cortado por máquinas comuns. Ela é muito utilizada para a confecção de caixotarias, lâminas para fabricação de compensados, madeira para a construção civil e madeira para fabricação de pisos. (SANTOS e PIMENTEL, 2023).

Dessa forma o compensado de virola é uma ótima escolha para estrutura de secadores, gerando um equipamento composto por peças leves e com robustez. Além disso, como toda madeira, pode ajudar no isolamento, devido à baixa condutividade térmica. Segundo Incropera *et al*. (2008), a condutividade térmica e densidade do compensado de madeira é, respectivamente, 0,12 W/(m k) e 545 kg/m^3, já para compensado de alta de densidade é 0,15 W/(m k) e 1010 kg/m^3.

2.8 Posicionamento do coletor solar relacionado ao movimento do sol

Em cada ponto do planeta a radiação direta incide no solo com uma inclinação diferente, que varia ao longo dos dias e meses do ano, de acordo com a posição da Terra e do Sol no espaço. Para maximizar a incidência da radiação e melhorar o aproveitamento da radiação solar global, deve-se definir qual melhor direcionamento do coletor solar (VILLALVA, 2015). Antes disso, faz-se necessário definir alguns conceitos importantes, ilustrados na Figura 0.18.

O eixo axial da terra tem uma inclinação de 23,45° em relação ao plano orbital elíptico do planeta em torno do sol. Esse ângulo é responsável pela declinação solar (δ) que é o ângulo dos raios solares com relação ao plano do Equador. Durante a translação da terra ao longo do ano, a declinação solar varia de – 23,45° a + 23,45°, gerando o ciclo anual das diferentes estações, as quais são definidas pelos solstícios e equinócios. O solstício é o momento em que um dos polos (Norte ou Sul) encontra-se o máximo possível inclinado em direção ao sol. Assim, um dos hemisférios tem maior incidência de radiação solar que o outro, e assim recebe mais calor. Para o hemisfério sul, o verão ocorre quando o Polo Sul está voltado para o sol (δ = -

23,45°) e o inverno quando o Polo Sul está voltado para a direção oposta ao sol (δ = +23,45°). No equinócio (δ = 0°), os raios solares incidem de forma perpendicular sobre a linha do Equador, ou seja, incidem com a mesma intensidade sobre os dois hemisférios, gerando o outono e primavera (PEREIRA *et al*., 2017).

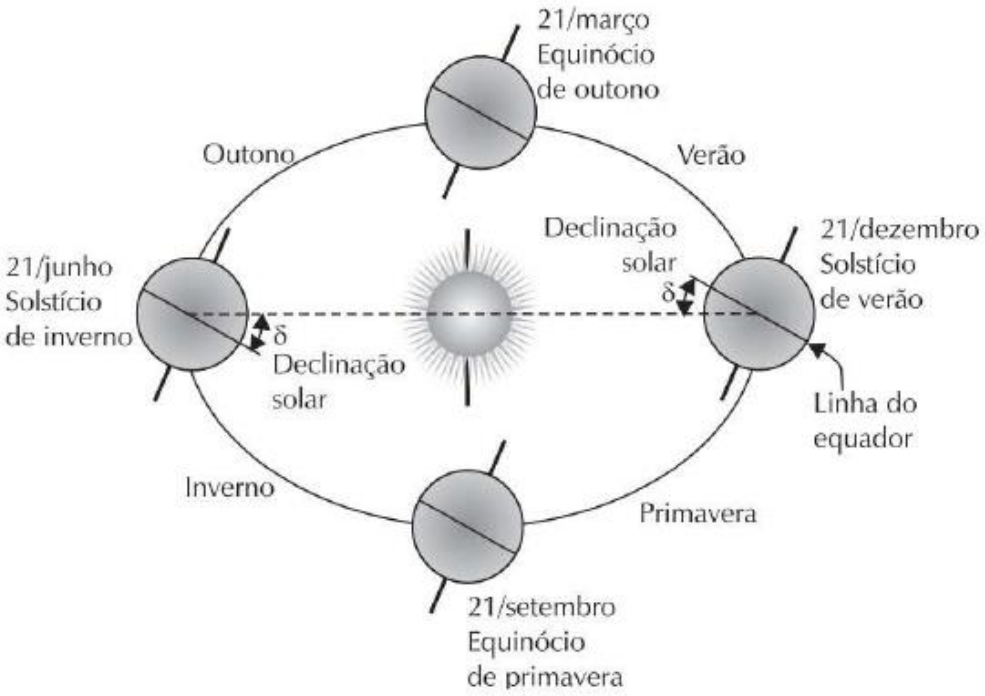


Figura 0.18: Variação do ângulo de declinação solar ao longo do ano de acordo com a posição da Terra em sua órbita em torno do Sol.

(Fonte: Villalva, 2015).

A duração dos dias, ou seja, o fotoperíodo (período de luminosidade, que vai do nascer ao pôr do sol) está intimamente ligado às estações do ano e à quantidade de energia recebida do sol, conforme mostrado na Figura 0.19. De forma que, naturalmente no inverno os dias são mais curtos que no verão. O fotoperíodo também varia com a latitude, apresentando maior variabilidade à medida que se aproxima dos polos. A exemplo, na latitude 10° S, o fotoperíodo chega ao máximo de 12,5 h no verão e máximo de 10 h no inverno (PEREIRA *et al*., 2017).

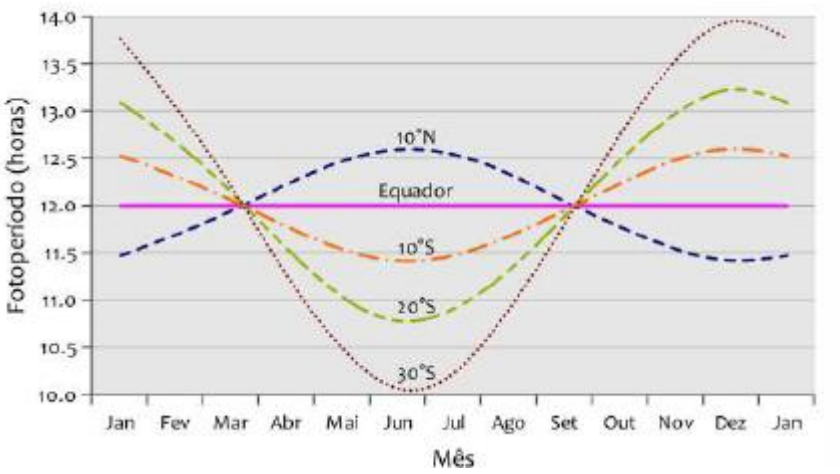


Figura 0.19: Variabilidade do fotoperíodo ao longo do ano para diferentes latitudes.
(Fonte: Pereira *et al.*, 2015)

Segundo Hodge (2010), a partir da visão de Ptolomeu, onde a terra estaria estacionária no centro e o sol girando ao redor, pode-se considerar um observador num plano horizontal onde o sol está localizado na região celeste, conforme esquematizado Figura 0.. Dessa forma, é possível definir alguns ângulos importantes: O ângulo azimutal é o ângulo entre o Norte e a linha de projeção do sol no plano do observador; o ângulo solar ou altura do sol é o ângulo entre a linha de posição do sol no céu e sua projeção no plano; o ângulo de zênite é o ângulo entre a linha de zênite e a linha de posição do sol no céu.

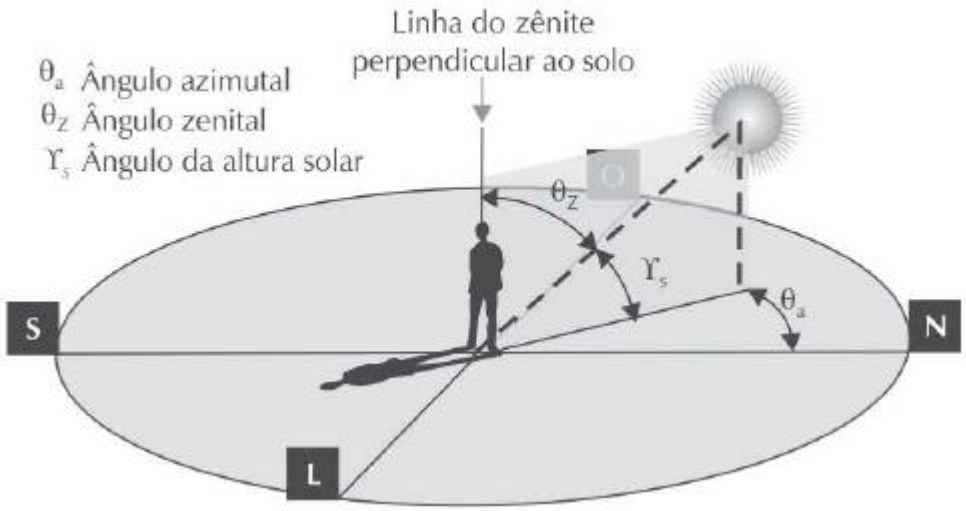


Figura 0.20: Posição do sol definida pelos ângulos azimutal, zenital e da altura solar.
(Fonte: Villalva, 2015).

Como ilustrado na Figura 0.19, a altura do sol no céu é maior nos dias de verão, o que significa que nessa época os raios solares incidem sobre a cabeça do observador com um ângulo zenital menor. Um ângulo menor corresponde à um menor comprimento do trajeto até o solo ou camada de massa de ar reduzida e, portanto, a incidência da radiação é maior. Nos dias de inverno a altura solar é menor e o observador enxerga o Sol mais baixo, próximo da linha do horizonte. Nesse caso o ângulo zenital e a massa de ar percorrida pelos raios solares são maiores (VILLALVA, 2015).

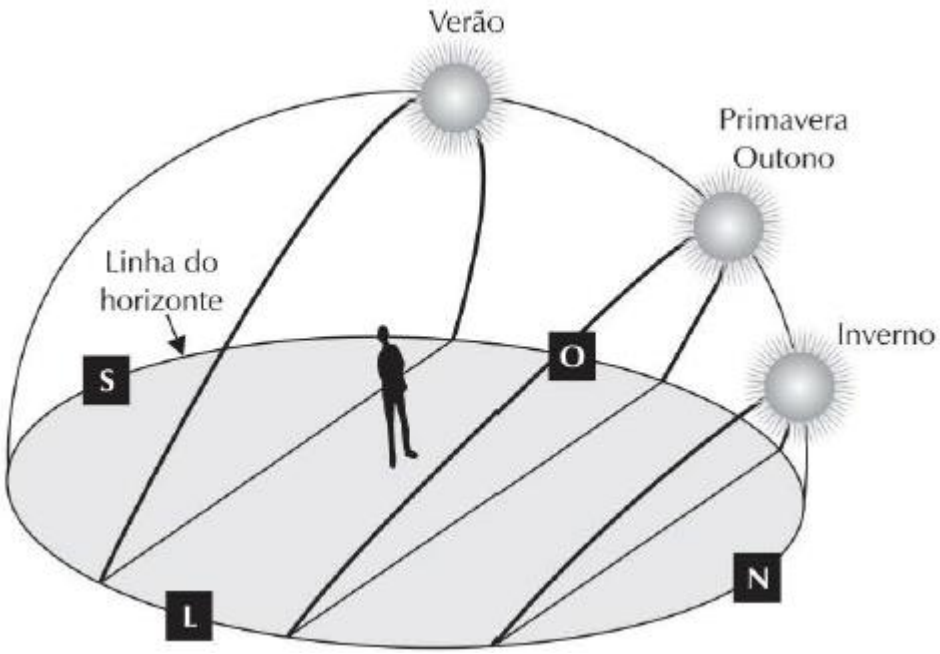


Figura 0.19: Trajetória do movimento aparente do sol ao longo do ano.
(Fonte: Villalva,2015).

Além do movimento de translação orbital, a rotação da terra em torno do seu eixo está ligada ao ciclo diário de variabilidade da incidência de energia do Sol. No hemisfério sul, quando a linha de posição do sol projetada no plano coincide com o norte geográfico o ângulo de azimute é zero (Figura 0.). Nesse momento o sol está na metade do trajeto que percorre do instante em que nasce até o instante em que se põe, correspondendo ao meio dia. Ao meio dia, o sol tem máxima altura solar de aproximadamente 90° e ângulo azimutal de 0° (HODGE, 2010).

Dessa forma, a orientação correta de coletor deve levar em conta o movimento diário. A superfície não pode ser orientada para leste ou oeste, pois dessa forma só aproveitaria a

radiação solar pela manhã ou pela tarde. Segundo Duffie e Beckman (2013), para quem está no hemisfério sul, o melhor ângulo de azimute é 0◦, que significa que as superfícies devem estar voltadas para norte, ou seja, para a linha do Equador (Figura 0.20). Essa orientação melhora o aproveitamento da luz solar ao longo do dia, pois durante todo o tempo o módulo tem raios solares incidindo sobre sua superfície, com maior incidência ao meio-dia solar. Nas localidades que estão acima da linha do Equador deve-se orientar o painel para o sul geográfico (VILLALVA,2015). Sendo que, desvios em ângulos de azimute de 10◦ ou 20◦ têm pequeno efeito na disponibilidade anual total de energia.

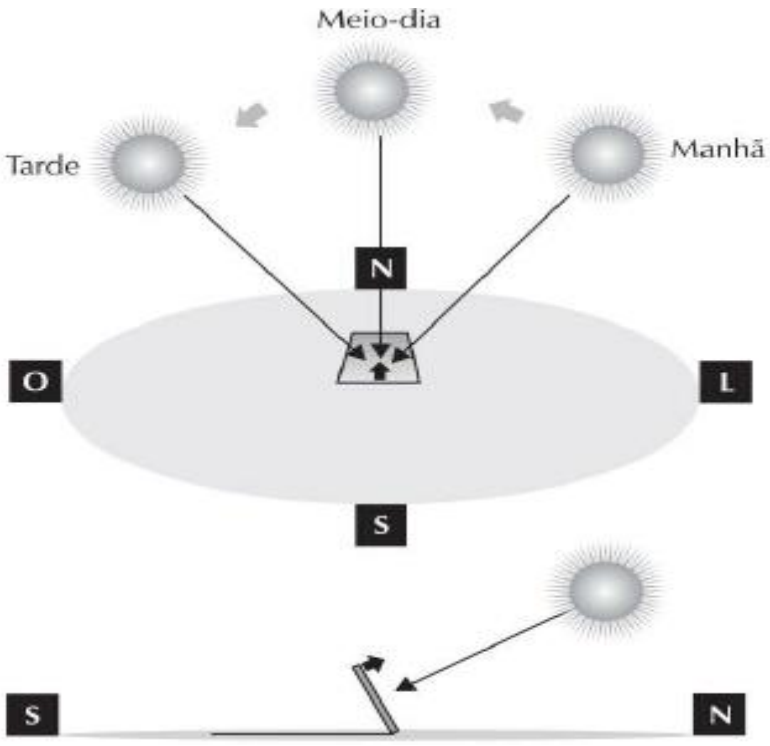


Figura 0.20: Orientação correta voltada para o Norte.
(Fonte: Villalva, 2015).

Em relação à inclinação das placas, deve-se analisar como a incidência solar se comporta nos diferentes períodos do ano, de modo que a inclinação ótima vai maximizar a energia captada (Figura 0.21 e Figura 0.22).

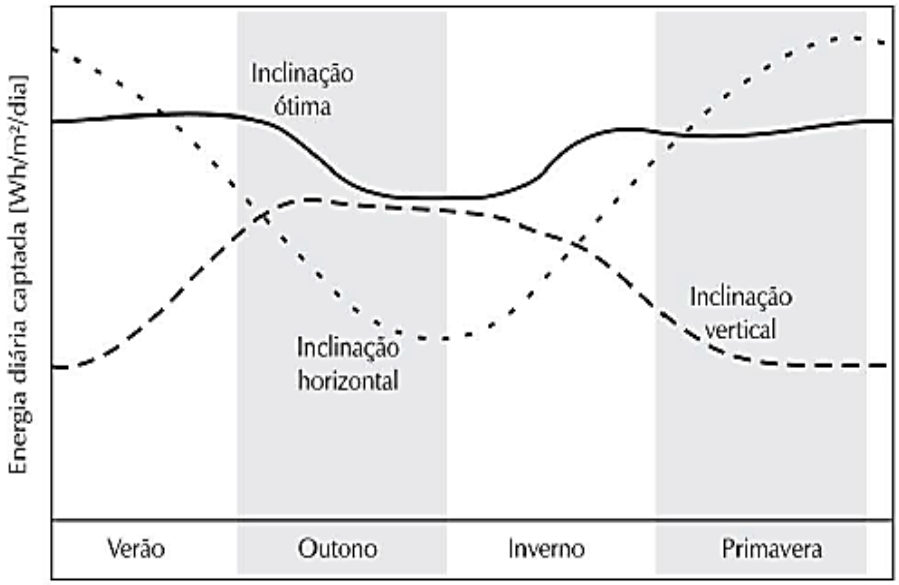


Figura 0.21: Energia solar ao longo do ano em diferentes inclinações da placa.
(Fonte: Villalva, 2015)

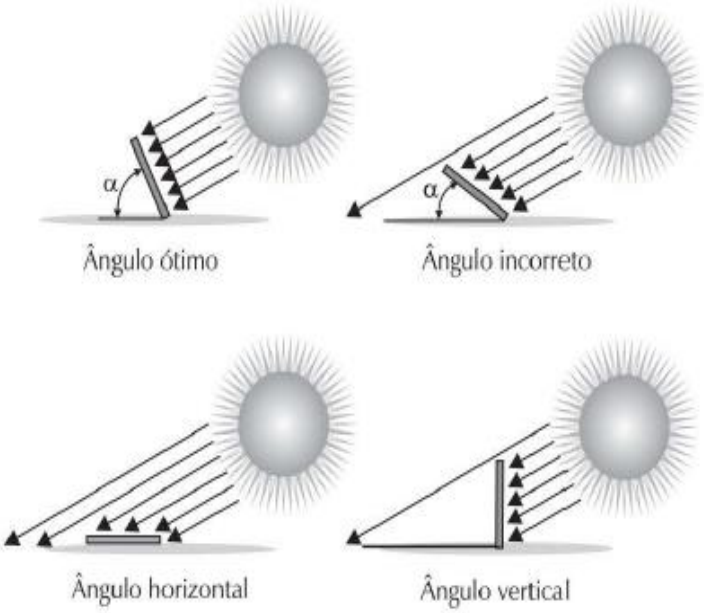


Figura 0.22: Efeito da inclinação da placa.
(Fonte: Villalva, 2015)

A partir da Figura 0.23, nota-se que a energia anual é máxima em uma inclinação de superfície igual à latitude (45°). O máximo é amplo e as mudanças na energia total anual são inferiores a 5% para declives de 20º a mais ou a menos que o ótimo. A inclinação correspondente à energia máxima estimada no inverno é de aproximadamente 15º a mais que a

latitude, correspondendo a 60º, que é uma inclinação de superfície mais próxima da vertical. Como no inverno a altura solar é menor, essa inclinação, privilegia a produção de energia. Para o verão, a inclinação deve ser aproximadamente 10º a 15º menor que a latitude, ou seja, uma inclinação mais próxima da horizontal, de forma que a maior altura solar proporciona incidência máxima. As inclinações não são críticas, sendo que desvios de 15º resultam em redução da ordem de 5% (DUFFIE e BECKMAN, 2013; VILLALVA,2015).

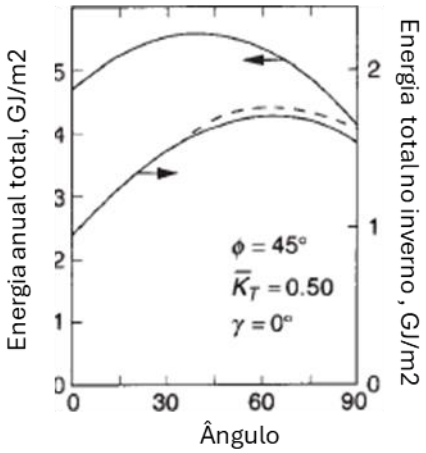


Figura 0.23: Variação da energia anual total e energia total do inverno em função da inclinação da superfície para uma latitude de 45ºN e ângulo azimutal da superfície de 0º.

(Fonte: Duffie e Beckman, 2013).

A recomendação para instalação de placas fotovoltaicas segundo Villalva (2015), apresentada na Tabela 2.4, é que para latitude até 20° o ângulo da placa deve ser igual ao da latitude.

Tabela 0.4: Escolha da inclinação da placa.

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
0º a 10º	$\alpha = 10º$
11º a 20º	α = latitude
21º a 30º	α = latitude + 5º
31º a 40º	α = latitude + 10º
41º ou mais	α = latitude + 15º

(Fonte: Villalva, 2015)

Diante do exposto, entende-se que se deve priorizar a máxima incidência solar durante todo o ano se as superfícies forem fixas. Assim, em São Cristóvão, Sergipe, localizado no hemisfério sul com latitude de 10,90° e longitude de 37,10° o coletor deve está voltado para o norte com inclinação aproximadamente igual a latitude, para maximizar a incidência solar durante todo o ano. Além disso, Villalva (2015) comenta que não se recomenda a instalação com ângulos de inclinação inferiores a 10º para evitar o acúmulo de poeira ou água sobre as placas.

2.9 Instrumentação e aquisição de dados da secagem solar

A medição de variáveis/parâmetros como temperatura, umidade relativa, velocidade do ar, intensidade da radiação solar, temperatura e massa do material sólido, é essencial para o monitoramento e análise da secagem solar.

A automação torna o sistema de medidas mais eficiente, além de garantir maior segurança e redução dos custos do processo, tendo em vista a otimização do tempo. No campo da pesquisa cientifica é cada vez mais comum a utilização de sistemas de aquisição de dados, graças à sua acessibilidade, portabilidade e precisão (D'AUSILIO, 2016). A plataforma Arduino tem se mostrado cada vez mais atrativa devido à facilidade de acesso, uso e programação, aliada aos preços acessíveis dos componentes eletrônicos.

Arduino é uma plataforma de código aberto com uma comunidade de interação de usuário composta de duas partes: o hardware, que é a placa de circuito contendo o microcontrolador, e o software que é o ambiente de programação livre IDE (ARDUINO, 2024).

O hardware do Arduino nada mais é que um conglomerado de microcontroladores e outras peças necessárias, como cristal, pinos de fonte de alimentação integrados e bootloader. Os microcontroladores são sistemas embarcados que, quando estão em um dispositivo, controlam as ações e recursos desse dispositivo, em outras palavras, são microcomputadores agora popularmente conhecidos como computadores de placa única. O Arduino contém um microcontrolador, chamado Atmel ATmega328p ou ATmega168, e depende deste microcontrolador no desenvolvimento de protótipos e projetos (KONDAVEETI *et al*., 2021).

As placas Arduino são capazes de ler entradas e transformá-las em uma saída. Isso é possível através do envio de um conjunto de instruções ao microcontrolador da placa através do código escrito no ambiente de desenvolvimento da plataforma, o software Arduino IDE (Integrated Development Environment). Dentro desse ambiente, é utilizada uma linguagem de programação fácil de aprender e bibliotecas baseadas na linguagem C++ (NAYAAR E PURI, 2016).

Existem diversos tipos de placa Arduino e de versões compatíveis (que não são produzidas pela empresa Arduino). Segundo Felisardo *et al.* (2023), as principais diferenças entres estes estão na capacidade de armazenamento (memória), velocidade de leitura (clock's), quantidade de portas, tensões de entrada e corrente dos pinos. As mais comuns são Arduino UNO e Arduino Mega. Este último apresenta maior quantidade de entradas digitais, viabilizando sua utilização em diversas aplicações. Isso se dá porque o Arduino Mega utiliza o microcontrolador ATmega 2560, o qual expande o número de portas de 16 para 54 portas digitais. Na Figura 0.24 é apresentada uma placa Arduíno Mega 2560.

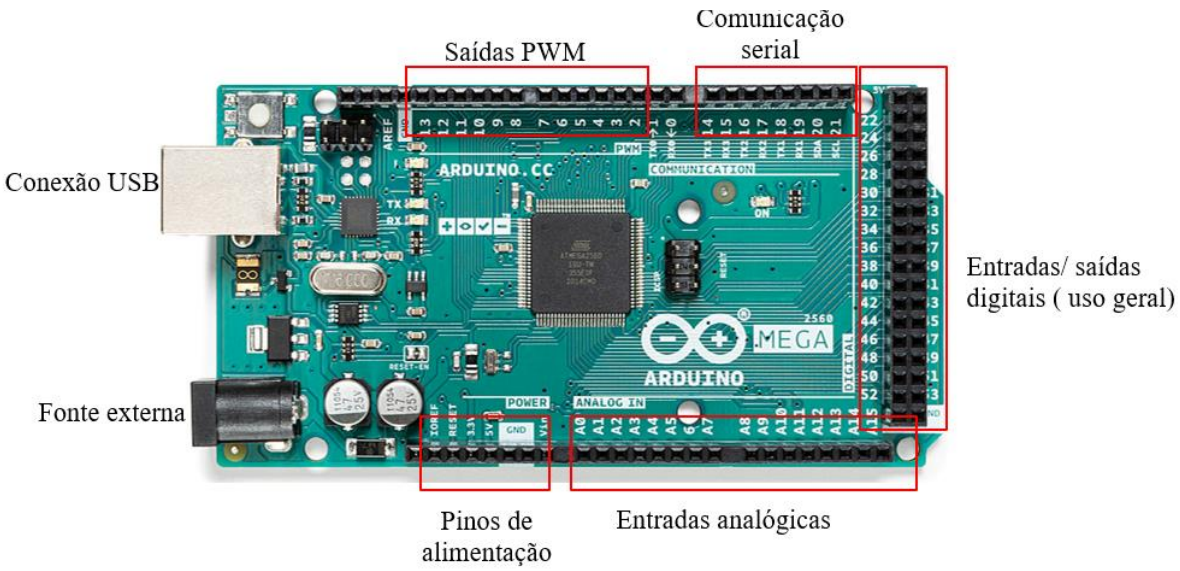


Figura 0.24: Placa Arduíno Mega 2560.
(Fonte: Adaptada de Arduino, 2023)

A conexão USB é responsável pela comunicação entre o Arduino e o computador, onde foi elaborado o software de programação de atuação da plataforma. A fonte externa permite a ligação do Arduino. A comunicação serial tem a função de permitir comunicação da placa com outro dispositivo que seja compatível com a plataforma, como Wi-Fi e Bluetooth. As Saídas

PWM (pulse width modulation) servem para regular o pulso de saída conforme especificações de interesse, dependendo da especificação do dispositivo ligado ao Arduino. Dentre as 54 portas digitais, 10 são portas de comunicação serial, 15 são saídas PWM e as outras são de uso geral. Todas essas portas podem ser configuradas como portas de uso geral, GND (terra) e 5 V (alimentação), se necessárias.

Os pinos de alimentação, são utilizados para alimentar os dispositivos com o Arduino. Em geral, os canais analógicos, que são 16 portas de A0 a A15, efetuam leitura de 0 a 5V e são utilizados para dispositivos capazes de mensurar grandezas, já os canais digitais são usados em nível alto ou baixo com dispositivos incapazes de mensurar. (FELISARDO *et al*., 2023).

2.10 Análise da revisão

Diante do exposto nessa revisão, constata-se uma lacuna de informações na literatura seja a respeito da secagem convencional, seja sobre a secagem solar da entrecasca de mandioca. Ademais, verifica-se uma tendência de estudo de secadores solares híbridos, em especial com energia auxiliar de radiação infravermelha, visando melhorar a eficiência do processo, bem como servir de alternativa nos períodos onde a radiação solar é baixa. Isso serviu de motivação para desenvolver neste trabalho um secador solar híbrido instrumentado com sensores automáticos através do Arduino, aplicado à secagem de um resíduo que ainda é pouco aproveitado, como a entrecasca da mandioca, a fim de agregar valor com a energia solar e ampliar os conhecimentos sobre essa biomassa.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados detalhes do projeto, construção e instrumentação do secador solar híbrido desenvolvido, bem como é descrita a metodologia experimental adotada em sua aplicação na secagem de entrecasca de mandioca, desde o preparo da biomassa, passando pelos ensaios realizados, até a avaliação de desempenho do secador.

A Figura 0.1, apresenta um fluxograma com as etapas realizadas nesse trabalho de forma resumida e cronológica.

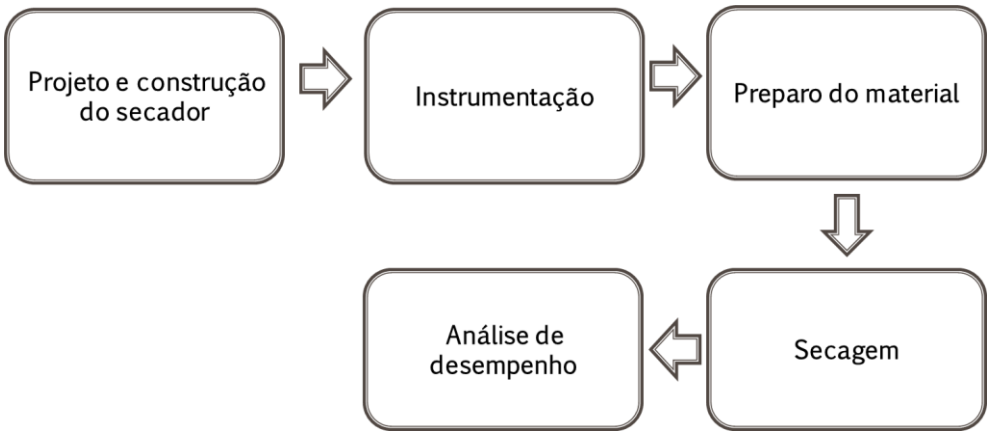


Figura 0.1: Fluxograma com as etapas do trabalho.

3.1 Desenvolvimento do secador solar híbrido

3.1.1 Projeto do equipamento

A definição do equipamento a ser construído foi feita com base em uma revisão da literatura sobre os estudos mais recentes envolvendo secadores solares, principalmente na base de dados Scopus. Para organizar as informações coletadas e facilitar a visualização, elas foram dispostas em uma tabela , apresentada no Apêndice B, separadas por tipo de secador, materiais, utilização e especificações de placa fotovoltaica e de fontes suplementares de energia, posição da placa absorvedora e do ventilador. Alguns desses trabalhos foram citados na secção 2.6.

Diante dos resultados promissores, em termos de intensificação da taxa de secagem, obtidos em trabalhos recentes sobre secadores solares híbridos que fazem uso de fontes de energia auxiliar à solar, optou-se por projetar um secador combinando a convecção forçada de ar aquecido por um coletor solar e o aquecimento infravermelho da biomassa, tendo em vista uma maior eficiência do equipamento. Buscou-se, dessa forma, desenvolver um equipamento de maior eficiência e versátil, capaz de operar em dias nublados ou chuvosos.

O projeto 3D com as dimensões de todas as partes, em escala, e as angulações necessárias foi realizado utilizando o software *SketchUp*, a fim de auxiliar na construção mais precisa do equipamento, esquematizado na Figura 0.2.

1. Coletor solar
2. Placa absorvedora
3. Entrada do coletor
4. Ventilador
5. Tubo flexível
6. Câmara de secagem
7. Vidro cabine
8. Lâmpadas infravermelho
9. Saída de ar
10. Bandeja perfurada

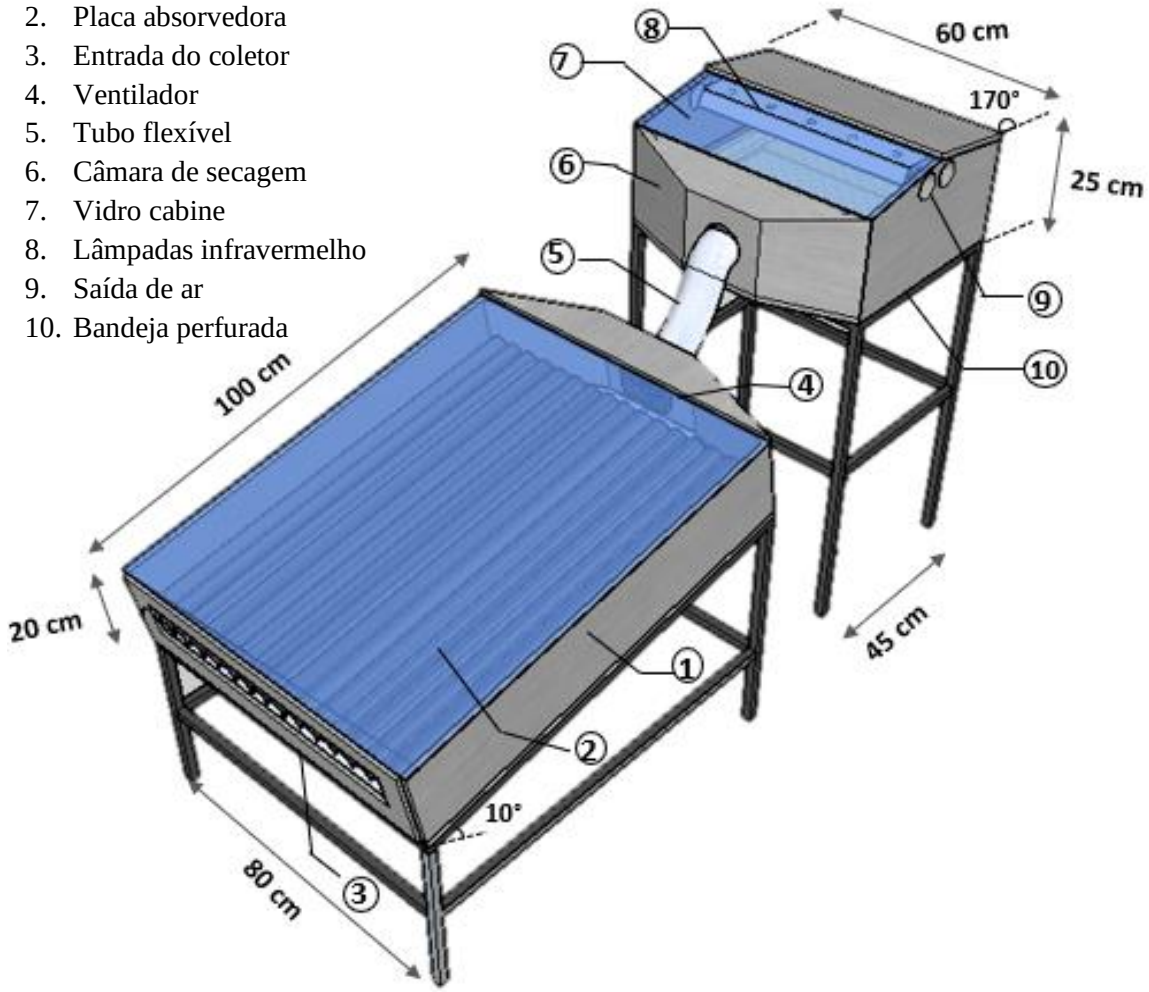


Figura 0.2: Esquema do secador solar híbrido e ativo.

O coletor (1) foi dimensionado com 100 x 80 x 20 cm e a cabine de secagem (6) com 60 x 45 x 25 cm. Essas dimensões foram definidas a fim de construir um equipamento

compacto, com área transversal do coletor ou da placa absorvedora (8000 cm^2) equivalente a quase três vezes a área transversal da cabine ou da bandeja (2700 cm^2). Dentre algumas regras práticas propostas por projetistas experientes de sistemas de secagem solar, citadas no trabalho de Sharma e Anyanwu (2017), tornar o coletor igual a três vezes a área da bandeja aumenta significativamente a taxa de secagem.

O corpo de todo o secador foi de madeira para criar uma estrutura firme e ajudar no isolamento, juntamente com o revestimento interno de isopor, minimizando perdas de calor. O isopor foi revestido de alumínio para promover uma superfície reflexiva de radiação. A escolha do isopor como isolante foi, principalmente, devido ao baixo custo.

A placa absorvedora (2) foi de alumínio revestida com tinta preta para melhorar a absortividade do material e com corrugações para aumentar a área da superfície e, assim, aumentar a radiação incidente sobre ela. Além disso, é útil para promover maior turbulência do fluxo de ar (GOUD *et al*., 2019). Ela foi posicionada no plano central do coletor, permitindo que o ar seja aquecido ao escoar por cima e por baixo da placa assim como visto nos trabalhos de Mirzaei *et al.* (2021), Benhamza *et al.* (2022), Abedini *et al.* (2022) e Krabch *et al.* (2022).

Uma abertura retangular com área de 0,16 m^2 permite a entrada (3) do ar atmosférico no coletor. A fim de diminuir a perda de carga, após a região retangular do coletor há uma saída em formato trapezoidal (seção convergente), que foi afunilando até a conexão com o tubo flexível (5), onde o cooler ou ventilador (4) foi posicionado. Este permite a sucção do ar aquecido para a câmara de secagem. Alguns autores também utilizaram o ventilador na saída do coletor (RAHMAN, 2017; ABEDINI *et al.*,2022*;* REZVANI *et al.*,2022*).* Segundo Duffie e Beckman (2013), a utilização de bombas menores, como os coolers, promovem vazões mais baixas o que resulta em maior aumento de temperatura nos coletores, tendo as vantagens adicionais de compactação do sistema e reduções tanto no custo inicial quanto no custo operacional dos sistemas.

O tubo flexível (5) foi conectado a uma saída trapezoidal ou seção divergente localizada na parte frontal da cabine para direcionar, gradativamente, o escoamento do ar em direção à câmara de secagem, paralelamente à bandeja (10). Diferente do projeto original que definia o posicionamento desta secção na parte inferior da cabine, foi preferível colocá-lo na parte frontal. Isso porque facilita a colocação do dispositivo de pesagem na parte inferior e também para não prejudicar o fluxo de ar para o material na cabine. Dessa forma, é possível uma maior uniformidade na secagem e nos dados. A utilização de um tubo flexível permite o movimento

independente das partes do equipamento, possibilitando estudos da variação da posição do coletor com a variação da posição do sol durante o dia.

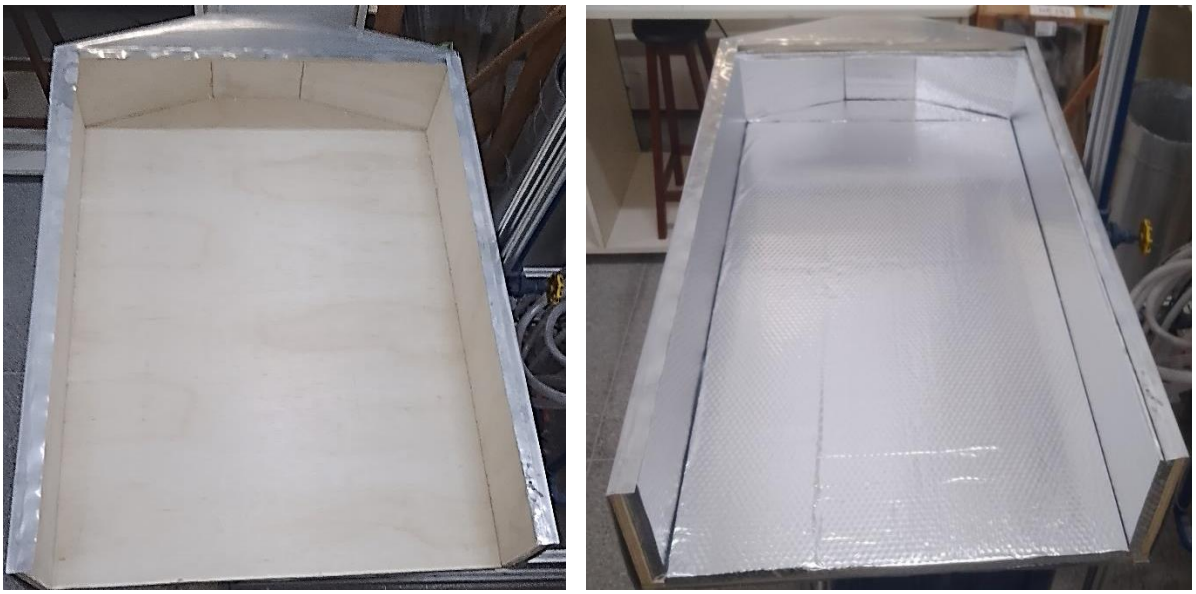
O topo da cabine foi projetado em um formato de telhado em V para acomodar as lâmpadas infravermelhas (8) no vértice. Foram definidas lâmpadas infravermelhas (IV) halógenas de corrente continua de 12 V que, além de baratas, reduz a necessidade de um inversor num possível sistema fotovoltaico, barateando o custo desse sistema. A fonte de radiação IV foi posicionada a uma distância vertical de 10 cm da amostra. A superfície do topo voltada para o coletor foi de vidro (7), com mesma inclinação do coletor (10°), para passar o máximo de radiação solar diretamente para a câmara de secagem, a fim de intensificar o processo de secagem. O secador pode operar no modo misto, ao usar o ar quente para secagem indireta e a luz solar incidente no material para secagem direta, assim como os secadores construídos por Abedini *et al.* (2022) e Gupta *et al.* (2022); no modo indireto, quando a tampa de vidro da cabine for coberta com material opaco, o agente de secagem sendo somente o ar aquecido no coletor; e no modo híbrido, ao combinar a convecção forçada de ar aquecido no coletor solar e o aquecimento IV para a secagem da biomassa.

A bandeja de malhas (10) foi posicionada na parte inferior da câmara. A bandeja tem capacidade para aproximadamente 400 g de biomassa, considerando a secagem em camada fina. Na parte traseira da cabine foi instalada uma porta para colocar o material ou realizar manutenções. A temperatura e a umidade dentro da câmara de secagem podem ser controladas a partir do controle de fluxo de ar úmido na saída, abrindo ou fechando dois orifícios (9) posicionados em cada lado do topo da câmara de secagem. Segundo Rahman (2017), orifícios totalmente abertos fazem com que o fluxo de ar aumente e a temperatura diminua, sendo importante durante os estágios iniciais da secagem dos alimentos, enquanto temperaturas mais altas (orifícios parcialmente fechados) são mais eficazes nos estágios posteriores da secagem.

3.1.2 Construção do equipamento

- *Coletor*

A estrutura do coletor, Figura 0.3 (a), foi feita com madeira do tipo compensado de espessura 15 mm, adquirida comercialmente. O revestimento externo foi de alumínio (espessura de 0,6 mm) e o interno foi de isopor coberto de alumínio, Figura 0.3 (b). O orifício na parte posterior do coletor foi feito com 10 cm de diâmetro para encaixe do cooler, como mostrado na Figura 0.4 , itens (a) e (b).



(a) (b)

Figura 0.3: Estrutura do coletor. (a) sem revestimento; (b) com revestimento interno.



(a) (b)

Figura 0.4: Parte posterior do coletor com orifício. (a) vista externa; (b) vista interna.

Devido à dificuldade de encontrar chapas de alumínio corrugadas, as corrugações da placa absorvedora foram construídas a partir de uma chapa de alumínio lisa, reaproveitada, como mostra a Figura 0.5 (a). A partir de um sistema simples de ripas de madeiras similar a uma alavanca, foi possível pressionar a chapa, causando as dobraduras no formato retangular com largura de 2 cm. As corrugações foram sequenciais e distanciadas entre si por aproximadamente 4 cm. A placa foi posicionada na parte central do coletor, apoiada nas laterais pela própria estrutura dobrada e no centro por um parafuso e uma porca, como mostrado na Figura 0.5 (b).



(a) (b)

Figura 0.5 : Placa absorvedora. (a) construção; (b) vista frontal.

A Figura 0.6 mostra o coletor com a placa absorvedora e a tampa de vidro posicionados. A placa absorvedora foi pintada com fundo preparador e depois com tinta spray preta de uso geral, para aumentar a absortividade da radiação. O vidro utilizado foi do tipo comum, reaproveitado a partir de placas de 4 mm. O seu recorte foi feito com cortador especial para vidros.



Figura 0.6: Visão superior do coletor com a placa absorvedora e a tampa de vidro.

- *Câmara de secagem*

A estrutura da câmara de secagem, mostrada na Figura 0.7, foi feita com madeira tipo compensado de virola com espessura de 15 mm, reaproveitado de outra estrutura que estava sem uso no laboratório. Foi utilizada uma serra Tico-tico para os cortes necessários na madeira, de acordo com as peças e tamanhos definidos no projeto. O orifício da parte frontal foi feito com 10 cm de diâmetro.



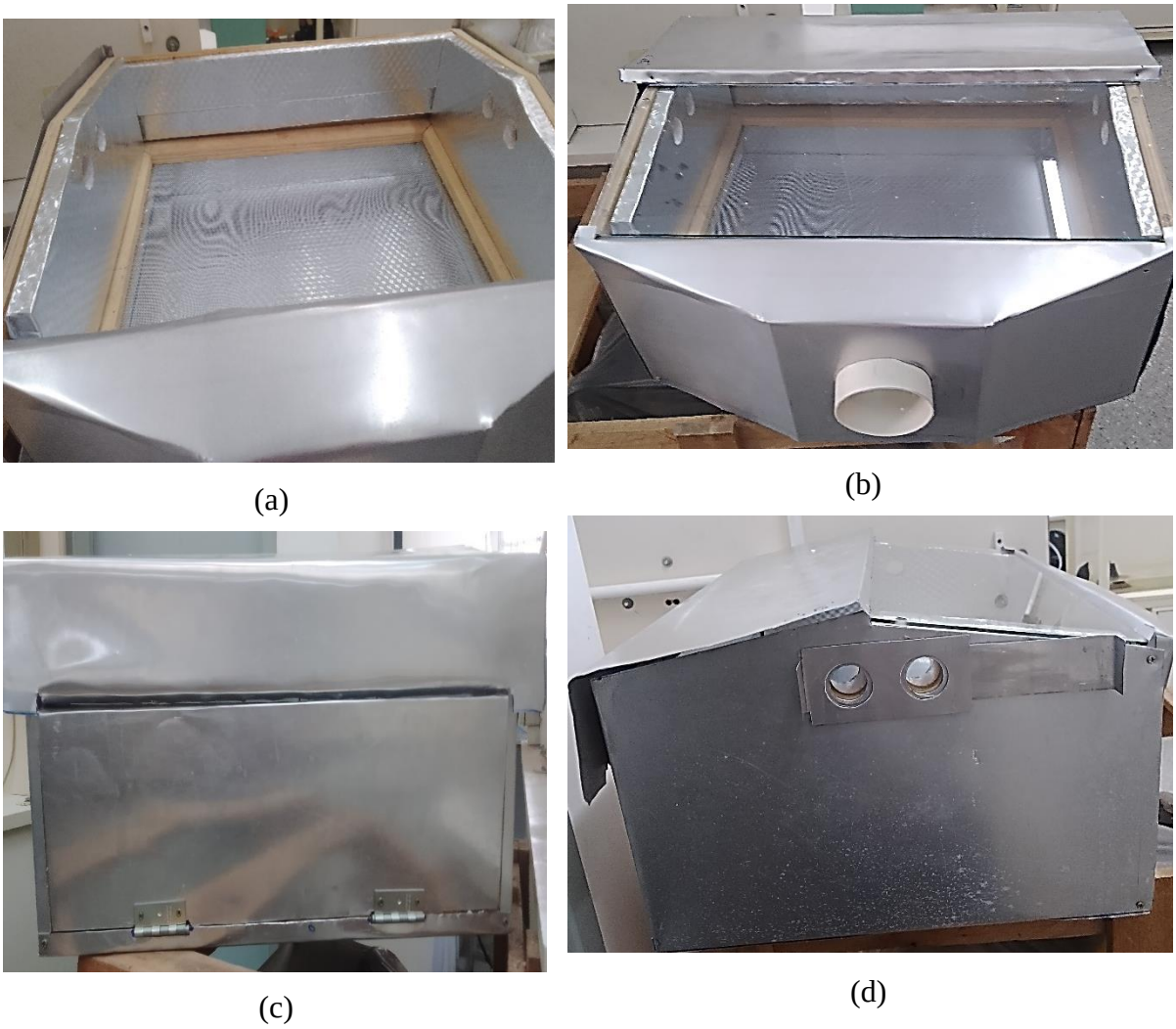
Figura 0.7: Estrutura de madeira da cabine de secagem.

Para revestir a cabine com material resistente a água e com maior durabilidade, foram utilizadas 4 placas de alumínio, reaproveitadas. O desenho em escala de todas as partes que deveriam ser cortadas foi feito em papel milimetrado para reaproveitar de forma eficiente as placas. As placas foram cortadas com tesoura própria para metal, dobradas e encaixadas na cabine (Figura 0.8).

O revestimento interno foi feito com placas de isopor de espessura de 2 e 1,5 cm. O isopor foi recoberto com uma película adesiva de alumínio para promover uma superfície reflexiva da radiação, e a bandeja foi construída com alumínio e tela de aço galvanizado com abertura de 1,5 mm, conforme pode ser visualizado na Figura 0.8 (a).

Assim como no coletor, o vidro utilizado na parte superior da cabine foi reaproveitado a partir de placas de 4 mm. No orifício da parte frontal foi acoplado um pedaço de tubo de plástico, Figura 0.8 (b), para auxiliar no encaixe do duto conector. Na parte traseira foi construída uma porta com dobradiças, Figura 0.8 (c), para manuseio interno da cabine. Nas duas laterais opostas foram abertos dois orifícios de 3 cm de diâmetro, cada, Figura 0.8 (d). Essa saída de ar pode está fechada ou aberta, de forma parcial ou total, ao deslizar o dispositivo

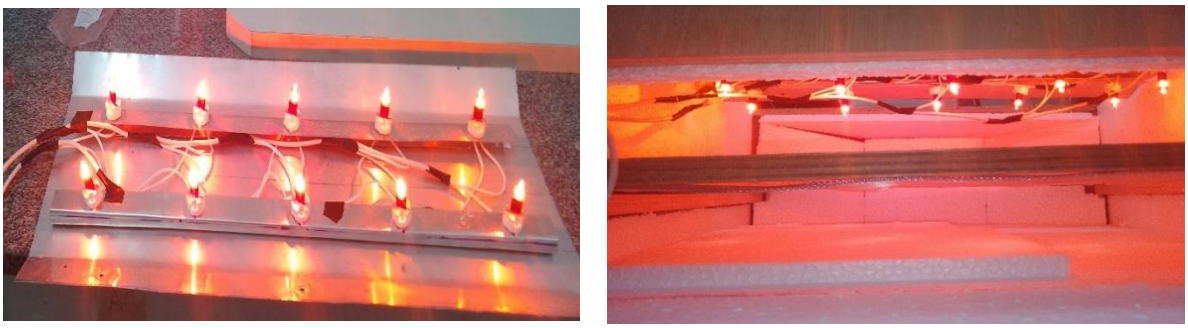
similar a uma pequena porta. Esse sistema também é encontrado em estufas de convecção forçada.



(a) (b) (c) (d)

Figura 0.8: Cabine de secagem. (a) visão interna; (b) visão frontal; (c) visão traseira; (d) visão lateral.

Foram utilizadas 10 lâmpadas infravermelho halógenas de corrente contínua, cada uma com 12 V, 10 W, modelo g4 e marca MILBLOON. Elas foram instaladas numa placa de alumínio, espaçadas entre si por uma distância de 10 cm, Figura 0.9 (a). Essa distância foi definida após testes prévios, para assegurar potência máxima entre as lâmpadas e a incidência de raios IV sobre toda a bandeja. Também foi considerada a razão menor que 1,2 entre a distância emissor-emissor e emissor-material, conforme sugerido por Das (2010). A chapa de alumínio atua como refletor para direcionar a radiação para baixo. As lâmpadas foram posicionadas na cabine numa altura de 10 cm em relação à bandeja, Figura 0.9 (b).



(a) (b)

Figura 0.9: Lâmpadas infravermelho. (a) fora da cabine; (b) dentro da cabine.

Um duto flexível de alumínio de 10 cm de diâmetro, Figura 0.10 (a), comumente utilizado em coifas, foi empregado como duto de conexão entre o coletor solar e a cabine de secagem. Para manter o isolamento térmico, o duto foi revestido com fibra de vidro, fixada com fita adesiva, como mostrado na Figura 0.10 (b).



(a) (b)

Figura 0.10: Tubo de conexão. (a) sem isolamento; (b) com isolamento.

- *Sistema de pesagem*

No decorrer da construção foi necessário testar diferentes estratégias de pesagem do material, a fim de definir qual forneceria dados mais coerentes.

Células de carga conectadas ao Arduino foram a primeira escolha, visando a pesagem contínua do material, eliminando a necessidade de sua retirada da câmara de secagem. Quatro células finas, cada uma com capacidade de 50 kg, foram instaladas no interior da câmara de secagem para realizar as medidas de massa da amostra durante o processo de remoção de umidade. No centro da célula há uma superfície sensível que faz a detecção da carga, sendo

composta de uma ponte resistiva que varia em função do peso da carga aplicada. Esse estímulo de peso gera um sinal baixo que é amplificado por um módulo HX711, de forma que a porta analógica da plataforma microcontrolada possa realizar a leitura. Para o bom funcionamento do sensor é necessário que a parte inferior da célula quando pressionada esteja livre. Assim, foi necessário construir uma estrutura por impressão 3D para encaixar perfeitamente as células e fixá-las numa superfície reta dentro da cabine, como mostrado nas Figura 0.11 eFigura 0.12.



Figura 0.11: Célula de carga em estrutura 3D.

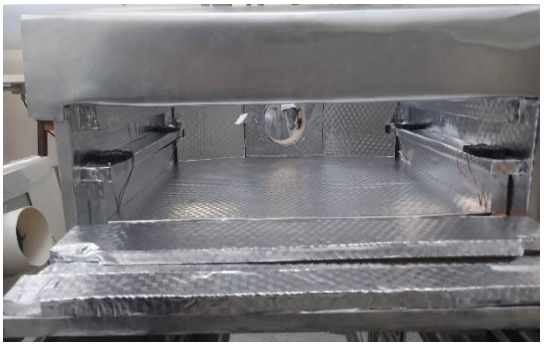


Figura 0.12: Célula de carga na cabine.

Os testes preliminares realizados em laboratório mostraram valores incoerentes de massa já na etapa de calibração, provavelmente porque a estrutura construída para suportar as células e a bandeja não promoveu a estabilidade necessária. Além disso, como a capacidade das células é alta, não houve tanta precisão para quantidades em massa relativamente pequenas.

A fim de eliminar a instabilidade da estrutura de pesagem e melhorar a precisão, testou-se uma balança digital de cozinha da marca Casa Flex. Essa balança possui uma célula de carga do tipo extensômetro de folhas, com capacidade de 10 kg (Figura 0.13). Nessa célula um lado é fixado na estrutura e outro lado detecta a carga através da deformação. Assim, é possível conectar ao Arduino, aproveitando a estrutura e os componentes eletrônicos da balança. Foi testada, inicialmente, a balança dentro da cabine, Figura 0.14 (a), mas resultados errôneos foram gerados, onde o peso final era menor que o real. Considerando que a temperatura e movimento do ar dentro da cabine pudesse interferir na pesagem, optou-se por colocar a balança fora da cabine, Figura 0.14 (b).

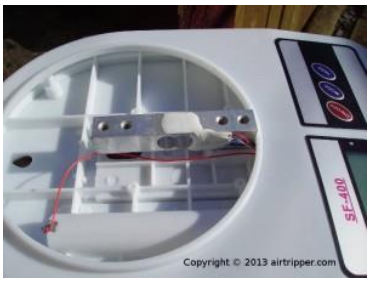


Figura 0.13: Célula de carga dentro da balança.

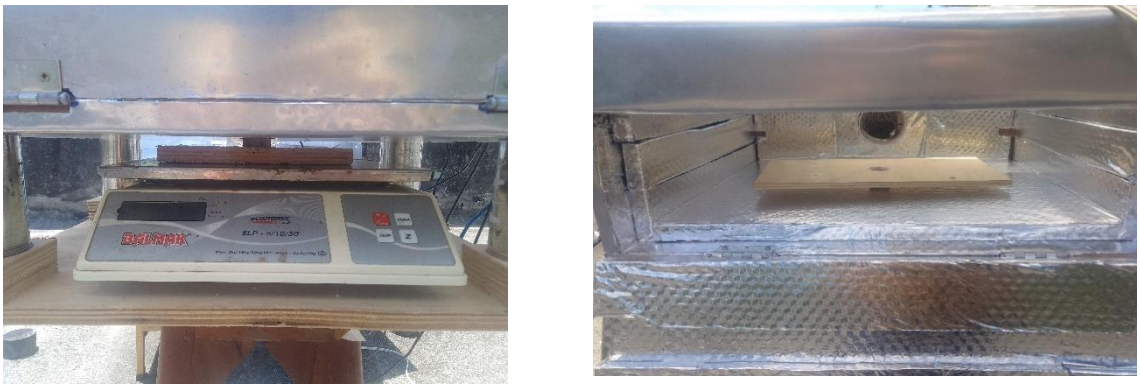


(a) (b)

Figura 0.14: Balança digital. (a) dentro da cabine; (b) fora da cabine.

Mesmo fora da cabine a balança de cozinha continuou gerando resultados incoerentes. Assim, decidiu-se utilizar uma balança maior para promover uma base mais firme e coletar os dados de outra forma. Uma balança pesadora digital (Marca Balmak, modelo ELP-6/15/30) foi posicionada externamente à cabine.

Foi construída uma estrutura de madeira que fica apoiada na balança, Figura 0.15 (a). Através de um furo na base da cabine um pedaço de tubo faz ligação entre a parte externa e a outra base de madeira na parte interna., como mostra a Figura 0.15 (b). Assim, a bandeja é colocada sobre essa base interna, sendo possível obter a massa do conjunto. Para armazenar os dados de massa durante todo experimento, foram tiradas fotos do display da balança com um celular, que por meio do aplicativo *Open Camera*, permitiu a execução de disparos a cada 1 min. Desta forma, foi possível gerar uma extensa quantidade de dados que representasse o comportamento cinético de secagem da biomassa.



(a) (b)

Figura 0.15: Sistema de pesagem. (a) parte externa da cabine; (b) parte interna da cabine.

3.1.3 Localização do equipamento

O secador construído foi posicionado em uma superfície alta, no terraço do prédio do "Laboratório de Tecnologias Alternativas" (LTA/CCET/UFS), localizado na UFS (Universidade Federal de Sergipe). A latitude exata do local é 10,926093° S e a longitude, 37,102927°. O coletor foi mantido voltado para o norte para absorver a máxima radiação solar e mantido em uma inclinação de 10^{o} considerando a latitude local. As Figura 0.16 Figura 0.17 mostram o secador já montado no local, bem como as indicações de orientação e inclinação.



Figura 0.16: Visão lateral do secador solar montado no local de operação.



(a) (b)

Figura 0.17: Imagens do secador solar. (a) visão frontal; (b) visão traseira.

A Tabela 0.1 apresenta os dados de irradiação média diária para Aracaju, segundo o CRESESB (Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito). Estão destacados em negrito os valores mínimo e máximo, correspondente ao mês que se inicia o inverno e verão, respectivamente.

Tabela 0.1: Irradiação solar diária média em função dos meses, para o plano horizontal, em Aracaju.

Mês	**Irradiação solar diária média [kwh/m^2.dia]**
Janeiro	6,39
Fevereiro	6,28
Março	6,07
Abril	5,07
Maio	4,34
Junho	**4,03**
Julho	4,13
Agosto	4,71
Setembro	5,46
Outubro	6,53
Novembro	6,36
Dezembro	**6,53**

(Fonte: Dados de CRESESB)

3.1.4 Instrumentação e sistema de aquisição de dados

A medição de variáveis/parâmetros como temperatura, umidade relativa, velocidade do ar, intensidade da radiação solar, temperatura e massa do material sólido, é de fundamental importância para o monitoramento do processo e para o levantamento da cinética de secagem, bem como para a análise de desempenho do equipamento, através do cálculo das eficiências do coletor solar e da secagem propriamente dita. Algumas dessas medidas foram automatizadas por um sistema de aquisição de dados do tipo Arduino.

Na Figura 0.18 é mostrada a placa do Arduíno Mega utilizada, bem como o esquema de ligações de todos os sensores automatizados.

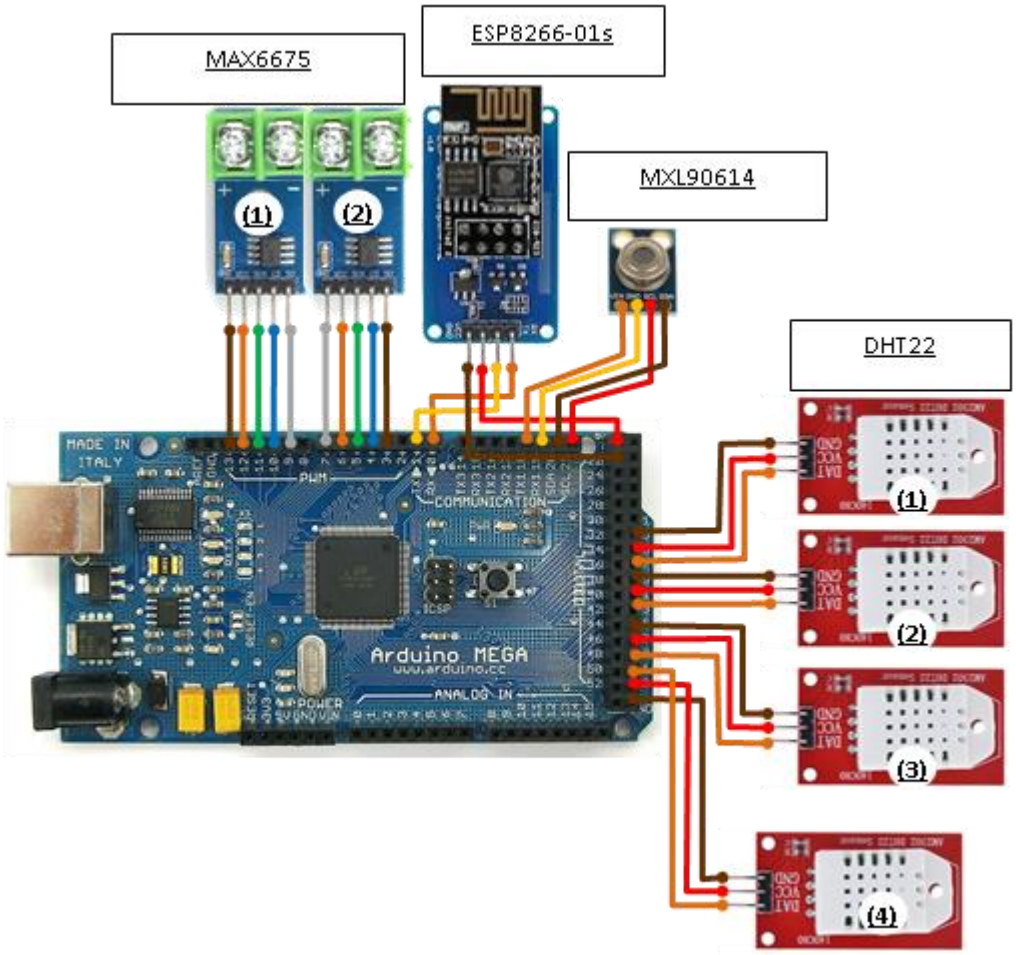


Figura 0.18: Esquema de ligação no Arduíno Mega dos sensores automatizados.

A Tabela 0.2 apresenta a descrição de cada componente presente na placa. Os sensores fornecem dados digitais continuamente ao Arduino que podem ser transmitidos a partir de uma

conexão USB com computador ou por WiFi, armazenando, assim, os dados coletados continuamente. Dentre as portas utilizadas (portas de saídas PWM, de comunicação serial e entradas digitais), todas foram configuradas como portas digital, e para cada sensor, definiu-se uma porta, GND (terra) e uma 5 V (alimentação), visto que as existentes não foram suficientes.

Tabela 0.2: Componentes da placa Arduino.

Componente	**Descrição**	**Posição no secador**	**Saída**
MAX6675 – 1	Módulo transmissor dos dados do termopar tipo K	Placa absorvedora	Tp
MAX6675 – 2	Módulo transmissor dos dados do termopar tipo K	Lâmpada IV	T_{IV}
MXL90614	Módulo leitor de temperatura infravermelho	Superficie da amostra	T_{bio}
DHT22 – 1	Termohigrometro	Entrada do coletor	UR_{1e}, T_{1e}
DHT22 – 2	Termohigrometro	Saída do coletor	UR_{1s}, T_{1s}
DHT22 – 3	Termohigrometro	Entrada da cabine	UR_{2e}, T_{2e}
DHT22 – 4	Termohigrometro	Saída da cabine	UR_{2s}, T_{2s}
ESP8266-01s	Módulo responsável pelo envio dos dados via WiFi		Todos os dados

Foram instalados 4 sensores termo higrômetros do tipo DHT22, na entrada (1) e saída (2) do coletor e também na entrada (3) e saída (4) da câmara de secagem. O sensor (4) foi especificamente colocado próximo a um dos orifícios de saída. Dois termopares do tipo K localizados na placa absorvedora (1) e em uma das lâmpadas infravermelho (2), para determinar a temperatura dessas superfícies. Esses termopares precisam de módulos transmissores de dados do tipo MAX6676 que foram conectados diretamente à placa do Arduino.

No topo da cabine foi instalado um sensor infravermelho MLX90614 direcionado para a bandeja no fundo da cabine, para medição da temperatura do material sem que haja necessidade de contato. Também foi utilizado um módulo de transmissão WiFi ESP8266 que permite a aquisição de todos os dados fornecidos pelos sensores conectados ao Arduino, sem fio.

O secador solar desenvolvido foi, então, aplicado para a secagem da entrecasca de mandioca, cuja metodologia experimental é descrita a seguir.

3.2 Metodologia experimental

3.2.1 Material

Neste trabalho foi utilizada a entrecasca (córtex) da mandioca (*Manihot esculenta*), como material de estudo, obtida a partir dos resíduos sólidos resultantes do processamento mínimo do tubérculo *in natur*a para venda por um pequeno comerciante de Nossa Senhora do Socorro, SE.

3.2.2 Preparo e caracterização física da biomassa

a) *Preparo*

Primeiramente, a casca e a entrecasca do resíduo fornecido (Figura 0.19) foram separadas manualmente, a fim de se trabalhar apenas com a entrecasca (Figura 0.20). Esta foi, na forma de lâminas, colocada em peneiras e lavada em água corrente para remover restos de solo e sujidades. Após a lavagem, o material foi disposto sobre panos secos, para remover o excesso de umidade superficial.



Figura 0.19 : Resíduo formado pela casca e entrecasca, antes do preparo.



Figura 0.20: Entrecasca, após separação e lavagem.

Em experimentos preliminares foi feita a secagem do material, mas as mesmas se deformaram durante o processo, com a geometria passando de plana para cilíndrica, com o produto ficando com formato de charuto, conforme mostrado na Figura 0.21.



Figura 0.21: Entrecascas secas.

Logo, optou-se por triturar a entrecasca. Para tanto, ela foi cortada em pedaços menores (Figura 3.22) e quantidades similares da biomassa foram trituradas em liquidificador comum, durante 15 segundos (Figura 0.23). Esse processo foi repetido até utilizar todo a biomassa disponível. O material logo após a trituração é mostrado na Figura 0.24.



Figura 0.22: Pedaços da entrecasca.

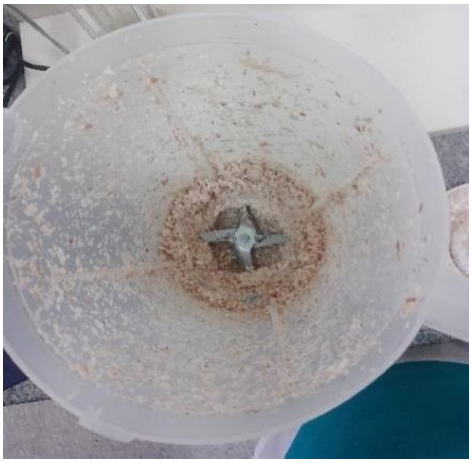


Figura 0.23: Entrecasca triturada no liquidificador.



Figura 0.24: Entrecasca triturada.

b) *Classificação granulométrica*

Após a trituração, foi determinada a distribuição dos tamanhos de partículas através da técnica de peneiramento, com agitação manual durante 20 min, utilizando um conjunto de peneiras padronizadas da BERTEL, cujas faixas de abertura, em mesh e em mm, bem como o diâmetro médio das partículas retidas, são apresentados na Tabela 0.3.

Tabela 0.3: Distribuição das peneiras utilizadas por mesh, abertura e diâmetro médio de partícula

Mesh	Faixa de abertura (mm)	Diâmetro médio de partícula (mm)
4 – 5	4,75 > x > 4,00	4,375
5 – 7	4,00 > x > 2,80	3,400
7 – 8	2,80 > x > 2,36	2,580
8 – 9	2,36 > x > 2,00	2,180
Fundo	x < 2,00	-

As peneiras foram dispostas na ordem crescente de mesh e, consequentemente, por ordem decrescente de abertura, criando diferentes faixas de diâmetros, onde as partículas mais grossas ficam retidas na primeira peneira e as mais finas no fundo. A quantidade de peneiras foi determinada após testes, de forma que representasse todo conjunto de partículas. Após cada batelada de peneiramento foi necessário triturar novamente o material da primeira peneira, pois era formado de partículas não uniformes e aglomerados, como mostra a Figura 0.25.



Figura 0.25: Partículas de diâmetro médio de 4,375 mm, retidas na peneira de mesh 5.

Após o peneiramento o material foi acondicionado em sacos plásticos herméticos e armazenado em congelador. Nos dias de experimento, a biomassa era colocada para descongelar, à temperatura ambiente, sobre um pano, a fim de evitar o acúmulo de água dentro dos sacos.

c) Teor de umidade

O teor de umidade inicial da biomassa, em base úmida, foi determinado em triplicata, utilizando um analisador de umidade (Marca Shimadzu, modelo MOC-120H, capacidade de 120 g, precisão de 0,001g).

3.2.3 Experimentos de secagem

Foram conduzidos 6 ensaios de secagem, nas condições listadas na

Tabela 0.4.

Tabela 0.4: Condições operacionais dos ensaios de secagem.

Ensaio	Data	Clima	Radiação IV	Velocidade do ar (m/s)	Modo de secagem	Condição
E1	19/04	Parcialmente nublado	Não	3,7	Ativa e indireta	Porta da cabine fechada, orifícios abertos
E2	25/03	Ensolarado	Não	3,7		
E3	11/06	Parcialmente nublado	Não	3,7	Ativa e indireta	Porta da cabine aberta e orifícios fechados
E4	03/07	Parcialmente nublado	Não	1,3		
E5	04/07	Parcialmente nublado	Sim P_{IV} =50 W	3,7	Ativa, indireta e híbrida	Porta da cabine aberta e orifícios fechados
E6	13/07	Parcialmente nublado	Sim P_{IV} =50 W	1,3		

Todos foram realizados com convecção forçada de ar e com a tampa de vidro da cabine coberta, a fim de investigar os modos de secagem ativa e indireta, e ativa, indireta e híbrida. Os

ensaios iniciaram pela manhã, por volta das 10 h, e finalizaram à tarde, após as 14 h. Alterações nos horários de início e término dos ensaios ocorreram em alguns casos devido à precipitação pluviométrica que, ou atrasou o início, ou adiantou o término.

Os dois primeiros experimentos foram realizados para verificar a influência das condições climáticas. E os últimos quatro, para avaliar os efeitos da velocidade do ar e do uso da radiação eletromagnética na região do infravermelho como energia suplementar à energia solar. As condições adotadas para as velocidades máxima e mínima do ar foram impostas pelo limite operacional do *cooler.* A decisão de abrir a porta da cabine e fechar os orifícios, para os 4 últimos ensaios, foram devido a problemas encontrados durante os primeiros experimentos que serão detalhados no próximo capítulo, de Resultados e Discussão. Em relação a potência da lâmpada infravermelho, foi definido um valor máximo total de 50 W para evitar super aquecimento da fiação, visto que cada lâmpada IV era de corrente contínua e tensão baixa de 12 V, o que demandava alta corrente para atingir o valor nominal máximo total de 100 W.

Em cada ensaio, o cooler e os sensores do equipamento foram acionados e permaneceram funcionando por 30 min sem alimentação do material. Inicialmente, a estrutura de pesagem com a bandeja foi tarada. Em seguida, a biomassa foi disposta sobre a bandeja em camada fina, cuja espessura foi medida em diferentes posições com um paquímetro digital (Digimess, precisão de 0,01 mm), resultando em um valor médio de 7 mm. Após colocar a bandeja dentro da cabine, iniciou-se a coleta de dados de massa a cada 1 min durante todo o ensaio, por meio da aquisição de imagens, via celular, do display da balança (Balmak, modelo ELP-6/15/30) utilizando o aplicativo *Open Camera*. Depois, esses valores foram inseridos em planilhas.

Enquanto isso a placa do Arduino já estava coletando dados, continuamente, de todos os sensores. Estes foram enviados por WI-FI a um computador conectado a um modem e armazenados em planilhas. Os dados coletados foram temperaturas e umidades relativas do ar, na entrada (T_{1e}, UR_{1e}) e saída (T_{1e}, UR_{1s}) do coletor e também na entrada (T_{2e}, UR_{2e}) e saída (T_{2s}, UR_{2s}) da câmara de secagem; temperatura da placa (T_p); temperatura da biomassa (T_{bio}). O sensor de temperatura da biomassa também gerava um dado referente a posição na qual foi instalado, que foi considerado como a temperatura ambiente (T_{amb}) da cabine de secagem. Apesar de nos ensaios de secagem ativa e indireta, a fonte de radiação infravermelho estar desligada, foram registrados dados de temperatura superficial das lâmpadas (T_{IV}).

A intensidade de radiação solar instantânea foi medida manualmente a cada 20 min, utilizando um solarímetro (KIMO, modelo SL-100 da) posicionado sobre a placa absorvedora.

Um pirômetro óptico digital (Wincat, modelo WT319A), foi também empregado para medir a temperatura da placa absorvedora, no mesmo ponto em que estava o termopar tipo K, para fins de comparação. Um anemômetro digital (Instrutherm, modelo AD-250, precisão de 0,1 m/s) foi utilizado para medir a velocidade na entrada da cabine no início do experimento, em três posições da secção transversal do duto. Não foi possível realizar medidas durante o processo, porque a bandeja contendo a biomassa, impedia o posicionamento do anemômetro.

O teor de umidade final da entrecasca de mandioca foi determinado pelo método direto da estufa a $(105 \pm 3)^{o}C$ por 24 horas. Esta determinação foi feita em amostras de biomassa extraídas de três regiões diferentes da bandeja de secagem, a fim de verificar a homogeneidade do produto em termos de umidade.

As especificações dos instrumentos e sensores utilizados para medir e monitorar as variáveis do processo são listados na Tabela 3.5.

Tabela 0.5: Especificações dos instrumentos e sensores.

Instrumentos e sensores	**Marca** / **Modelo**	**Intervalo de medida**	**Erro**
4 sensores de umidade e temperatura DHT22	Keyes AM2302	0-100% -40-80°C	± 2-5 % RH ± 0,5°C
2 Termopar	Advanced Tech Tipo K	0-600 °C	± 0,05°C
2 módulos transmissores tipo	Advanced Tech MAX6675	0-800°C	± 1,5°C
2 sensores de temperatura infravermelho	GY-906 MLX90614ESF-BAA	-40 -125°C (Temp de operação) -70-380°C (Temp do objeto	± 0,5°C (Temp de operação) ± 0,1°C (Temp do objeto)
1 Placa arduíno	AITEXM ROBOT MEGA2560		
1 Módulo Wifi	ESP8266-01s	2,4 -2,5 GHz	
Anemômetro digital	Instrutherm AD-250	0,4-30 m/s	± 3% da escala completa
Pirômetro digital	Wincat WT319A	50-400°C	± 1,5°C
Solarímetro	Kimo SL-100	1-1300 w/m^2	± 5%
Paquimetro digital	Digimess 100.171	0-200mm	± 0,03 mm
Analisador de umidade	Shimadzu MOC-120H	0,5-120g	±0,001g
Balança	Balmak,	0,002-30 kg	± 0,002kg

3.2.4 Análise da cinética de secagem

As cinéticas de secagem da entrecasca de mandioca, nos diferentes modos de operação do secador solar desenvolvido, foram analisadas e comparadas com base nas curvas de adimensional de umidade, taxa de secagem e temperatura superficial da biomassa em função do tempo.

Os dados de teor de umidade foram convertidos em valores do adimensional de umidade (XR), a partir da razão entre o teor de umidade em base seca do material em um dado tempo, X(t), e o teor de umidade inicial (X_0). A taxa de secagem (-dX/dt) foi calculada via derivação numérica dos dados de teor de umidade (X) em função do tempo, utilizando o software OriginPro8®.

3.2.5 Avaliação da performance do secador solar

Inicialmente, foram construídas as curvas de intensidade de radiação solar ao longo do dia. Também, foram plotadas as curvas de umidades relativa e temperatura do ar para cada ponto de medida no equipamento, em função do tempo, para monitorar e analisar o comportamento do secador nos diferentes modos de operação.

Para avaliar o desempenho do equipamento foram determinadas as eficiências térmicas do coletor e do processo de secagem propriamente dito.

Segundo Goud *et al* (2019), o coletor converte a radiação solar incidente em energia térmica que é utilizada para aquecer o ar por convecção, o qual é direcionado à câmara para secar o material. Essa energia térmica convertida, ou seja, a quantidade de calor disponível fornecida pelo coletor (q_a) para a secagem é dada por:

$$q_a = \dot{m}_{ar} C_{P,ar} (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

onde $C_{P,ar}$ é o calor específico do ar (kJ/kg K), T_{in} e T_{out} são a temperatura do ar na entrada e saída do coletor (°C), $\dot{m}_{ar}$ é a vazão mássica de ar (kg/s).

A vazão mássica de ar foi determinada através do produto da velocidade e densidade do ar e a área transversal do duto.

$$\dot{m}_{ar} = \rho_{ar} A_{duto} v_{ar,med} \quad (2)$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg/m^3), A_{duto} é a área da secção transversal do duto flexível (m^2) e $v_{ar,med}$ é a velocidade média do ar no duto (m/s).

A eficiência térmica do coletor (η_{col}) representa a razão entre a taxa de energia térmica útil fornecida pelo coletor (q_a) e a taxa de energia solar (q_{solar}) incidente sobre ele, sendo expressa pela equação (GILAGO E CHANDRAMOHAN, 2022):

$$\eta_{col} = \frac{q_{a,útil}}{q_{solar}} = \frac{\dot{m}_{ar} C_{P,ar} (T_{out} - T_{in})}{A_C \, IR} \quad (3)$$

onde A_C é a área da placa absorvedora ou área total onde a radiação solar incide (m^2), e IR é o fluxo de energia solar instantânea (W/m^2).

Em relação à secagem do material dentro da cabine, a quantidade de calor necessária para a evaporação da umidade (Q_e) foi calculada conforme Goud *et al* (2019):

$$Q_e = Q_{LH} \, m_w \quad (4)$$

onde Q_{LH} é o calor latente de vaporização da água (kJ/kg), m_w é a massa de água evaporada (kg)

A eficiência térmica de secagem do secador solar hibrido foi calculada ao efetuar a razão entre a energia necessária para evaporar a umidade (Q_e) e o somatório de toda energia fornecida (Q_{total}), proveniente da incidência de radiação solar no coletor para aquecimento do ar, do ventilador para o escoamento forçado do ar e da fonte de radiação infravermelho para o aquecimento direto da biomassa na cabine de secagem (ABEDINI *et al.*, 2022; MIRZAEI, 2021):

$$\eta_{sec} = \frac{Q_{e,útil}}{Q_{total}} = \frac{Q_{LH} \, m_w}{(\eta_{col} A_C \, IR + P_{vent} + P_{IV}) \cdot t} \quad (5)$$

onde A_C é a área da superfície do coletor exposta à radiação solar (m^2); IR é a intensidade de radiação solar (W/m^2) capturada pelo coletor; P_{IV} e P_{vent} são as potências (W) consumidas pela fonte de radiação infravermelho e pelo ventilador, respectivamente; t é o tempo de secagem, em *s*.

É importante notar que o primeiro termo do denominador representa e energia do coletor que foi efetivamente utilizada para aquecer o ar, após possíveis perdas, e que corresponde a q_a . O segundo e terceiro termos representam, respectivamente, a energia requerida para o escoamento forçado de ar no coletor e na cabine de secagem, e a energia auxiliar proveniente da fonte radiação infravermelho.

O consumo de energia das lâmpadas infravermelhas (P_{IV}) foi calculado pelo produto entre a corrente e a tensão, fornecidas pela fonte de alimentação. O consumo do ventilador (P_{vent}) foi calculado de forma análoga em diferentes velocidades médias do ar (v_{ar}) e expresso através da seguinte equação de regressão obtida:

$$P_{vent} = 1{,}6579v_{ar}^2 - 5{,}0035v_{ar} + 4{,}7156 \quad (6)$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo abrange os resultados e discussão acerca da caracterização física das partículas de casca de mandioca, da performance do secador e da cinética da secagem da biomassa. A dependência das variáveis do processo com as condições climáticas é avaliada com base nos resultados dos ensaios E1 e E2. A partir dos resultados obtidos nos ensaios E3, E4, E5 e E6, é feita a análise da influência da velocidade do ar e da radiação infravermelha sobre a cinética de secagem e desempenho do secador através das eficiências do coletor e do processo de secagem. Ao final, são avaliados o modo e a condição operacional de secagem mais adequados para uma melhor performance do secador solar construído. A metodologia de cálculo e os dados utilizados no cômputo das eficiências são apresentados no Apêndice A. Os dados estão dispostos nas Tabelas A1 à A4 que correspondem, respectivamente, aos ensaios E3 a E6.

4.1 Caracterização física da biomassa

Na

Tabela 0.1 são apresentados os resultados da análise granulométrica das partículas de entrecasca de mandioca.

Tabela 0.1: Distribuição granulométrica das partículas de entrecasca.

Mesh	Diâmetro médio (mm)	Massa retida (g)	Fração mássica (%)
4 - 5	4,375	422	20
5 - 7	3,400	880	41
7 - 8	2,580	646	30
8 - 9	2,180	142	7
Fundo	-	38	2

Total	-	2128	100

Verifica-se que a entrecasca de mandioca cominuída foi caracterizada por uma maior presença de partículas com diâmetros médios de 4,375; 3,40 e 2,58 mm, cujas frações mássicas correspondentes foram de 20, 41 e 30%, respectivamente. No entanto, as partículas retidas na peneira de mesh 5 não tinham tamanhos uniformes e algumas formaram aglomerados. Assim, optou-se por trabalhar com a mistura contendo as partículas de 3,40; 2;58 e 2,18 mm, numa proporção de 3:1:1 que, em fração mássica, corresponde a 60%, 20% e 20%. Esta proporção foi definida visando aproveitar a máxima quantidade de material disponível.

Após todo o preparo, incluindo trituração e peneiramento, a entrecasca apresentou um teor de umidade médio de (70,5 ± 2,6)% b.u. Valor este que está entre aqueles reportados pela Embrapa (2015), especificamente para a entrecasca, de 65,6% b.u, e por Souto *et al.* (2017), para a umidade da mistura de casca e entrecasca, de 75,5% b.u. preparo da biomassa foi completamente removida a casca marrom, A pequena diferença em relação ao dado da Embrapa, em que a casca marrom foi também completamente removida no preparo da biomassa, pode ser atribuída à forma de preparo, ao armazenamento ou à safra da mandioca.

4.2Performance do secador

4.2.1 Testes preliminares em condições climáticas distintas

A secagem solar é extremamente dependente das condições climáticas, que são diferentes em cada estação do ano, o que vai influenciar a umidade e a temperatura do ar ambiente e a irradiação solar. Portanto, para analisar os dados é necessário observar todos esses fatores externos que podem variar bruscamente durante o dia e não podem ser controlados.

Deste modo, os testes preliminares com o secador construído foram conduzidos em dias com condições climáticas distintas. No Ensaio 1 (E1) o dia estava parcialmente nublado, enquanto no Ensaio 2 (E2) estava ensolarado. A velocidade do ar foi fixada em 3,7 m/s e as lâmpadas IV não foram acionadas, tal que o modo de secagem foi o ativo indireto. Ademais, a porta da cabine foi mantida fechada durante os dois experimentos, com a saída de ar ocorrendo apenas através dos orifícios das paredes laterais da câmara de secagem.

Na Figura 0.1 são apresentados os dados de irradiação solar (IR), obtidos manualmente a cada 20 min, e temperatura da placa (T_p), coletados continuamente, para o Ensaio E1, com secagem solar indireta com escoamento forçado de ar a uma velocidade média (v_{ar}) de 3,7 m/s. O experimento foi realizado no dia 19/04/24 e durou 6 h (360 min), iniciando-se às 09:50 e finalizando às 15:50. Tempo este definido para mapear o comportamento do secador até um mínimo valor de irradiação viável à secagem

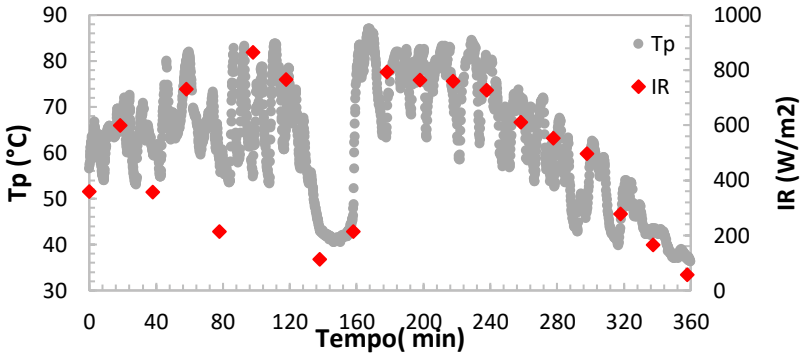
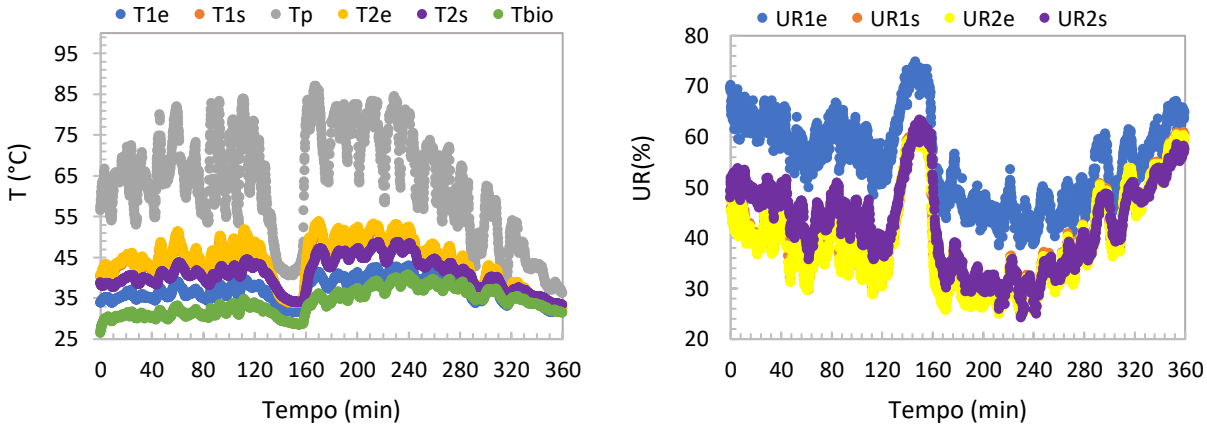


Figura 0.1: Intensidade de irradiação solar (IR) e temperatura da placa (T_p) em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E1.

No dia do experimento, a previsão do tempo indicou um dia parcialmente nublado. Pode ser notado que pela manhã houve um comportamento oscilatório da irradiação solar, com sua intensidade atingindo um valor mínimo de 112 W/m^2 próximo ao meio dia, entre 120 e 140 min. Isso foi devido à presença de nuvens que cobriram parcialmente ou totalmente o sol em alguns momentos pela manhã. Entre 180 e 240 min (12:50 h – 13:50 h), a irradiação apresentou um comportamento mais estável, variando entre 700 e 800 W/m^2. Já à tarde, apesar do céu ter ficado mais limpo, com o passar do tempo houve a diminuição da irradiação devido ao movimento do sol. A irradiação máxima foi 864,5 W/m^2 e a mínima foi 56,0 W/m^2, às 11:30 h e 15:50 h, respectivamente.

A evolução da temperatura da placa (T_p), Figura 0.1, segue o comportamento da irradiação, visto que a placa é aquecida pelo sol. Como o ar é aquecido ao escoar sobre a placa antes de entrar na cabine de secagem, então todas as variáveis medidas no secador serão influenciadas pela irradiação solar. A placa atingiu uma temperatura máxima de 87 °C às 12:40 h (170 min), aproximadamente. Como os dados de T_p são medidos continuamente é possível acompanhar seu comportamento a cada segundo, diferente da irradiação. Então, pela tendência observada é possível que IR seja máxima nesse tempo, com um valor entre 900 e 950 W/m^2.

A Figura 0.2 (a) apresenta os dados de temperatura: do ar na entrada (T_{1e}) e saída (T_{1s}) do coletor, da placa (T_p), do ar na entrada (T_{2e}) e saída (T_{2s}) da cabine, da biomassa (T_{bio}). A Figura 0.2 (b) apresenta as umidades relativas do ar: na entrada (UR_{1e}) e saída (UR_{1s}) do coletor, na entrada (UR_{2e}) e saída (UR_{2s}) da cabine.



(a) (b)

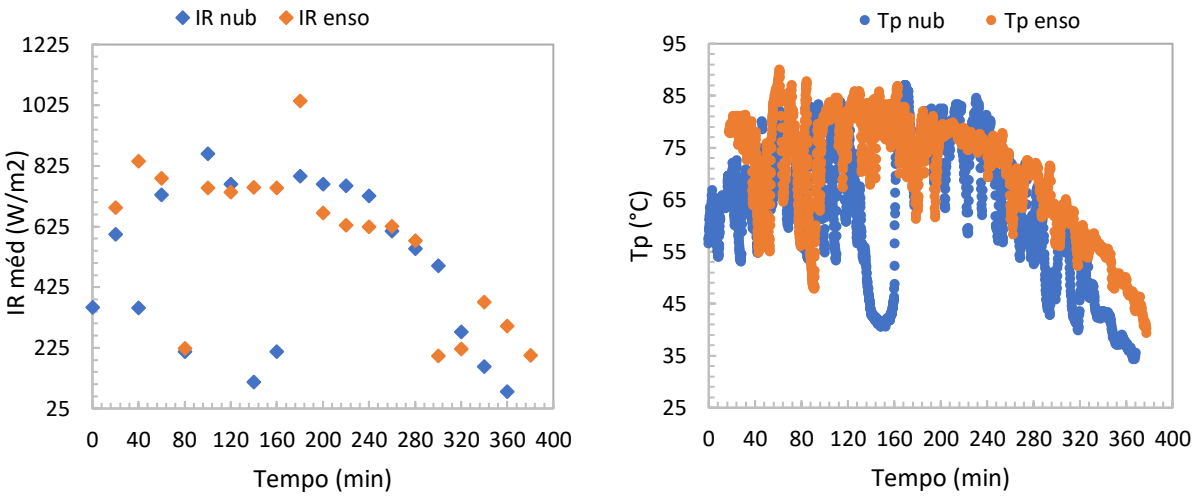
Figura 0.2: Variáveis características do secador em função do tempo, durante o Ensaio E1 (dia nublado). (a) Temperaturas da placa, do ar e da biomassa; (b) umidade relativa do ar.

Como esperado, as variáveis mostradas nas Figura 0.2 (a) e (b) seguem o comportamento da irradiação, com as temperaturas (da placa, do ar e da biomassa) atingindo valores mínimos e, por consequência, as umidades relativas do ar em diferentes posições do secador seus valores máximos, entre 120 e 140 min. A partir da Figura 0.2 (a) verifica-se que a biomassa já é introduzida na cabine com uma temperatura baixa (26,4°C) e ao longo do processo continua apresentando os menores valores. Após T_{bio}, T_{1e} é a menor temperatura e T_p é a maior, durante todo o experimento.

Observa-se que o ar entra no coletor com temperatura ambiente (T_{1e}) e é aquecido ao escoar sobre a placa, logo $T_{1s} > T_{1e}$. O ventilador exerceu, portanto, seu papel de promover a transferência de calor por convecção forçada entre a placa e o ar (GILAGO E CHANDRAMOHAN, 2022). O ar, então, perde umidade, de modo que $UR_{1e} > UR_{1s}$, Figura 0.2 (b), o que aumenta sua capacidade de remoção de umidade do material, posteriormente, na cabine. Depois, ao passar pelo duto, a temperatura e a umidade relativa do ar permanecem aproximadamente iguais ($T_{1s} = T_{2e}$ e $UR_{1s} = UR_{2e}$), conforme mostrado pela sobreposição das curvas em laranja e amarelo. Isso indica que não há perda de calor no duto. Ao entrar na cabine

(T_{2e}), o ar quente transfere calor para a biomassa, o que provoca seu resfriamento e, portanto, $T_{2e} > T_{2s}$, e remove umidade do material, de modo que na saída da cabine $UR_{2e} < UR_{2S}$, conforme mostrado na Figura 0.2 (b).

Como comentado anteriormente, a secagem solar depende predominantemente de fatores externos. Assim, um dia ensolarado ou nublado irá afetar os resultados, mesmo que as outras variáveis controláveis permaneçam constantes. Nas Figura 0.3 aFigura 0.5 é feita uma comparação entre os resultados do experimento anterior (E1), cujo tempo foi parcialmente nublado, e de um experimento, cujo dia foi majoritariamente ensolarado (E2). Os dois ensaios foram realizados na condição de secagem solar indireta com convecção forçada (v_{ar} = 3,7 m/s) e tiveram duração de 6 h. Para o ensaio nublado (curvas em laranja), 0 min se refere ao início, às 09:50 h, e 360 min, ao final, às 15:50 h. Enquanto que para o ensaio ensolarado (curvas em azul), 20 min se refere ao início, às 10:10 h e 380 min, ao fim às 16:10 h.



(a) (b)

Figura 0.3: Comportamento de variáveis características do secador durante os Ensaios E1 e E2. (a) Intensidade de radiação, IR ; (b) Temperatura da placa, Tp.

Da Figura 0.3 (a), observa-se que no dia ensolarado as maiores intensidades de radiação solar ocorreram principalmente pela manhã, atingindo um máximo de 1040 W/m^2 às 12:50 h (160 min), e voltando a serem maiores após às 15:10 h. Isso é refletido no comportamento da temperatura da placa ($T_{p,enso}$), Figura 4.3 (b), que apesar da grande oscilação, apresenta valores mais altos, principalmente no período em que a temperatura da placa no dia nublado ($T_{p,nub}$) cai, entre 120 e 140 min.

Dessa forma, é possível observar na Figura 0.4 (a), (b), (c) e (d) que , respectivamente, as temperaturas: de entrada (T_{1e}) e saída (T_{1s}) do coletor; de saída da cabine (T_{2s}) e da biomassa (T_{bio}) no dia ensolarado, permaneceram mais altas na maior parte do tempo que aquelas no dia nublado. Como a temperatura de entrada da cabine (T_{2e}) foi aproximadamente igual a da saída do coletor (T_{1s}), optou-se por não apresentá-la.

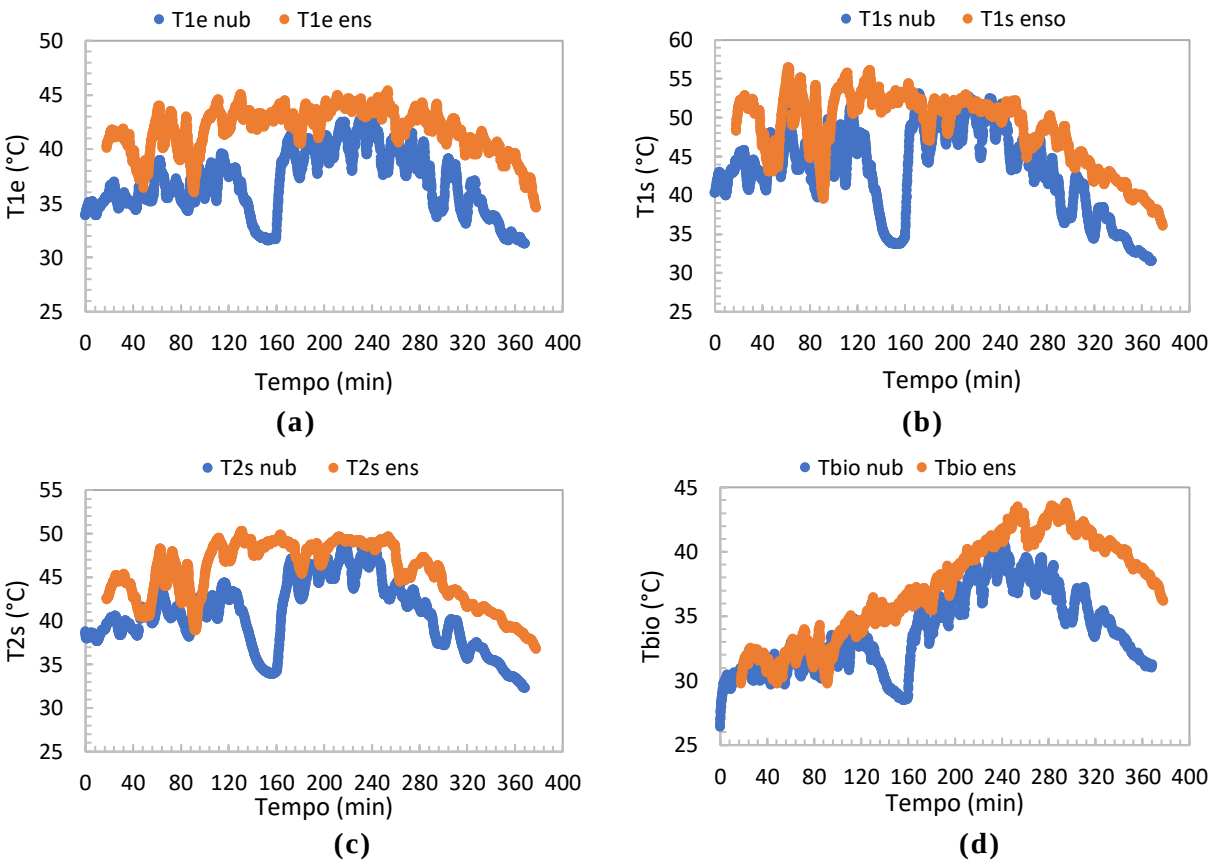


Figura 0.4 : Curvas características de temperatura em função do tempo, durante os Ensaios E1 e E2. (a)T_{1e}; (b) T_{1s}; (c) T_{2s}; (d) T_{bio}.

A evolução temporal das umidades relativas do ar ao longo do secador, mostrada na Figura 0.5 (a), (b) e (c), é inversamente proporcional àquela das respectivas temperaturas, de forma que no dia nublado maiores valores foram observados durante todo o processo, com um pico entre 120 e 140 min, período em que as temperaturas passaram por um vale, Figura 0.4 (a).

Segundo Vijayan *et al*. (2017), a umidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de água em forma de vapor que existe no ar e a quantidade máxima que poderia existir na mesma temperatura. Ela é, portanto, uma medida de quão próximo o ar está do ponto de

saturação, quando não pode mais conter água. Como a pressão de saturação aumenta com o aumento da temperatura, a umidade relativa do ar é inversamente proporcional à sua temperatura.

Nota-se na Figura 0.5 (a) que no dia nublado a umidade relativa do ar ambiente na entrada do coletor ($UR_{1e,nub}$) já é muito mais alta, em torno de 70 %, frente àquela do dia ensolarado ($UR_{1e,enso}$) de 50%. Na Figura 0.5 (b) verifica-se que ao passar pelo coletor o ar perde umidade, com $UR_{1s,nub}$ = 48%, e $UR_{1S,ens}$ = 33%, na entrada do secador. Mas mesmo assim $UR_{1s,nub}$ permanece maior que $UR_{1S,ens.}$ Isto faz com que o potencial de secagem do ar no dia nublado seja menor, pois ao chegar na cabine com uma pressão parcial de vapor d'água mais alta, menor é a força motriz para a transferência de massa.

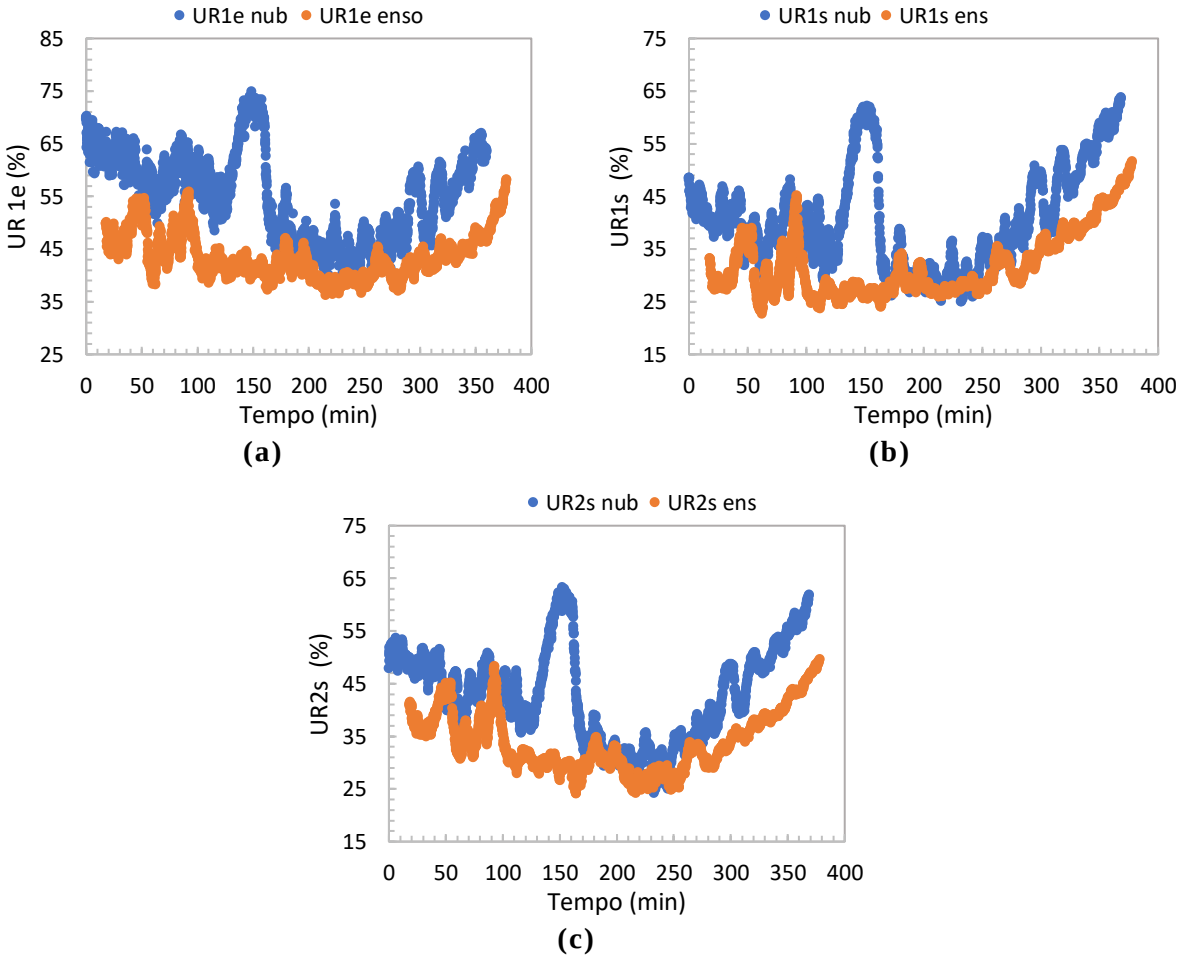


Figura 0.5: Evolução temporal da umidade relativa do ar ao longo do secador solar, durante os Ensaios E1 e E2. (a) UR_{1e}; (b) UR_{1s}; (c) UR_{2s}.

Após o ensaio de secagem E1, a biomassa em uma das regiões da bandeja apresentou uma aparência mais úmida, como mostrado na Figura 0.6. Pode ser observado que a região 1 é um pouco mais escura, sendo esta região referente ao lado esquerdo da cabine, considerando que o observador está em frente a ela. A umidade inicial média da biomassa foi de 71,5% b.u. Os teores de umidade final de três amostras de biomassa coletadas das regiões 1, 2 e 3 (Figura 4.6) foram de 42,4%; 10,2% e 13,5%, respectivamente. O produto obtido mostrou-se, portanto, não homogêneo em termos de umidade, com a biomassa da região 1 não atingindo a faixa alvo de umidade, de 10 a 15% b.u., recomendada para um armazenamento seguro ou para aplicação em operações subsequentes, como as de conversão termoquímica ou extração de amido.

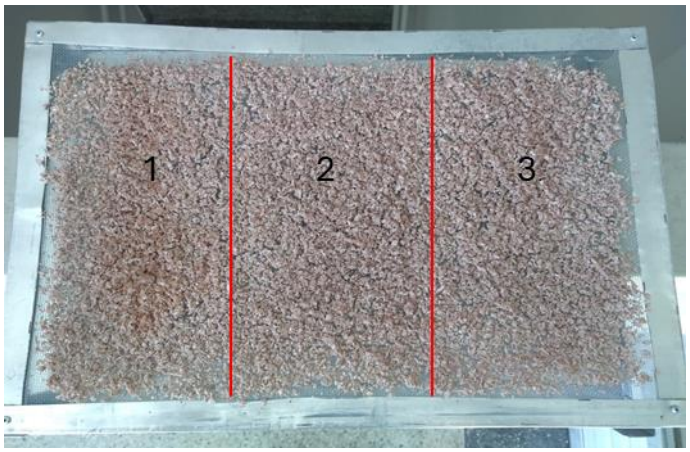


Figura 0.6: Biomassa seca obtida do Ensaio E1.

A fim de verificar o motivo dessa não homogeneidade foi feito um mapeamento das velocidades ar. Um anemômetro foi posicionado, em diferentes partes da bandeja vazia, nas mesmas condições do ensaio E1: porta da cabine fechada, orifícios abertos, velocidade média medida no orifício igual 3,7 m/s. Os valores obtidos são mostrados na Figura 0.7. Nos pontos indicados como “X” não foi possível realizas as medidas devido à dificuldade de posicionar o anemômetro. Nas laterais esquerda e direita a velocidade tende a 0 m/s. Na região central, a velocidade é máxima, 2,5 m/s, próximo à entrada de ar e vai diminuindo até 1,6 m/s, próximo a porta. Assim, constata-se que o fluxo de ar não estava bem distribuído. Na tentativa de melhorar a distribuição do ar, foi realizado um ensaio com a porta aberta e os orifícios fechados, mas um comportamento similar foi observado.

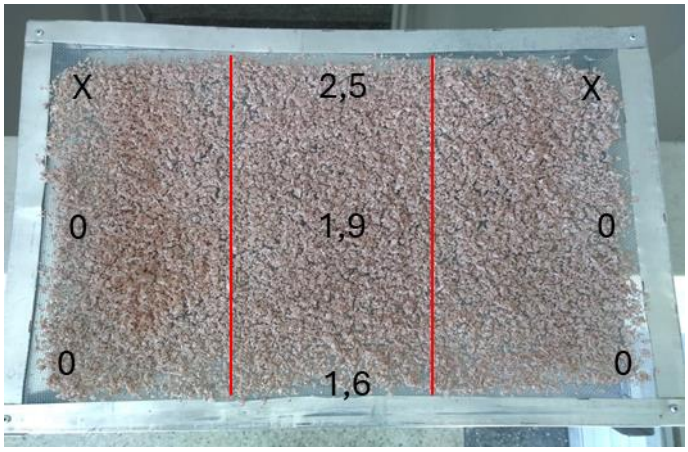


Figura 0.7: Velocidade do ar (m/s) em diferentes posições da bandeja.

Além desse ponto, no tratamento dos dados de massa observou-se que houve flutuações dos valores, os quais aumentavam e diminuíam subitamente. Deste modo, com base em um teste preliminar onde abrir a porta da cabine modificou o comportamento da massa, optou-se por fazer um teste com a porta da cabine aberta e os orifícios de saída fechados. Além disso, colocou-se material somente na região central para verificar, também, se a secagem seria homogênea.

O Ensaio E3, nas condições definidas acima, foi realizado no dia 11/06/24, dia parcialmente nublado. As Figura 0.8 e 4.9 mostram como o material foi disposto na bandeja.



Figura 0.8: Bandeja com material centralizado, dentro da cabine.

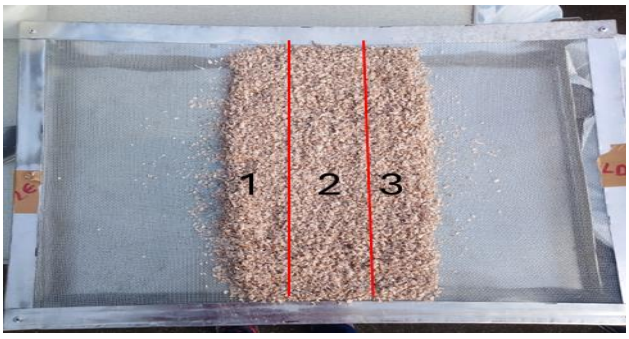


Figura 0.9: Material concentrado na região central da bandeja.

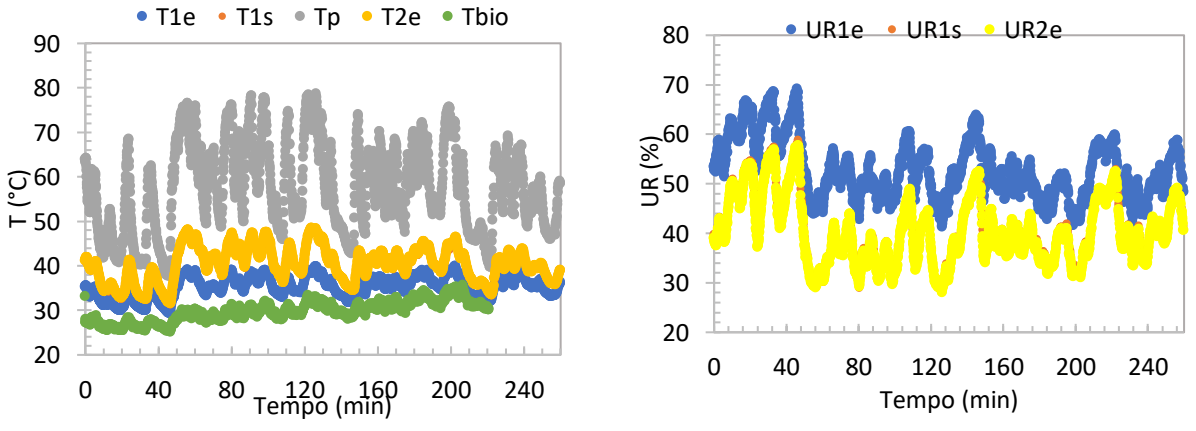
Dessa forma, obteve-se uma secagem mais homogênea, pois as umidades finais em cada região foram $X_{1,bu}$ =16,23%; $X_{2,bu}$ = 13,97%; $X_{3,bu}$ = 14,01 %, o que confirma que o escoamento do ar está aproximadamente uniforme na região central. O teor de umidade de toda a biomassa foi de (14,73 ± 0,99)% b.u.

Além disso, os dados de massa apresentaram uma menor flutuação. Esse último resultado pode ser explicado pois com a porta fechada o ar úmido pode se acumular dentro da cabine, se a área dos orifícios de saída não for suficiente para exaustão do ar, provocando flutuações na pesagem. Além disso, como os orifícios estão situados na parte de cima das laterais, podem ter prejudicado esse fluxo de ar. Dessa forma, a abertura da porta traseira que fica na direção do duto de ar, direcionou toda a exaustão do fluxo de ar.

Dessa forma, optou-se por conduzir os demais experimentos com a porta aberta, orifícios fechados e material na região central.

4.2.2 Modo de secagem ativa e indireta

Nas Figura 0.10 (a) e (b) são apresentados os comportamentos das variáveis medidas no secador durante o Ensaio 3 (E3), no qual o modo de secagem solar foi o ativo-indireto, com escoamento forçado de ar a uma velocidade de 3,7 m/s, aquecido ao passar pelo coletor. O experimento foi realizado no dia 11/06/24 (parcialmente nublado), iniciando-se às 10:00 h e finalizando às 14:20 h , tempo necessário para secagem nessa condição.



(a) (b)

Figura 0.10: Curvas características do secador em função do tempo, para o Ensaio E3 (v_{ar} = 3,7 m/s). (a) Temperatura do ar na entrada e saída do coletor e da câmara de secagem, temperatura da placa e temperatura da biomassa; (b) umidade relativa do ar na entrada e saída do coletor e da câmara de secagem.

Na Figura 0.10 verifica-se que as variáveis seguem o comportamento já observado e discutido nos ensaios E1 e E2, onde $T_{bio} < T_{1e} < T_{1s} = T_{2e} < T_p$ e, consequentemente, $UR_{1e} > UR_{1s} = UR_{2e}$. A umidade relativa média ambiente, considerada igual a UR_{1e}, foi de 53,15%.

A fim de melhorar a visualização dos dados e facilitar posterior cálculo das eficiências do coletor e do processo de secagem, alguns dados foram plotados a cada 20 min. A Figura 0.11 mostra os dados de irradiação solar (IR) e de temperatura da placa (T_p) em função do tempo, a cada 20 min, durante o ensaio o E3. A temperatura da placa (T_p) está plotada no eixo primário das ordenadas (linha cinza) e a intensidade de radiação (IR), no eixo secundário (linha vermelha).

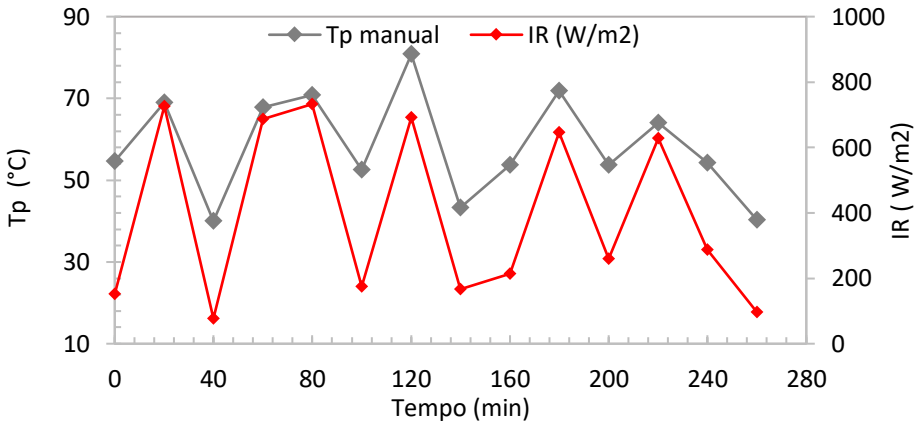


Figura 0.11: Intensidade de irradiação solar (IR) e temperatura da placa (T_p) em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E3 (v_{ar} = 3,7 m/s).

A partir da Figura 0.11 nota-se claramente que a temperatura da placa (T_p) acompanha o comportamento oscilatório da irradiação solar (IR), conforme observado nos ensaios E1 e E2. O dia nublado influencia na presença de nuvens, o que explica tal comportamento.

As intensidades de radiação máxima e mínima foram 732,5 e 77,0 w/m^2, às 11:20 h (80 min) e 10:40 h (40 min), com as temperaturas da placa atingindo 70,8 e 40,3°C, respectivamente. Às 12:00 h (120 min) era esperada uma irradiação máxima, por ser o momento em que os raios solares estariam perpendiculares à superfície. No entanto, isso não ocorreu. O fluxo de energia radiante incidente foi ainda alto, IR= 691,5 W/m^2, decorrente de um céu com poucas nuvens. Quando IR foi máxima, o valor de T_p foi menor que o das 12:00 h, de 80°C. Isso acontece porque depende de quanto tempo a irradiação permanece alta para aquecer mais a placa. Minutos antes a irradiação variou bruscamente resfriando a placa. Isso é observado nos

dados de T_p coletados continuamente pelo Arduino que mostraram variação no valor da temperatura minutos antes e depois das 11:20 h.

Como os dados de IR variam muito, dificultando a visualização de seu comportamento e posterior comparação, optou-se por apresentá-los, na Figura 0.12, juntamente com o desvio padrão, para representar o intervalo dos dados em torno da média de IR. A radiação solar média e o desvio padrão foram de (395,64 ± 257,12) W/m^2 que corresponde a um valor de Tp de (57,8 ± 12,2)°C. Como boa parte dos dados de IR estão abaixo de 400 W/m^2 a média da irradiação foi baixa.

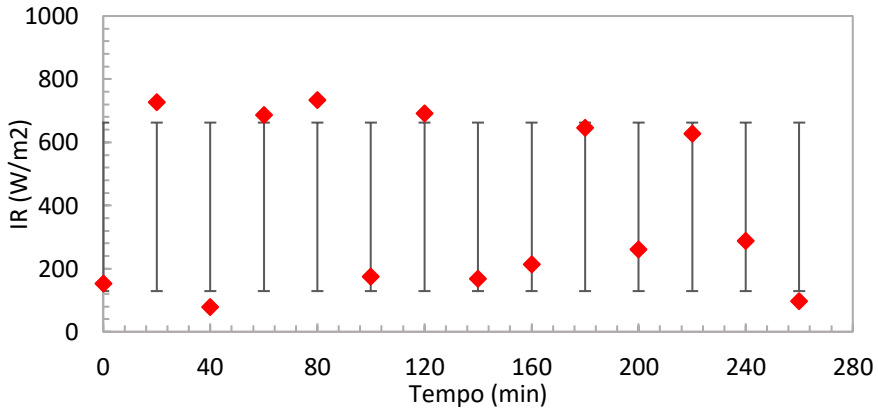


Figura 0.12: Intensidade de radiação solar (IR) em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E3, v_{ar} =3,7 m/s.

Dentre os trabalhos citados na secção 2.6, Abedini (2022) realizou experimento de secagem solar de camarão das 10:30 às 13:30, obtendo $IR_{médio}$ de 861 W/m^2, enquanto Mirzaei *et al.* (2021) ao investigar a secagem de fatias de batata obteve $IR_{médio}$ de 1010 W/m^2 e umidade relativa média ambiente ($UR_{amb,média}$) de 17%, entre 11:00 e 15:00. Goud *et al.* (2019) realizou dois experimentos das 08:00 as 17:00 para secar pimenta ver e quiabo, obtendo, respectivamente, $UR_{amb,média}$ de 35,13% e 38,68 %, e IR $_{média}$ de 581,95 W/m^2 e 595,4 W/m^2, atingindo valores máximos de 861 W/m^2 e 870 W/m^2. Gupta *et al.* (2022) secou chá verde, das 08:30 às 16:00, em um secador indireto ativo, em dias ensolarados e nublados, para os quais a radiação solar média foi, respectivamente, 597,33 W/m^2 e 495,41 W/m^2.

O tempo de secagem e o clima influencia no valor médio de irradiação e de umidade relativa do ar, de forma que nos trabalhos de Goud *et al.* (2019) e Gupta *et al.* (2022) o tempo foi muito longo. o que justifica um valor relativamente menor de IR e um maior valor de UR,

visto que os valores de IR no início da manhã e fim de tarde são naturalmente baixos. No entanto, o baixo valor de intensidade de radiação obtido no presente trabalho, de (395,64 ± 257,12) W/m^2 e a alta umidade relativa ambiente de 53%, em um tempo de secagem compreendida entre 10:00 as 14:20, está mais relacionado ao período nublado e instável.

A fim de mensurar a variação de temperatura do ar no coletor ($\Delta T_{coletor}$) foi feito um refinamento dos dados das temperaturas de entrada (T_{1e}) e saída (T_{1s}), apresentados na Figura 0.10 (a), obtendo-se as curvas da Figura 0.13 ,onde os valores mínimo, médio e máximo da entrada ($T_{1e,\,mín}$, $T_{1e,\,máx}$, $T_{1e,\,médio}$) foram de 30; 38,4 e 35,8°C, e os da saída ($T_{1s,\,mín}$, $T_{1s,\,máx}$ e $T_{1s,\,médio}$) foram de 32,5; 46,9 e 40,7°C.

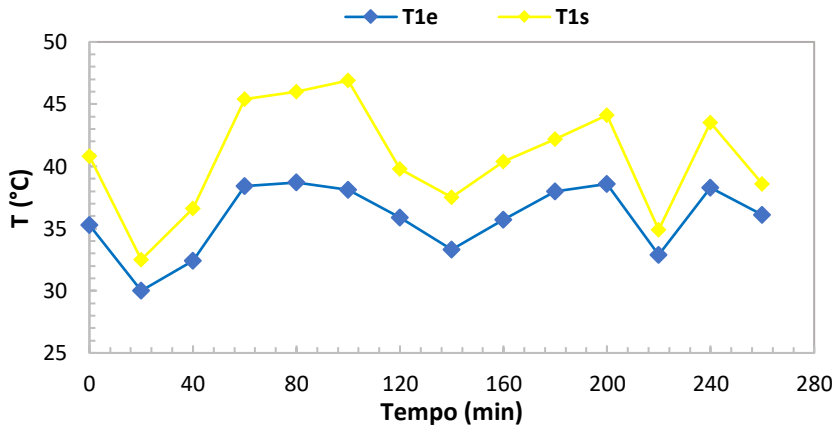


Figura 0.13: Temperaturas de entrada, T_{1e}, e saída, T_{1s}, do coletor em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E3, v=3,7 m/s.

Sabe-se que a placa absorvedora é aquecida através irradiação solar elevando sua temperatura para T_p. Parte dessa energia proveniente do sol, que é quantificada pela eficiência do coletor (η_{col}), é disponibilizada ao ar, promovendo o aumento de sua temperatura de T_{1e} para T_{1s}. Assim, quando o ar ambiente entra em contato com a placa absorvedora corrugada, é aquecido através da transferência de calor por convecção. Essa energia útil que o ar absorve é q_a, a qual é diretamente proporcional à variação de temperatura do coletor, $\Delta T_{coletor}$, como mostrado na Figura 0.14, onde q_a está apresentada no eixo principal (colunas em preto) e $\Delta T_{coletor}$ no eixo secundário (linha cinza), plotados em função do tempo.

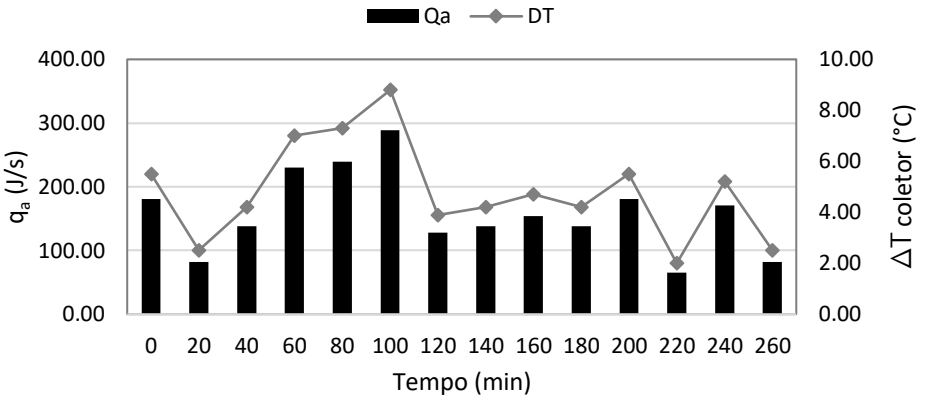


Figura 0.14: Taxa de energia térmica útil (q_a) fornecida pela placa e variação de temperatura do ar no coletor ($\Delta T_{coletor}$) em função do tempo, durante o Ensaio E3.

Da Figura 0.14 pode-se inferir que os valores máximo e mínimo de $\Delta T_{coletor}$ (8,80 e 2,50°C) e de q_a (288,98 e 65,66 J/s) ocorrem nos tempos de 20 e 100 min, respectivamente. Ademais, $\Delta T_{coletor,\ médio}$ = 4,82 °C e $q_{a\ médio}$ = 158,29 J/s .

É importante ressaltar que o gradiente de temperatura no início é diferente de zero, como observado na Figura 0.14 e na Tabela A.1 do Apêndice A, pois o equipamento já estava ligado quando a biomassa foi inserida na cabine de secagem, de forma que o ar no coletor já estava sendo aquecido.

Considerando os valores médios de q_a e IR, a eficiência média do coletor ($\eta_{col,médio}$) após 260 min foi de 50,01%, o que significa que nessas condições o ar absorve aproximadamente metade da energia solar total (A*IR) e o restante é utilizada para aquecer a placa absorvedora e perdido via radiação para a vizinhança.

Cabe ressaltar que a eficiência de 50% foi obtida em condições de vazão do ar de 0,033 kg/s e irradiação solar média 395,64 W/m^2 sobre uma área do coletor de 0,8 m^2, o que levou a um aquecimento do ar de 4,82°C ao passar pelo coletor. Comparando com outros trabalhos verifica-se que Goud *et al.* (2019), utilizaram aproximadamente o dobro da vazão (0,0657 kg/s) e um comprimento de coletor duas vezes maior (2 m). Ademais, a intensidade de radiação solar foi também mais elevada, de 885 W/m^2. Tudo isto contribuiu para maiores valores de $\Delta T_{coletor,\ médio}$, de 12°C (pimenta) e 17°C (quiabo) e, consequentemente, de calor útil (817 W) fornecido ao ar, o que resultou em valores maiores de eficiências de 74,13% e 78,12%, respectivamente.

Mugi e Chandramohan (2023) utilizaram o mesmo secador de Goud *et al.* (2019) para secar fatias de goiaba, e obtiveram eficiência de 56,05% para o modo passivo (vazão de 0,0430

kg/s) e 65,37% para o modo ativo (vazão de 0,072 kg/s). Os autores, no entanto, não informam as temperaturas de entrada e saída do coletor e nem valores médios de intensidade de radiação. A eficiência obtida no presente trabalho (50, 01%) se assemelha ao caso de convecção natural, visto que a vazão devido ao fluxo natural do ar é próxima do valor usado.

O ar aquecido pela placa é impulsionado pelo ventilador em direção a cabine onde vai remover a umidade da biomassa e promover sua secagem. Dessa forma, a energia total fornecida para secagem é obtida pelo produto da soma de q_a e da potência elétrica consumida pelo ventilador pelo tempo do processo. Uma parcela dessa energia, que será quantificada pela eficiência de secagem (η_{sec}), é usada para remover a umidade do material na forma de calor latente, Q_e, o qual depende da variação da massa da biomassa, ou seja, da perda de umidade (m_w). A Figura 0.15 mostra mais claramente essa relação ao longo do tempo, onde Q_e está no eixo principal (colunas em preto) e m_w no eixo secundário (linha cinza).

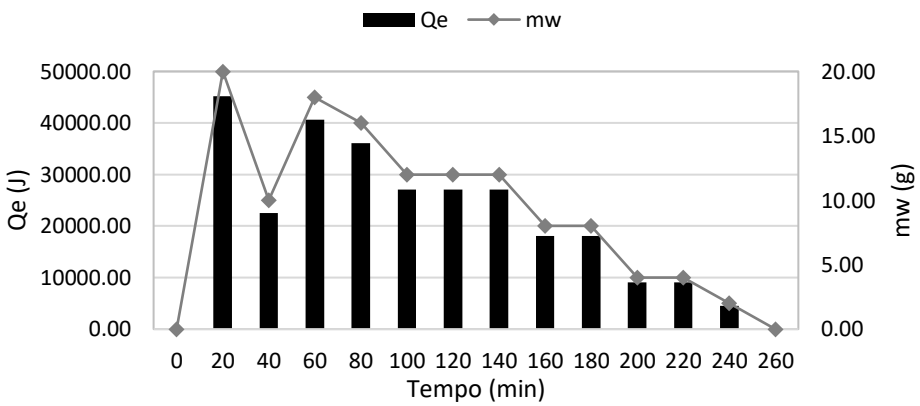


Figura 0.15: Calor útil de secagem (Q_e) e perda de água (m_w) em função do tempo, durante o Ensaio E3.

Com base na Figura 0.15 verifica-se que uma maior quantidade de energia na forma de calor latente é utilizada no estágio inicial do processo, quando a umidade superficial da biomassa é alta, bem como a quantidade de água removida pelo ar. Q_e diminui à medida que o teor de umidade e a taxa de secagem diminuem, tendendo a zero quando a umidade de equilíbrio termodinâmico é atingida.

Até 120 min, que é menos da metade do tempo de secagem, 73% da energia na forma de calor latente, correspondente a 198,62 kJ, foi consumida para vaporizar a umidade contida no material. Na análise de cinética de secagem, que será feita posteriormente, isso ficará mais claro. O somatório do calor utilizado para a secagem (Q_e) foi de 284,38 kJ. Considerando que

a energia total fornecida (q_a + P) t foi de 2699,65 kJ durante o tempo de secagem de 260 min, tem-se que a eficiência média de secagem ($\eta_{sec,médio}$) foi de 10,5%.

Goud *et al.* (2019) obtiveram eficiências de secagem média de 8% e 26%, em 18 h e 9 h de secagem ativa de pimenta e quiabo, respectivamente. No cálculo foi considerado o calor sensível e, portanto, o calor específico de cada material. Mugi e Chandramohan (2023) desconsideram a parcela de calor sensível, obtendo eficiências de 5,43% e 6,84 % em 18 h e 14 h, para os modos passivo e ativo, respectivamente. O tempo de secagem foi de dois dias, sendo que no segundo a eficiência foi muito baixa, pois a água ligada requer altos níveis de energia para sua remoção.

Em relação à cinética de secagem, nas Figura 0.16 (a), (b) e (c) são apresentados, respectivamente, os resultados do adimensional de umidade (XR), taxa de secagem (dX/dt) e temperatura da biomassa (T_{bio}) em função do tempo.

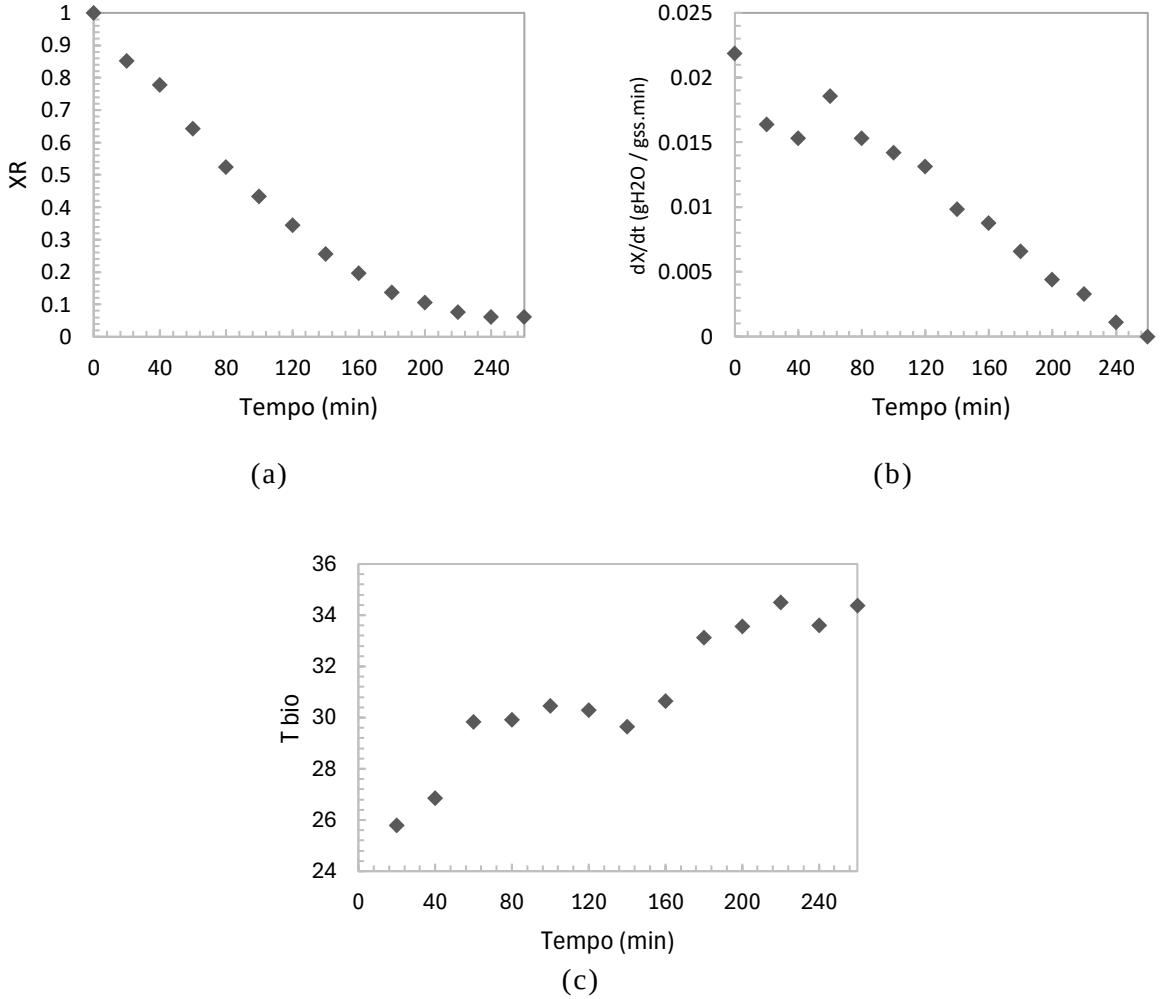


Figura 0.16: Curvas características de secagem obtidas no Ensaio E3, com v_{ar} = 3,7 m/s. (a) adimensional de umidade, XR, (b) taxa de secagem, -dX/dt, (c) temperatura da biomassa, T_{bio}, em função do tempo.

Da Figura 0.16 (c), nota-se que no início do processo há o chamado período de indução, o qual é caracterizado pelo aquecimento da biomassa e da umidade contida nela até a temperatura de vaporização. Após esse estágio inicial, toda energia fornecida pelo ar aquecido no coletor passa a ser utilizada para vaporizar a umidade do material, de modo que T_{bio} tende a permanecer em um patamar constante, mais perceptível entre 60 e 120 min, correspondente à temperatura de bulbo úmido do ar. A taxa de secagem, Figura 4.16 (b), permanece, então, também praticamente constante até 120 min, o que coincide com a região de decaimento linear na curva de secagem, Figura 4.16 (a). Durante o período a taxa constante, a remoção de umidade superficial é suprida pela difusão de umidade no interior do material. As flutuações observadas nos patamares de taxa e T_{bio} podem ser atribuídas à influência da natureza oscilatória de IR que influencia a T e UR do ar e, portanto, o comportamento de secagem do material pode variar.

Após o tempo de 120 min a taxa começa a decrescer, Figura 0.16 (b), pois a resistência à difusão passa a ser mais alta e a comandar o processo. Parte do calor fornecido pelo ar volta a ser utilizado na forma de calor sensível, provocando um suave aumento de 4°C na temperatura da biomassa, Figura 0.16 (c). Em um tempo de 240 min, o teor de umidade atingido pela biomassa foi de aproximadamente 15% b.u. Após esse tempo, a T_{bio} varia somente conforme as condições externas, XR não varia mais significativamente e a taxa de secagem torna-se nula.

É importante notar na Figura 0.16 (c) que a temperatura da biomassa durante todo o experimento está dentro da faixa de 25,8 – 33,6°C, com aquecimento máximo da biomassa de apenas 7,8 °C e $T_{bio,\ médio} = (31{,}0 \pm 2{,}6)°C$.

A Figura 0.17 apresenta IR e T_p ,em função do tempo, durante o Ensaio E4, conduzido com uma velocidade do ar menor, de 1,3 m/s. O experimento foi realizado dia 03/07/24 (parcialmente nublado) das 10:40 h às 14:40 h. O experimento foi finalizado nesse horário devido à chuva.

Nota-se que IR máxima e mínima foram de 681,5 e 140,0 W/m^2, às 13:40 h (180 min) e 12:20 h (100 min), respectivamente, com T_p de 72,0 e 54,7°C. Às 12:00 h (80 min), a irradiação não foi máxima, mas ainda assim apresentou um valor alto, de 631,00 W/m^2 e T_p = 74,7°C. $T_{p,\ máx}$ = 88,3°C ocorreu às 11:20 h (40 min).

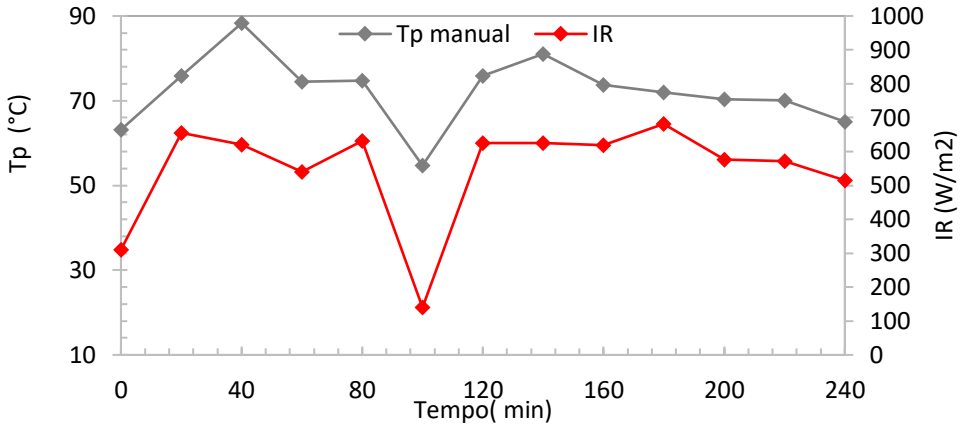


Figura 0.17 : Irradiação solar , IR, e temperatura da placa , T_p, em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E4 , v_{ar}=1,3 m/s.

Da Figura 0.18 pode ser observar a faixa de irradiação, em que $IR_{méd}$ = (547,00 ± 147,78) W/m^2, que levou a um T_p médio de (70,34 ± 10,24)°C. Nesse dia, apesar da previsão indicar dia parcialmente nublado, a maior parte do tempo foi com sol e poucas nuvens, o que explica um comportamento mais estável e maiores valores de IR e Tp em comparação com o Ensaio E3. Nos poucos instantes de baixa radiação, abaixo de 400 W/m^2, houve a presença de fortes nuvens e chuva após as 14:40 h.

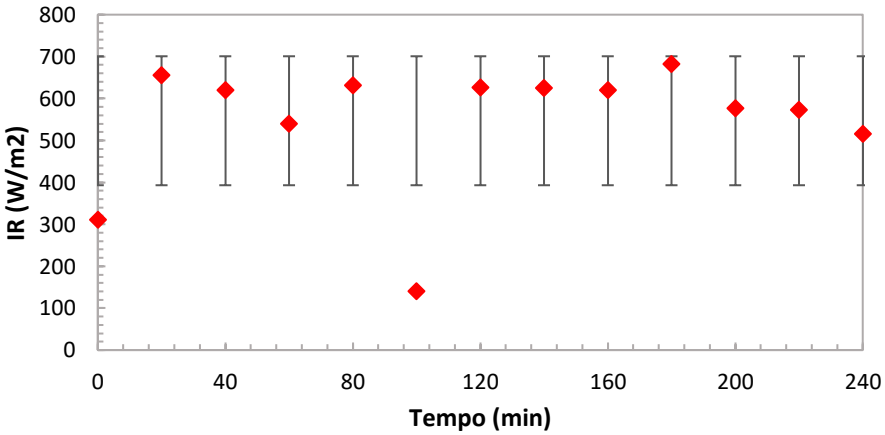


Figura 0.18: Intensidade de radiação solar (IR) em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E4, com v_{ar}= 1,3 m/s.

A variação de temperatura do ar no coletor é mostrada na Figura 0.19,onde os valores de $T_{1e,\,mín}$, $T_{1e,\,máx}$, $T_{1e,\,médio}$ foram de 33,8; 42,7 e 38,9°C, enquanto $T_{1s,\,mín}$, $T_{1s,\,máx}$ e $T_{1e,\,médio}$ foram de 42; 55,8 e 50,5°C.

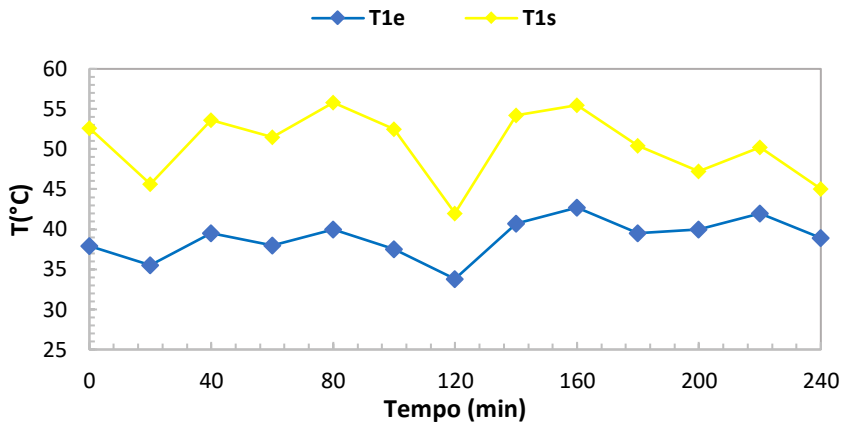


Figura 0.19: Temperatura do ar na entrada, T_{1e}, e saída, T_{1s}, do coletor em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E4, v_{ar} = 1,3 m/s.

Considerando que o fim do processo foi antecipado devido à chuva, optou-se por fixar um tempo de 200 min para comparar as eficiências do coletor e da secagem nos ensaios E3 e E4. Na Tabela 0.2 são sumarizados os dados com resultados médios e desvio padrão, considerados mais importantes, a fim de facilitar a compreensão e a análise comparativa entre os resultados obtidos nos ensaios E3 e E4.

Tabela 0.2: Principais resultados obtidos nos Ensaios E3 e E4, para um tempo de secagem de 200 min.

Variáveis	**Ensaio E3 (v_{ar} = 3,7 m/s)**	**Ensaio E4 (v_{ar} = 1,3 m/s)**
$IR_{médio}$ (W/m²)	411,55 ± 264,25	547,00 ± 160,17
$T_{p,\,médio}$ (°C)	59,8 ± 12,3	73,1 ± 8,3
$T_{1e,\,médio}$ (°C)	35,8 ± 2,8	38,7 ± 2,4
$T_{1s,2e\,médio}$ (°C)	41,1 ± 4,2	51,0 ± 4,2
$\Delta T_{coletor,médio}$ (°C)	5,3 ± 1,7	12,4 ±2,7
$T_{bio,\,médio}$ (°C)	30,0 ± 2,6	31,4 ± 1,3
$q_{a,\,médio}$ (W)	172,51 ± 56,85	137,16 ± 30,20
$\eta_{col,médio}$ (%)	52,39	31,30
$Q_{e,total}$ (J)	270840	167018
$q_{a,médio}$ + P (W)	181,41 ± 56,85	138,17 ± 30,19
$\eta_{sec,médio}$ (%)	12,44	10,07

A fim de comparar as variações de temperatura do ar no coletor ($\Delta T_{coletor} = T_{1s} - T_{1e}$), para os dois ensaios, foi feito um gráfico de barras como ilustrado na Figura 0.20. Pode-se observar tanto na Figura 4.20, como a partir dos valores médios da Tabela 0.2, que a 1,3 m/s, o ar sai do coletor com uma temperatura maior e como a perda de calor no duto de conexão com a cabine é desprezível, chega para a secagem da biomassa com uma temperatura média de 51°C, cerca de 10°C acima daquela ao escoar com 3,7 m/s. Isso pode ser explicado não somente pela maior irradiação média do dia, mas também pelo maior tempo de residência do ar no coletor, em contato com a placa absorvedora, o que leva a seu maior aquecimento.

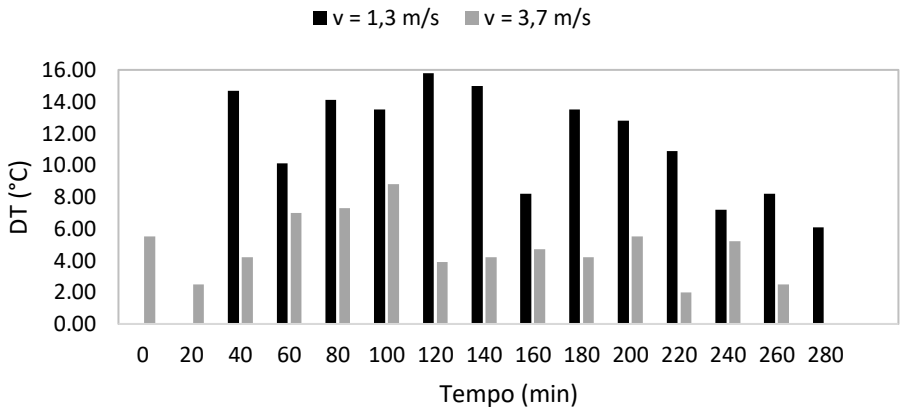


Figura 0.20: Variações de temperatura do ar (ΔT) no coletor em função do tempo, durante os ensaios E3 e E4.

Com base na Tabela 0.2, nota-se que embora no ensaio E4 o aquecimento do ar no coletor tenha sido aproximadamente o dobro daquele observado no ensaio E3, a quantidade de calor transferida da placa (q_a) foi menor. Isso pode ser atribuído à menor vazão mássica ($\dot{m}_a$) empregada, em que $\dot{m}_{a,E4} \cong \frac{1}{3}\dot{m}_{a,E3}$, que foi suficiente para reduzir o valor de Q_a. Assim, apesar da maior incidência de energia solar sobre a placa (IR), uma menor quantidade de energia térmica útil (q_a) foi aproveitada, o que culminou em uma menor eficiência do coletor (η_{col}). A eficiência de secagem, (η_{sec}) será discutida durante a comparação entre as cinéticas de secagem

As curvas comparativas de cinética de secagem da biomassa exposta ao escoamento forçado de ar a 1,3 e 3,7 m/s, aquecido ao passar pelo coletor solar, são apresentadas nas Figura 0.21 (a), (b) e (c).

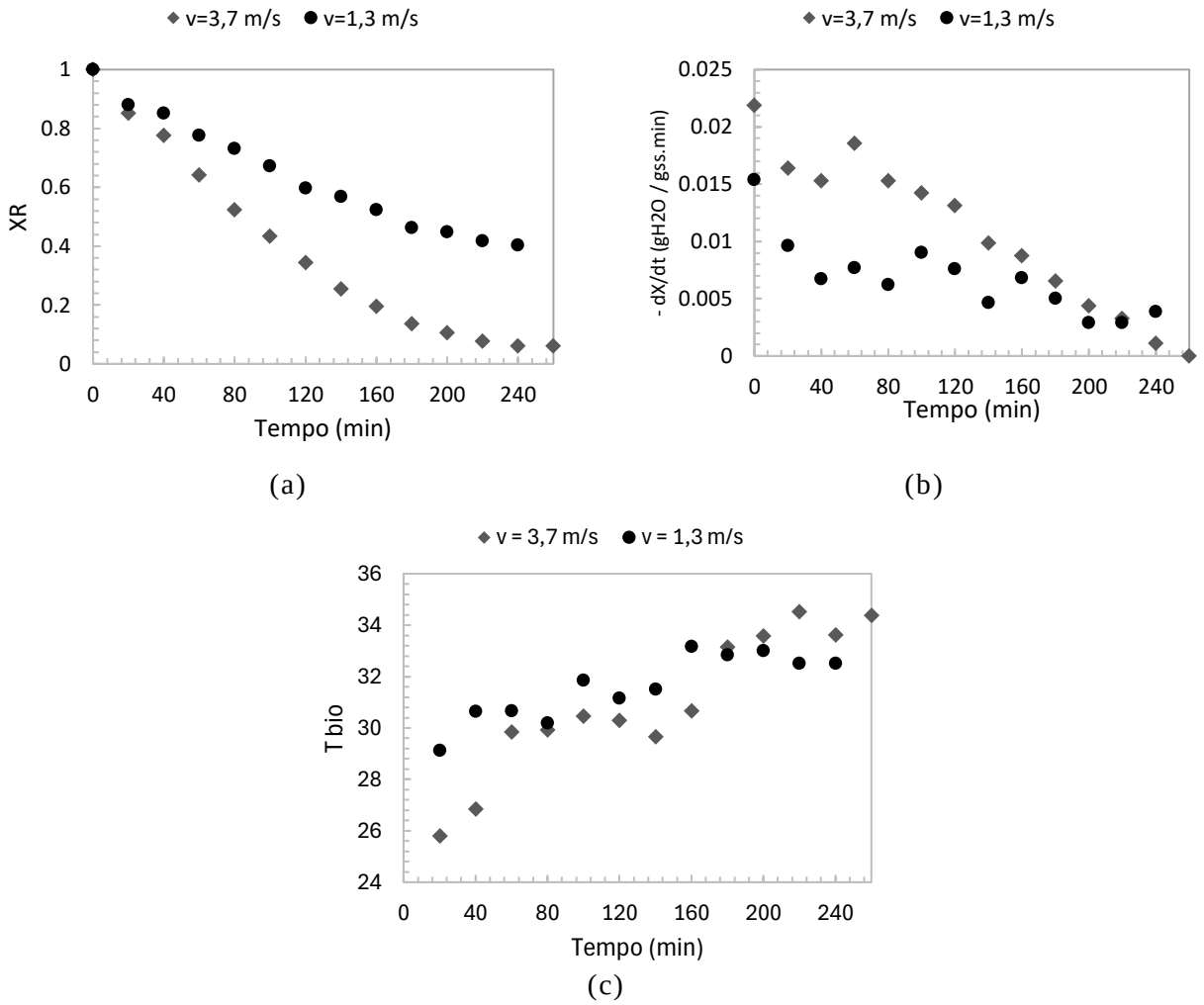


Figura 0.21: Curvas características de secagem dos Ensaios E3 e E4. (a) adimensional de umidade (XR), (b) taxa de secagem (-dX/dt), (c) temperatura da biomassa (T_{bio}), em função do tempo.

Da Figura 0.21 (b), observa-se uma menor taxa de secagem no ensaio E4, conduzido na menor velocidade do ar, de 1,3 m/s. Deste modo, o decaimento da curva de secagem, Figura 0.21 (b), é mais suave em comparação com aquele observado 3,7 m/s, requerendo um maior tempo para o fim do processo.

Deve ser ressaltado, com base na Figura 4.21 (b), que a influência da velocidade ocorre principalmente durante o período de taxa constante, o qual é governado pela resistência externa localizada na corrente de ar. O aumento da velocidade do ar intensifica o processo de remoção da umidade superficial da biomassa, à medida que reduz as espessuras das camadas limite fluidodinâmica e de concentração, diminuindo assim a resistência à transferência de massa por convecção. Ademais, um aumento da velocidade do ar resulta em um maior coeficiente de

transferência de calor por convecção ar-biomassa, favorecendo a transferência de energia para vaporizar a umidade do material.

Apesar das maiores taxas, na secagem com escoamento de ar a 3,7 m/s o período de taxa constante é mais curto, o que antecipa o controle do processo pela difusão de umidade e a queda da taxa de transferência de massa.

Observa-se que apesar do ensaio E4 (v_{ar} =1,3 m/s) ter sido realizado em um dia com maiores valores de médios de irradiação solar e portanto, de temperatura do ar na entrada da cabine (T_{2e}), que o ensaio E3 (v_{ar} = 3,7 m/s), isso não foi suficiente para promover uma secagem mais rápida. Ou seja, uma maior velocidade do ar teve maior efeito, que uma maior temperatura do ar. Em outras palavras, a convecção forçada de ar teve uma influência mais significativa que as outras variáveis, principalmente por ser regulada e permanecer constante durante todo o processo, ao contrário de T_{ar}, susceptível a variações atreladas às oscilações na intensidade de radiação solar que incide sobre a placa do coletor.

É importante observar na Figura 0.21 (c), que conforme ocorreu no ensaio E3, a biomassa atingiu temperaturas relativamente baixas, numa faixa de 29,1 a 33,2°C, com um aumento máximo de 4,1°C, onde $T_{bio,médio}$ = (31,6+ 1,2)°C. Não havendo, portanto, uma diferença significativa em $T_{bio,médio}$ nos dois ensaios realizados.

A menor taxa de secagem obtida no ensaio E4, indica que houve uma menor quantidade de água removida por unidade de tempo, o que influenciou no menor valor do calor utilizado para a secagem (Q_e), como listado na Tabela 0.2. Dessa forma, a redução no denominador da Equação 11 (q_a + P), provocada por uma menor potência do ventilador e por uma menor energia útil fornecida, não foi suficiente para aumentar a eficiência de secagem, visto que $\eta_{sec,E4}$= 10% frente a $\eta_{sec,E3}$=12 %.

4.2.3 Modo de secagem ativa, indireta e híbrida

A Figura 0.22 mostra o comportamento de IR em função do tempo durante o ensaio 5 (E5) com secagem solar indireta e híbrida, convecção forçada (v_{ar} = 3,7 m/s) e energia auxiliar infravermelho (P = 50 W). O experimento foi realizado no dia 04/07/24 (parcialmente nublado), com início às 10:30 h e fim às 14:30 h, tempo suficiente para secagem do material.

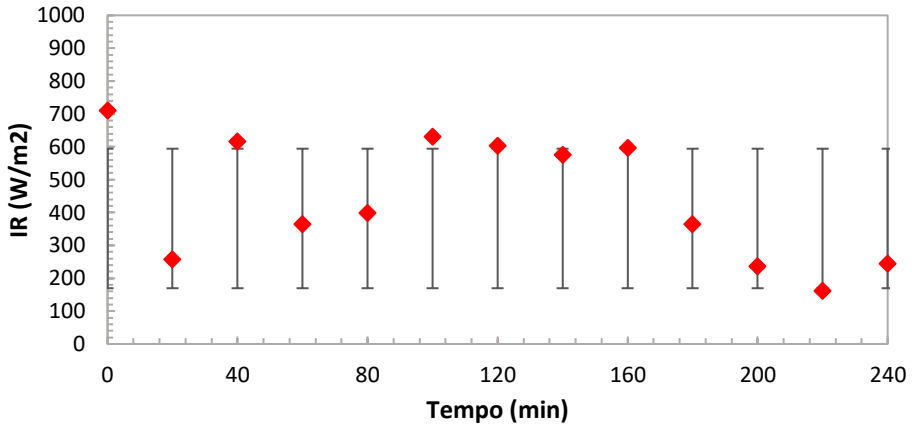


Figura 0.22: Intensidade de radiação solar (IR) em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E5 (P_{IV}= 50 W e v_{ar} = 3,7 m/s).

Da Figura 0.22, observa-se um comportamento oscilatório da intensidade de radiação pela manhã, devido à instabilidade do clima, com baixos valores de IR em períodos de fortes nuvens. Aproximadamente ao meio dia (100 min) são atingidos valores altos de IR = 630,5 W/m^2 e T_p =70,4°C. O céu permaneceu limpo até 13:10 h (160 min) e após isso houve muitas nuvens que provocaram a redução da irradiação. Assim, IR média foi relativamente baixa (381,97 ± 205,54) W/m^2 e T_p médio foi de (57,1 ± 13,3)°C.

As temperaturas de entrada (T_{1e}) e saída (T_{1s}) do coletor durante o ensaio E5 são apresentadas na Figura 0.23, a partir da qual verifica-se que os valores de $T_{1e,\,mín}$, $T_{1e,\,máx}$, $T_{1e,médio}$ foram de 33,4; 40,7 e 36,6°C. , enquanto os de $T_{1s,\,mín}$, $T_{1s,\,máx}$ e $T_{1s,\,médio}$ foram 31,7; 48,6 e 42,8°C.

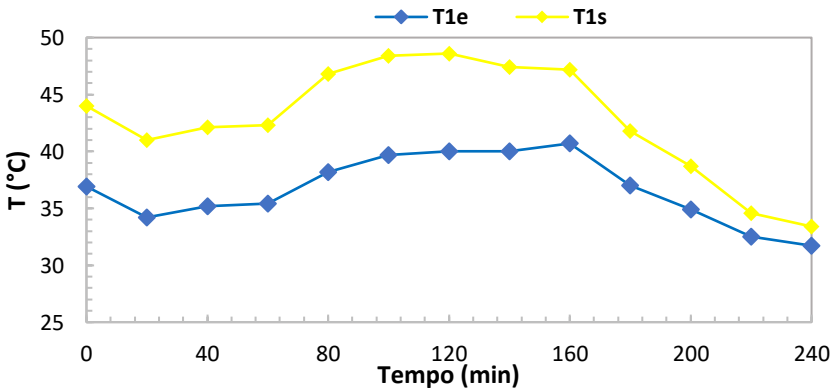


Figura 0.23: Temperaturas de entrada, T_{1e}, e saída,T_{1s}, do coletor em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E5 (P_{IV}= 50 W e v_{ar} = 3,7 m/s).

Considerando T_{1e} e T_{1s}, obtém-se a variação de temperatura do ar no coletor, $\Delta T_{coletor}$, que está plotada no eixo secundário da Figura 0.24, juntamente com a taxa de calor disponível q_a no eixo principal.

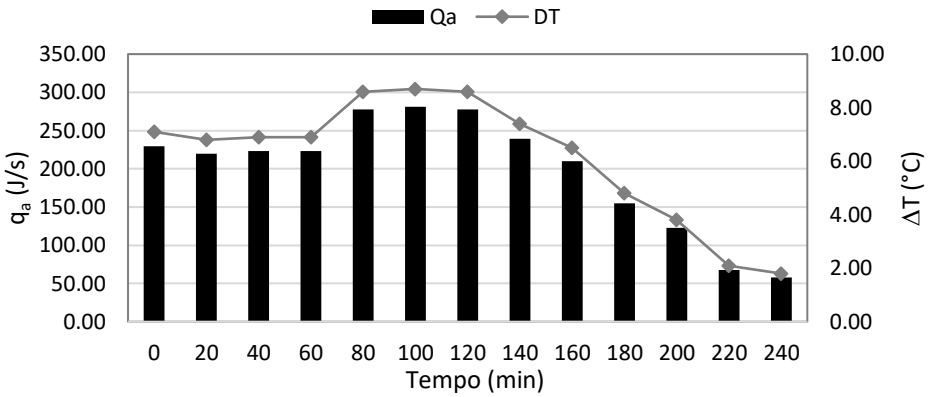


Figura 0.24: Taxa de energia térmica útil (q_a) fornecida pela placa e variação de temperatura do ar no coletor ($\Delta T_{coletor,}$) em função do tempo, durante o Ensaio E5.

Da Figura 0.24 nota-se que os maiores valores de $\Delta T_{coletor}$ (8,7°C) e, por consequência, de q_a (281,07 J/s), ocorreram próximo ao meio dia, entre 80 e 160 min, período onde se tem alta incidência de radiação solar, como visto na Figura 0.22. Após esse tempo, as variáveis tendem a diminuir com IR, com valores mínimos de $\Delta T_{coletor}$ = 2,0°C e de q_a = 58,15 J/s sendo atingidos às 14:30 h. As médias de ΔT e q_a são, respectivamente 6,15°C e 188,81 J/s, e a eficiência média do coletor foi de 57,0%.

Em relação à secagem da biomassa, foi utilizada um total de energia (Q_e) de 279,87 kJ para remover a umidade, sendo que nos primeiros 60 min, que representam ¼ do tempo total, foi requerido 50% de Q_e (Figura 0.25). Esse alto valor inicial se deve à alta taxa de secagem no estágio inicial do processo. Considerando que a energia total fornecida é proveniente da energia solar, do ventilador e da fonte de radiação infravermelho, obteve-se um valor de 3732,76 kJ. Assim, a eficiência média de secagem ($\eta_{sec,médio}$) foi de 7,5 %, para um tempo de secagem de 240 min.

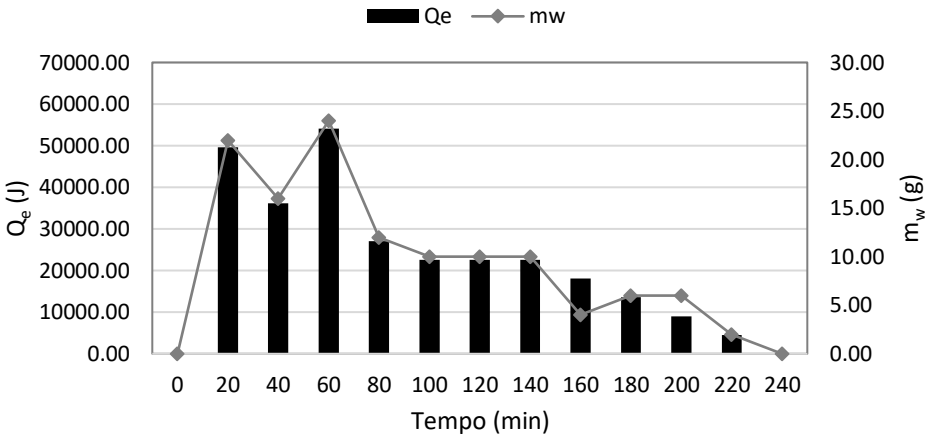
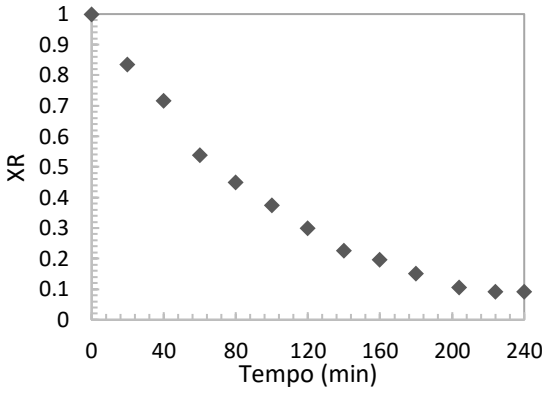
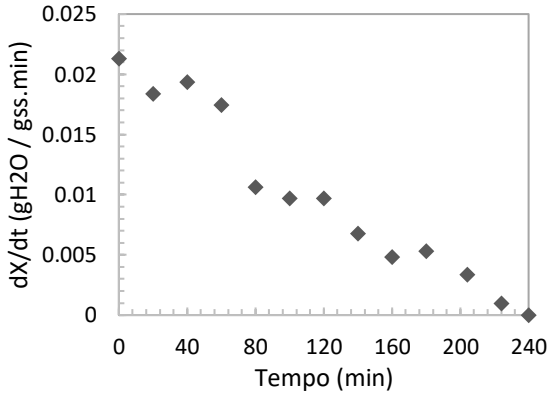


Figura 0.25: Calor útil de secagem (Q_e,) e massa de água removida (m_w) em função do tempo durante o Ensaio E5.

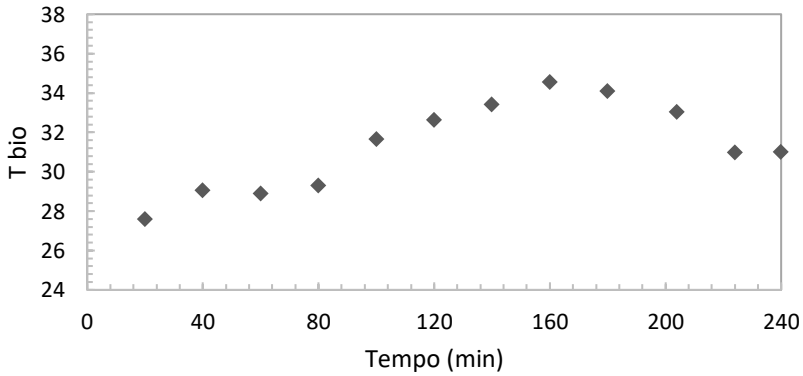
As características de secagem da biomassa, obtidas no Ensaio E5, conduzido com v_{ar} de 3,7 m/s, são apresentadas nas Figura 0.26 (a), (b) e (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 0.26: Curvas características de secagem obtidas no Ensaio E5. (a) adimensional de umidade (XR), (b) taxa de secagem, (-dX/dt), e (c) temperatura da biomassa (T_{bio}), em função do tempo.

Da Figura 0.26 (a), infere-se que o tempo de secagem para atingir o teor de umidade alvo foi de 240 min. Verifica-se também uma pequena alteração na inclinação na curva de secagem entre 40 para 80 min, que é evidenciada por uma queda e mudança do patamar da taxa de secagem, Figura 0.26 (b), que pode ser justificada pela natureza oscilatória de IR (Figura 0.22), principalmente pela manhã. O comportamento da temperatura da biomassa, Figura 4.26 (c) acompanha os mecanismos físicos de transferência de calor e massa envolvidos nessas etapas sequenciais, aumentando de 27,6 a 34,5°C, com valor médio de (31,3 ± 2,2)°C.

A fim de comparar a influência da velocidade do ar nos experimentos com uso da radiação infravermelho, nas Figuras 4.27 a 4.29 são apresentados os resultados referentes ao Ensaio E6, conduzido com uma velocidade do ar menor, de 1,3 m/s. O experimento foi realizado dia 13/07/24 (parcialmente nublado), das 10:50 às 14:10. Nesse dia houve sol forte em boa parte da manhã, como indicado pelas altas IR na Figura 0.27. Pela tarde, a partir dos 140 min de experimento, o céu ficou nublado, culminando com chuva após 200 min.

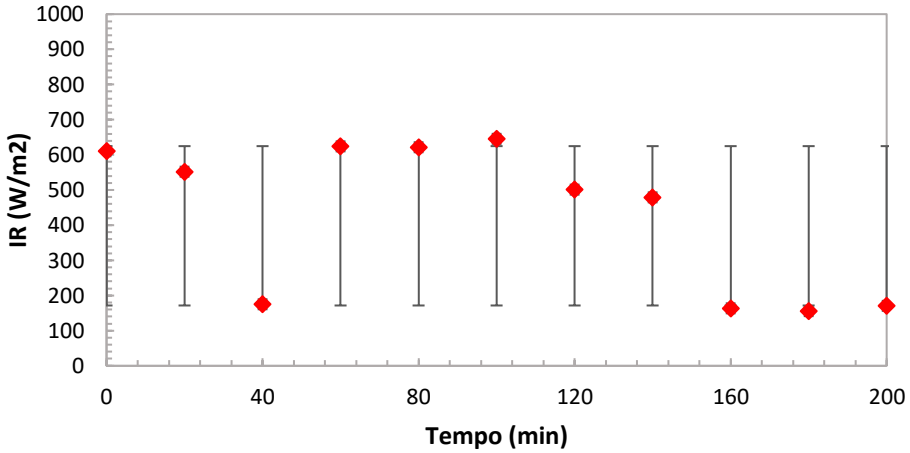


Figura 0.27: Intensidade de radiação solar (IR) em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E6 (P_{IV}= 50 W e v_{ar} = 1,3 m/s).

Na Figura 0.27, pode ser observado que a irradiação solar atingiu seus maiores valores, entre 11:40 e 12:30 h, variando de 624,5 a 645,5 W/m^2. Nesse período, T_p atingiu em torno de 80°C. Os valores médios foram: IR = (398,12 ± 216,89) W/m^2 e T_p = (67,5 ± 13,8)°C.

Em relação às temperaturas no coletor, o maior aquecimento do ar foi atingido às 12:30 (100 min), Figura 0.28, quando T_{1e} =40,6 °C e T_{1s} = 57,7 °C. No fim do experimento, em razão da variação das condições climáticas, houve uma queda significativa na transferência de calor por convecção entre o ar e a placa, tal que T_{1e} =31,3 °C e T_{1s} = 36,1 °C.

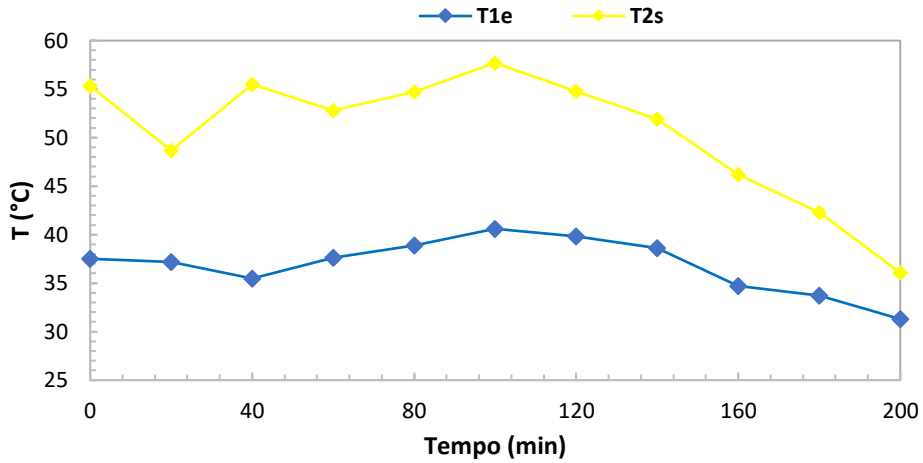


Figura 0.28: Temperaturas de entrada, T_{1e}, e saída ,T_{1s}, do coletor em função do tempo de secagem, durante o Ensaio E6 (P_{IV}= 50 W e v_{ar} = 1,3 m/s).

As características de desempenho do secador nos ensaios E5 e E6 foram comparadas em um tempo fixo 200 min e são apresentadas na Tabela 0.3. Em termos médios, os valores de IR e Tp para os dois dias estão dentro de um intervalo similar. Assim, a maior variação de temperatura o ar no ensaio com menor velocidade (E6) é justificada, principalmente, pelo maior tempo de contato do ar com o coletor solar.

Tabela 0.3: Principais resultados dos Ensaios E5 e E6, para um tempo de secagem de 200 min.

Variáveis	**Ensaio E5 (v_{ar} = 3,7 m/s)**	**Ensaio E6 (v_{ar} = 1,3 m/s)**
$IR_{médio}$ (W/m²)	487,05 ± 157,47	427,04 ± 203,18
$T_{p,médio}$ (°C)	64,0 ± 7,8	67,5 ± 13,8
$\Delta T_{coletor,médio}$ (°C)	6,9 ± 1,5	13,7 ± 4,2
$T_{bio,\ médio}$ (°C)	31,4 ± 2,4	31,6 ± 1,3
$q_{a,médio}$ (W)	223,50 ± 47,22	154,57 ± 47,10
$\eta_{col,médio}$	57,36	45,24
$Q_{e,total}$ (J)	275454	212158
$q_{a,médio}$+ P (W)	283,91 ± 47,22	205,6 ± 47,11
$\eta_{sec,médio}$	8,08	8,60

Conforme ocorreu com os ensaios E3 e E4, nos quais a radiação IV não foi utilizada como energia suplementar, a eficiência do coletor no experimento E5, realizado com a maior velocidade do ar de 3,7 m/s, foi maior que aquela do ensaio E6, por causa do maior valor da vazão de escoamento, que influencia Q_a.

Apesar de na secagem com v_{ar} =1,3 m/s, ter havido uma menor quantidade de água removida e, consequentemente, um menor valor de Q_e requerido, a redução no consumo de energia do ventilador, aliada à menor energia disponível, culminou em uma eficiência de secagem de 8,60%, equivalente à obtida no ensaio E5.

A fim de efetuar uma avaliação comparativa dos comportamentos de secagem da biomassa, obtidos nos ensaios E5 e E6, na Figura 0.29 são mostrados os resultados de XR, ´dX/dt e T_{bio} em função do tempo, parametrizados nas velocidades do ar empregadas.

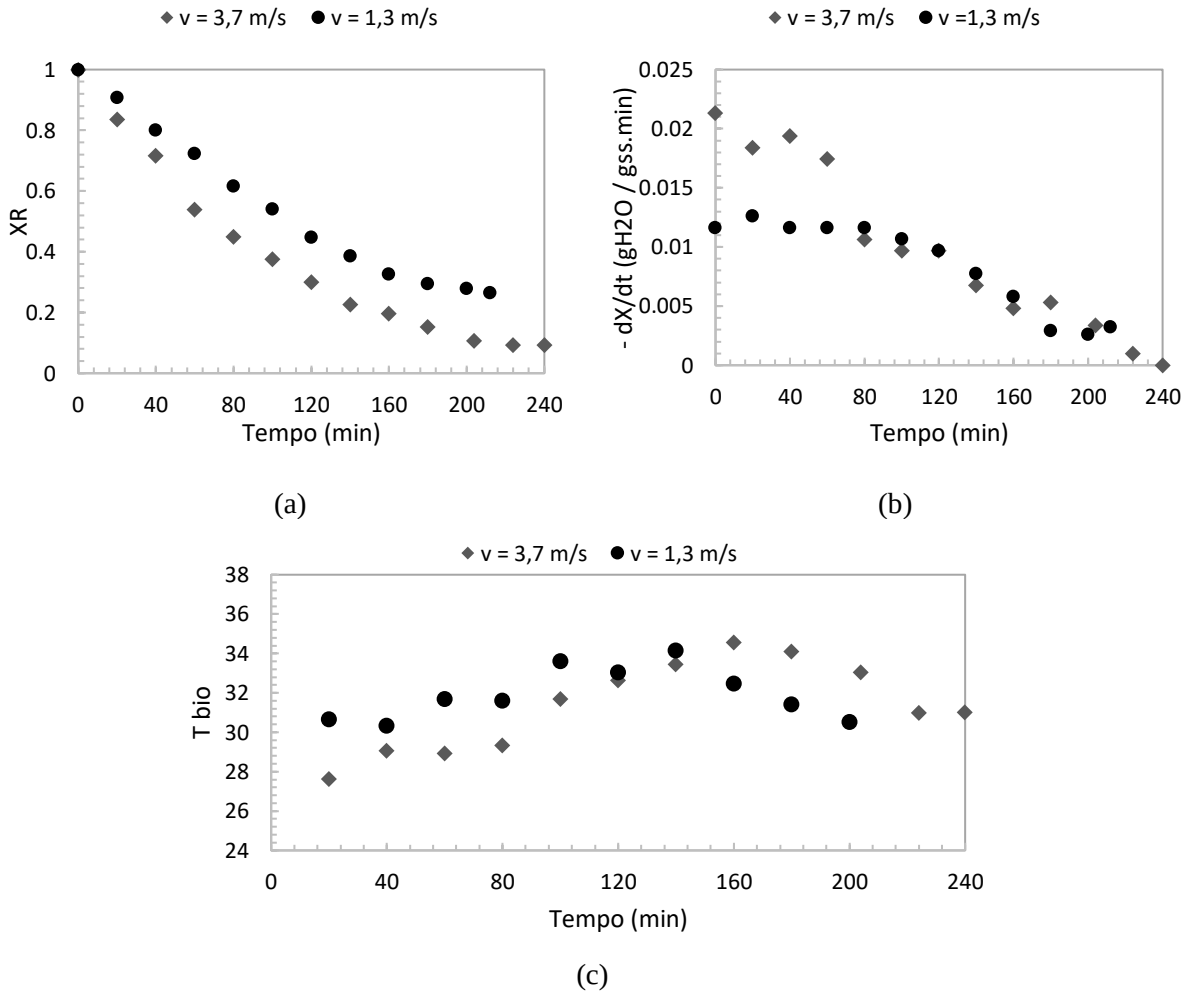


Figura 0.29: Curvas características de secagem dos Ensaios E5 e E6. (a) adimensional de umidade (XR), (b) taxa de secagem (-dX/dt), (c) temperatura da biomassa (T_{bio}), em função do tempo.

Assim como nos ensaios sem aquecimento IV auxiliar, ao empregar a maior velocidade do ar, maior foi a remoção de umidade em um menor tempo, conforme revelado pela maior inclinação na curva de secagem, Figura 4.29 (a). Chama a atenção na Figura 0.29 (b) o fato do período de taxa constante também ser menor para v= 3,7 m/s. Em relação à temperatura da biomassa, Figura 4.29 (c), também não houve diferença significativa, visto que para v_{ar}= 1,3 m/s, T_{bio} = (31,65 ± 1,26) °C com $\Delta T_{bio,máx}$= 3,3 °C, como listado na Tabela 0.3.

4.2.4 Avaliação comparativa dos modos de operação do secador

Foram apresentadas e discutidas até o momento todas as curvas de irradiação solar e de cinéticas de secagem da biomassa, incluindo a avaliação da influência da velocidade do ar no modo de operação ativo e indireto, bem como no modo ativo, indireto e híbrido.

Nesta seção será efetuada uma comparação dos resultados obtidos em cada modo de operação do secador solar construído e em cada velocidade do ar empregada, com o propósito da avaliar a influência da radiação IV como energia suplementar para a secagem da entrecasca de mandioca.

Em ambos os modos de operação, nos ensaios conduzidos com velocidade do ar de 3,7 m/s (E3 e E5), o teor de umidade alvo foi atingido. Logo, foi possível calcular as eficiências nos correspondentes tempos de secagem e comparar os desempenhos de cada modo de secagem, e verificar a influência da radiação IV.

i) *Influência radiação IV combinada ao escoamento forçado de ar a 3,7 m/s*

Considerando os Ensaios E3 (sem IV) e E5 (com IV), conduzidos com velocidade do ar de 3,7 m/s, os principais dados estão sumarizados na Tabela 0.4 para fins de comparação de desempenhos e análise do aquecimento IV suplementar. Todos os parâmetros foram calculados considerando o tempo de secagem requerido em cada para atingir a umidade alvo, de 15% b.u.

Verifica-se que os dois ensaios ocorreram dentro de um intervalo similar de irradiação solar e temperatura de entrada da cabine. No entanto, a relativamente menor energia incidente sobre a placa e o ligeiro maior aquecimento do ar contribuíram para uma maior eficiência do coletor no Ensaio E5, cuja secagem foi assistida por radiação IV. Deve ser ressaltado que o aquecimento infravermelho tende a influenciar somente a secagem dentro da cabine, ou seja, a eficiência de secagem.

Tabela 0.4: Principais resultados obtidos nos Ensaios E3 e E5, em seus respectivos tempos de secagem

	Ensaio3 (sem IV)	**Ensaio 5 (com IV)**
$\mathbf{IR_{médio}\ (W/m^2)}$	395,64 ± 257,12	381,97 ± 205,54
$\mathbf{T_{1s,2e\ médio}\ (°C)}$	39,9 ± 4,7	40,5 ± 6,5
$\mathbf{\Delta T_{coletor,médio}\ (°C)}$	4,8 ± 1,9	6,5 ± 1,9
$\mathbf{T_{bio,\ médio}\ (°C)}$	31,0 ± 2,7	31,4 ± 2,2
$\mathbf{q_{a,médio}\ (W)}$	158,29 ± 61,14	198,81 ± 72,41
$\boldsymbol{\eta_{col,médio}}$ **(%)**	50,01	57,0
$\boldsymbol{Q_{e,total}\ (J)}$	284382	279868
$\mathbf{(q_a + P)t\ (J)}$	2608182,06	3732760,11
$\boldsymbol{\eta_{sec,médio}}$ **(%)**	10,5	7,5

Na Figura 0.30 são apresentadas as curvas características de secagem obtidas ao operar o secador nos modos de operação ativo e indireto, e ativo, indireto e híbrido, fixando a velocidade do ar em 3,7 m/s, a partir das quais pode se avaliar os efeitos da radiação IV.

A partir da Figura 4.30 (b) nota-se que até 40 min a taxa de secagem obtida no ensaio com IV (E5) foi um pouco maior que aquela obtida com o ensaio E3, gerando uma inclinação levemente superior na curva de secagem, Figura 0.30 (a). Isso acontece, pois a radiação IV tende a influenciar mais significativamente os estágios iniciais de secagem, como os de indução e de taxa constante, devido à maior absorção de raios IV pelo filme líquido que recobre a superfície da biomassa nesses períodos. Logo, a temperatura da biomassa, Figura 0.30 (c), do ensaio E5 (com IV) foi maior que a do ensaio E3 (sem IV) durante tais períodos, causando um maior aquecimento do material devido a agitação das moléculas ocasionadas pela radiação IV fornecendo junto com a convecção de ar aquecido a energia necessária para vaporizar a umidade.

Entretanto, a combinação do aquecimento IV com uma alta velocidade do ar remove rapidamente essa umidade superficial, abreviando o período de taxa constante e, assim, o efeito da energia IV suplementar.

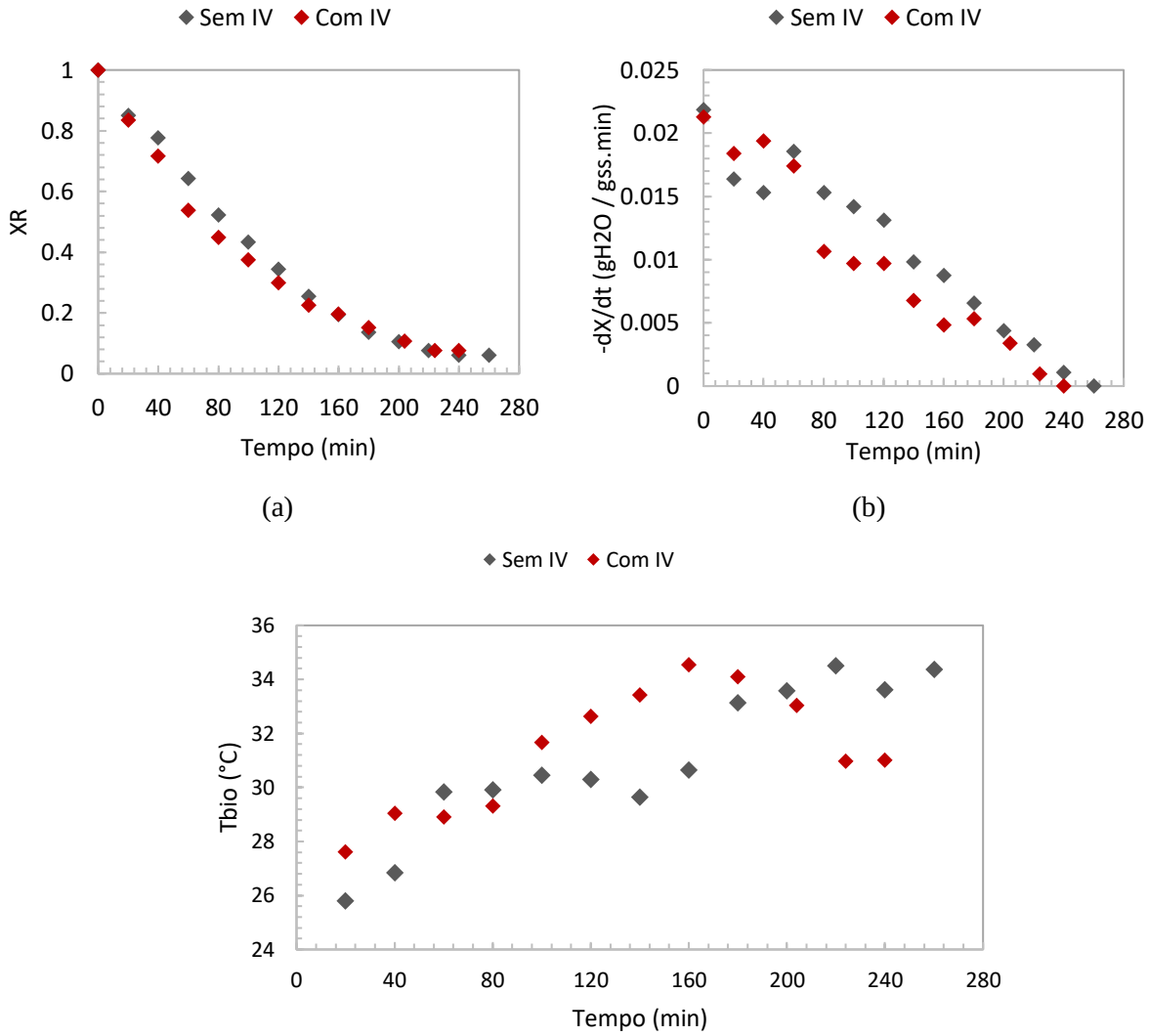


Figura 0.30: Curvas características de secagem dos Ensaios E3 e E5. (a) adimensional de umidade (XR), (b) taxa de secagem (-dX/dt), (c) temperatura da biomassa (T_{bio}).

A partir de 80 min, após a remoção de toda a umidade superficial, em razão da baixa espessura de penetração no sólido, a radiação IV passa a contribuir efetivamente para uma maior taxa de aquecimento da superfície da biomassa, como pode ser verificado na Figura 4.30 (c).

Apesar do observado efeito limitado na secagem, o tempo do processo assistido pelo aquecimento IV foi reduzido em 20 min, sendo de 240 min, o qual foi 8% menor que o do modo que emprega como agente de secagem somente o ar aquecido ao passar pelo coletor solar. O teor de umidade atingido pela biomassa foi de aproximadamente 15% b.u., valor considerado adequado para aplicação em processos de conversão termoquímica.

Após 180 min, T_{bio} do ensaio E5 cai devido à queda de IR (Figura 0.12). No entanto, estatisticamente, não houve diferença significativa entre as temperaturas médias da biomassa em cada modo de secagem, visto que os valores obtidos estão dentro do mesmo intervalo (Tabela 4.4)

Com base na Tabela 4.4 verifica-se que as eficiências (η_{sec}) do secador solar desenvolvido, operando nos modos indireto/ativo (Ensaio E3) e híbrido (Ensaio E5), foram de 10% e 7,5%, respectivamente. Ao aplicar o aquecimento IV, há um gasto adicional de energia elétrica para acionar as lâmpadas IV. A energia total consumida aumenta aproximadamente 43%, de 2,61 MJ (E2) para 3,73 MJ (E3). Assim, apesar do modo híbrido levar a uma redução de quase 8% no tempo de secagem, menor é sua eficiência, quando comparado ao modo que emprega como agente de secagem somente o ar aquecido ao passar pelo coletor solar.

ii) *Influência radiação IV combinada ao escoamento forçado de ar a 1,3 m/s*

Na Tabela 4.5 são apresentados os principais resultados obtidos nos ensaios E4 (sem IV) e E6 (com IV), conduzidos com velocidade do ar de 1,3 m/s, considerando um tempo de processo de 200 min.

Tabela 0.5: Principais resultados obtidos nos Ensaios E4 e E6, para um tempo de secagem de 200 min.

Variáveis	**Ensaio 4 (sem IV)**	**Ensaio 6 (com IV)**
$IR_{médio}$ (W/m²)	547,00 ± 147,78	427,04 ± 203,18
$T_{p,\ médio}$ (°C)	73,1 ± 8,3	67,5 ± 13,8
$T_{1s,2e\ médio}$ (°C)	51,0 ± 4,2	50,6 ± 7,7
$\Delta T_{coletor,médio}$ (°C)	12,4 ± 2,7	13,7 ± 4,2
$T_{bio,\ médio}$ (°C)	31,5 ± 1,4	31,9 ± 1,3
$\eta_{col,médio}$ (%)	31,30	45,24
$Q_{e,total}$ (J)	167018	212158
$q_{a,médio}$ + P (W)	138,17 ± 30,19	205,6 ± 47,11
$\eta_{sec,médio}$ (%)	10,07	8,60

Observa-se que o valor médio de IR é maior no ensaio E4, o que influencia T_p e a eficiência do coletor. No entanto, parte dos valores de IR nos dois ensaios ficaram dentro do mesmo intervalo, o que justifica que os valores de $\Delta T_{coletor}$ e $T_{2e,}$ não tenham sido significativamente diferentes. Dessa forma, as diferenças nos comportamentos de secagem observados nos dois ensaios podem ser atreladas à presença da radiação infravermelho.

A Figura 0.31 apresenta a curvas de secagem obtidas na menor velocidade do ar, parametrizadas no uso ou não da radiação IV como energia suplementar.

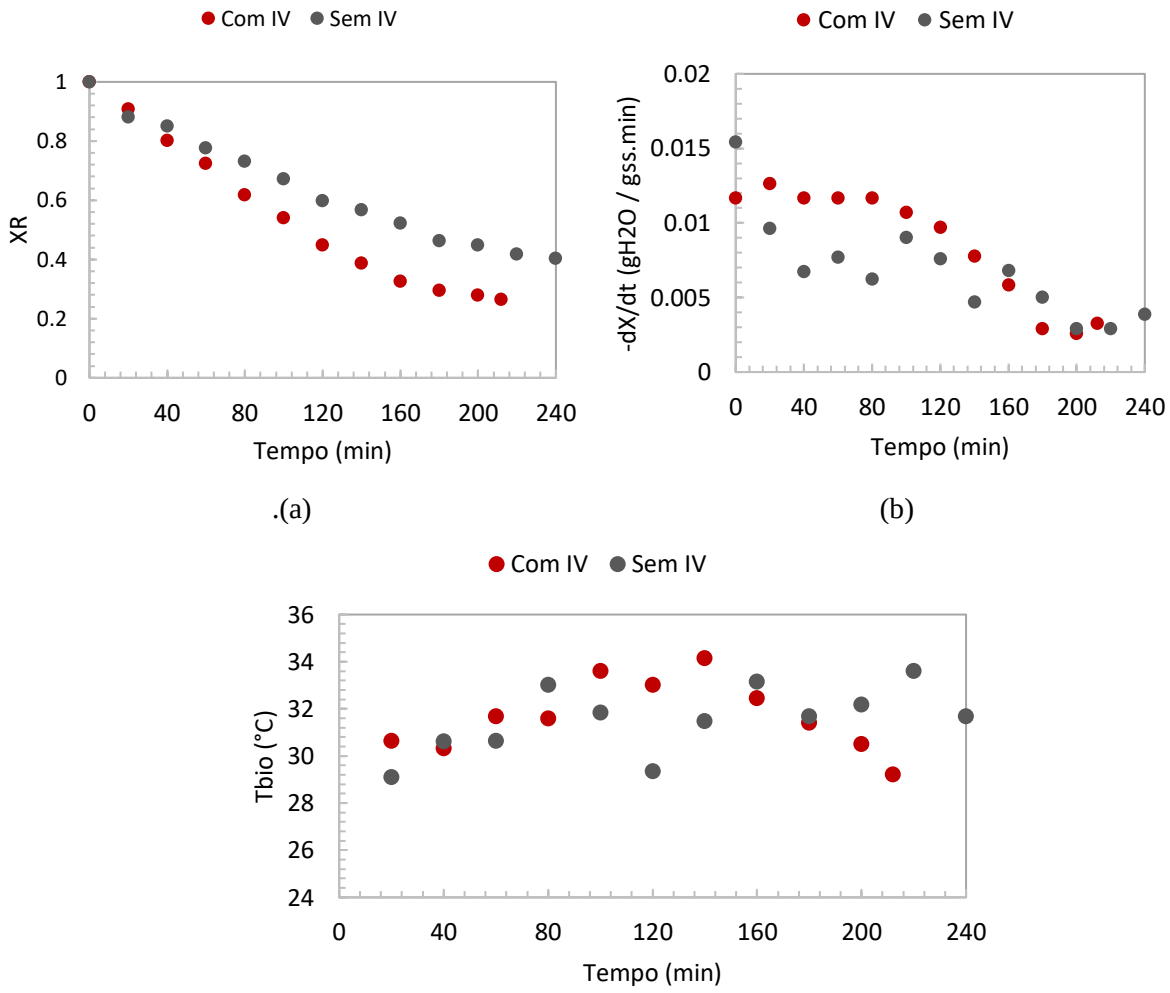


Figura 0.31: Curvas características de secagem dos Ensaios E4 e E6. (a) Adimensional de umidade (XR), (b) Taxa de secagem (-dX/dt), (c) Temperatura da biomassa (T_{bio}).

Com base nas Figura 0.31 (a) e (b) verifica-se que a combinação da radiação IV com o escoamento forçado de ar a uma menor velocidade, 1,3 m/s, resultou praticamente ao longo de

todo o processo em maiores taxas de secagem e reduções de umidade em menores intervalos, diferente do que ocorreu ao empregar uma maior velocidade, 3,7 m/s (E3 e E5). Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de uma menor velocidade de escoamento do ar promover uma menor remoção da umidade superficial do sólido, o que possibilita à migração interna de umidade compensar a evaporação na superfície, mantendo sobre ela, durante um maior tempo, um filme líquido capaz de absorver energia IV e intensificar o processo de secagem da biomassa. Dessa forma, com um o período de taxa constante mais pronunciado, maior é o efeito do uso da radiação IV.

Para um mesmo tempo de 200 min, a maior taxa de secagem provocada pelo uso do aquecimento IV combinado ao escoamento de ar aquecido, resultou em uma quantidade de energia útil para a vaporização 27% maior, ou 45 kJ a mais, que a utilizada empregando somente a convecção forçada de ar quente (Tabela 4.5). Entretanto, o consumo de energia elétrica foi quase 49% maior, o que levou a uma menor eficiência.

4.2.5 Avaliação da melhor condição operacional

Na Tabela 4.6 são sumarizados os valores obtidos para as eficiências, bem como os teores de umidade (b.u) atingidos após um tempo de secagem de 200 min, a fim de determinar o modo e a condição de operação mais adequados.

Tabela 0.6: Dados de desempenho do secador nos ensaios realizados, considerando um tempo de secagem de 200 min.

	Ensaio 3	**Ensaio 4**	**Ensaio 5**	**Ensaio 6**
$\mathbf{X_{b.u}}$ **(%)**	23,77	53,62	21,80	41,49
$\boldsymbol{\eta_{col,médio}}$ **(%)**	52,39	31,30	57,36	45,24
$\boldsymbol{\eta_{sec,médio}}$ **(%)**	12,44	10,07	8,08	8,60

Ao combinar, no Ensaio E5, a radiação infravermelha (P = 50 W) e a velocidade do ar a 3,7 m/s, foram obtidos, em um tempo de 200 min, um menor teor de umidade da biomassa, de 21,8%b.u. e uma maior eficiência do coletor, de 57,36 %. No entanto, em termos de eficiência

de secagem, operar o secador apenas com a convecção forçada de ar aquecido pelo coletor solar, com velocidade de 3,7 m/s, levou a um maior valor, de 12,44%.

Considerando que o objetivo é a secagem e que as diferenças em $X_{b.u}$ e $\eta_{col,}$ não foram significativas, pode-se inferir que o modo de operação ativo e indireto, e a condição de escoamento do ar a 3,7 m/s, foram os mais adequados.

Apesar de não ter mostrado o melhor desempenho, o modo de secagem com uso de energia auxiliar na região do IV pode ser útil em dias nublados ou chuvosos. Uma das alterações que podem ser implementadas para aumentar o seu desempenho é a redução da distância entre a fonte IV e a amostra, a fim de aumentar a densidade de fluxo radiante e intensificar as taxas de transferência de calor e massa para reduzir mais significativamente o tempo, mantendo a mesma potência das lâmpadas e assim o consumo energético, o que pode contribuir para aumentar a eficiência do secador híbrido.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Com base nos objetivos propostos e diante dos resultados obtidos neste trabalho sobre o desenvolvimento e aplicação de um secador solar para a secagem de entrecasca de mandioca, tem-se para as condições operacionais investigadas as conclusões descritas a seguir.

A entrecasca apresentou um teor de umidade entre 70 e 75% b.u. Na sua forma triturada, as partículas de maior fração mássica foram de diâmetro médio de 3,40 mm.

A umidades relativa e a temperatura do ar apresentaram comportamentos coerentes no coletor solar e na cabine de secagem, seguindo o comportamento da irradiação solar. A placa absorvedora corrugada de alumínio (0,8 x 1,0 m) foi capaz de absorver a energia solar e aquecer o ar, com aquecimento médio mínimo de 5,3°C e máximo de 13,7°C. O duto que conecta a saída da cabine entrada do coletor foi comprovadamente bem isolado, visto que não houve variação da temperatura do ar ao escoar por ele até a cabine de secagem.

A temperatura da placa, a temperatura e a umidade relativa do ar ao longo do secador, bem como a temperatura da biomassa, são afetadas diretamente pela variação da irradiação solar durante o dia. Além disso, os ensaios em dias nublados e ensolarados corroboraram a dependência das condições climáticas e atestaram a natureza variável do experimento, devido a fatores não controláveis. No dia ensolarado, obteve-se $IR_{máx}$ = 1040 W/m^2, sendo que no início do experimento,$UR_{1e,enso}$ = 50% ,$UR_{1S,ens}$ = 33% . Já no dia nublado, $IR_{máx}$ =864,5 W/m^2, e no início do processo, $UR_{1e,nub}$ = 70%, $UR_{1s,nub}$= 48%. Esses ensaios preliminares serviram também para identificar que o fluxo de ar dentro da cabine estava concentrado na região central e a ocorrência de flutuações de massa com a porta da cabine fechada. Tal constatação direcionou a realização dos experimentos posteriores com o material centralizado e com a porta da cabine aberta.

Em relação à influência da velocidade do ar, sua redução de 3,7 para 1,3 m/s provocou um maior aquecimento do ar ao passar pelo coletor, de 5,25°C para 12,5°C, nos experimentos sem aquecimento IV, e de 6,9°C para 13,69°C, nos ensaios com aquecimento IV. Apesar disso,

os ensaios com menor velocidade apresentaram menores taxas de secagem, eficiências do coletor e de secagem.

No ensaio E3 (secagem solar indireta com convecção forçada a v_{ar} = 3,7 m/s) obteve-se: $IR_{média}$ = (395,64 ± 257,12) W/m^2, $\eta_{col,médio}$ = 50,01%, $\eta_{sec,médio}$= 10,5%, para um tempo de secagem de 260 min. Já no ensaio E5 (secagem solar indireta com aquecimento infravermelho e v_{ar} = 3,7 m/s): $IR_{média}$ = (381,97 ± 205,54) W/m^2, $\eta_{col,médio}$ = 57,0% e $\eta_{sec,médio}$= 7,5%, para um tempo de 240 min.

O uso da radiação infravermelho, como fonte auxiliar de aquecimento, combinado ao escoamento de ar a 3,7 m/s, causou redução no tempo de secagem, mas aumentou o consumo em 1000 kJ, levando a uma menor eficiência do modo de secagem híbrida.

Ao empregar uma menor velocidade do ar, de 1,3 m/s, tanto na secagem ativa e indireta, como na ativa, indireta e híbrida, o comportamento de secagem da biomassa foi caracterizado por períodos de taxa constante mais pronunciados, levando a uma maior influência da radiação IV sobre a cinética de secagem, em comparação com os experimentos conduzidos com velocidade do ar de 3,7 m/s.

A temperatura atingida pela entrecasca residual da mandioca, em todos os ensaios, ficou próximo de um valor médio de 31ºC, com um desvio menor que 2,5ºC, não havendo, portanto, superaquecimento, o que contribui para a preservação de suas propriedades físicas, físico-químicas e nutricionais, visando as mais diversas aplicações.

As melhores condições de secagem, envolveram o escoamento do ar a 3,7 m/s, aquecido ao passar pelo coletor, combinado ou não com a radiação IV para secar a entrecasca. Ao usar a radiação IV como energia suplementar, menor foi o teor de umidade atingido pela biomassa em um dado tempo e maior a eficiência do coletor. Apesar de intensificar a taxa de secagem e reduzir o tempo do processo, aumentou o consumo de energia, levando a uma menor eficiência do modo de secagem híbrida.

Logo, em termos de custo e eficiência, o melhor desempenho do secador solar desenvolvido foi obtido com o modo indireto-ativo, no qual foi possível atingir o teor de umidade alvo, em torno de 14,7% (b.u), em 260 min de secagem, com uma eficiência de secagem 10,5%.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A partir dos dados do CRESESB (Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito), constatou-se que a irradiação solar máxima em Aracaju ocorre entre outubro e fevereiro. Devido a atrasos na construção e imprevistos os experimentos foram conduzidos entre março e julho de 2024, nos quais a energia solar a irradiação não eram altas. Se os experimentos pudessem ser conduzidos no mês de outubro e fevereiro, maiores eficiências poderiam ter sido alcançadas. Chuvas fortes e tempo nublado foram os maiores problemas durante a coleta de dados no mês de junho e julho. Por isso, poucos experimentos foram realizados, alguns foram interrompidos e a maioria teve muitas oscilações na irradiação solar.

Como sugestões para trabalhos futuros, tem-se:

- A realização de experimentos em menores velocidades, principalmente, nos períodos de alta irradiação;

- Modificação no equipamento, acrescentando mais dutos de ar e aumentar a área de saída, para melhorar a distribuição o fluxo de ar;

-Aumentar a potência da fonte de radiação infravermelho ou reduzir a distância entre a fonte e a amostra;

- Análise da cinética de secagem com base na variação das umidades absolutas do ar, a partir de medidas psicométricas;

- Medição automática e contínua da irradiação solar, para melhor mapeamento deste parâmetro do processo que é muito instável;

- Análises físicas e químicas da biomassa pós secagem, bem como a determinação do calor específico da biomassa, a fim de quantificar a parcela da energia fornecida pelo ar na forma de calor sensível;

- Modelagem matemática do processo de secagem solar.

REFERÊNCIAS

ABEDINI, E.; HAJEBZADEH, H.; MIRZAI, M. A.; ALAHDADI, A. A.; AHMADI, H. M.; SALEHI, M. A.; ZAKERI, M. Evaluation of operational parameters for drying shrimps in a cabinet hybrid dryer. **Solar Energy**, v. 233, p. 221-229, 2022.

ABUBAKAR, S., UMARU, S., KAISAN, M.U., UMAR, U.A., ASHOK, B., NANTHAGOPAL, K. Development and performance comparison of mixed-mode solar crop dryers with and without thermal storage. **Renew Energy**. v .128, p. 285-298, 2018.

ARDUÍNO. Disponível em https://www.arduino.cc/. Acesso em 15 jul. 2024.

ASKELAND, D. R.; PHULE, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: CENGAGE, 2008.

BENHAMZA, A.; BOUBERKRI, A.; ATIA, A.; FEROUALI, H. E.; HABIDI, T.; ARICI, M.; ABDENOURI, N. Multi-objective design optimization of solar air heater for food drying based on energy, exergy and improvement potential. **Renewable Energy**, v. 169, p.1190-1209, 2021.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008.

CARIOLY, G. Tese de mestrado da UFAL transforma casca da macaxeira em combustível. 04 nov. 2019. Disponível em: https://abam.com.br/tese-de-mestrado-da-ufal-transforma-casca-da-macaxeira-em-combustivel/. Acesso em: 12 jul. 2024.

CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A.; CALIARI, M.; JÚNIOR, M. S. S. Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** p. 987-994, 2013.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 1018 p.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**, 4ª ed. Porto Alegre, RS: McGrawHill, 2012. 903 p.

CÉSAR, L. V. E.; LILIA, C. M. A.; OCTAVIO, G. V.; ISAAC, P. F.; ROGELIO, B.O. Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*). **Renewable Energy**, v. 147, n. 1, p. 845-855, 2020.

CHAVAN, A.; VITANKAR, A.; MUJUMDAR, A.; THORAT, B. Natural convection and direct type (NCDT) solar dryers: a review. **Drying Technology,** v. 39, n. 13, p. 1969-1990, 2021.

CHOJNACKA, K.; MIKULA, K.; IZYDORCZYK, G.; SKRZYPCZAK, D.; WITEK-KROWIAK, A.; MOUSTAKAS, K.; LUDWIG, W.; KUŁAŻYŃSKI, M. Improvements in drying technologies - Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission. **Journal of Cleaner Production**, v. 320, Article 128706, 2021.

CONAB – Campanha Nacional de abastecimento. Histórico mensal da mandioca 2022. Disponível em < https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-mandioca> Acesso em 10 jan. 2023.

D'AUSILIO, A. Arduino: a low-cost multipurpose lab equipment. **Behavior Research Methods,** v. 44, n. 2, p. 305-313, 2016.

DAS, I.; DAS, S.K. Emitters and Infrared Heating System Design. In: ATUNGULU, G. G.; PAN, Z. (eds). **Infrared Heating for Food and Agricultural Processing**. Chap 4. New York: CRC Press, 2010.

DJEBLI, A.; HANINI, S.; BADAOUI, O.; BOUMAHDI, M. A new approach to the thermodynamics study of drying tomatoes in mixed solar dryer. **Solar Energy**, v. 193, n. 15, p. 164–174, 2019.

DUFFIE, J.A; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**, 4ª ed. John Wiley & Sons, Inc: Estados Unidos, 2013, 910 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Subprodutos da mandioca - composição dos resíduos sólido, 2005.

ENAIME, G.; LÜBKEN, M..Agricultural Waste-Based Biochar for Agronomic Applications – A review. **Applied science**, v. 11, n. 19, Article 8914, 2021.

ENGEL, J. B.; LUCHESE, C. L.; TESSARO, I. C. How are the properties of biocomposite foams influenced by the substitution of cassava starch for its residual sources? **Food Hydrocolloids.** v.118, Article 106790, 2021.

FAJARDO, J. G. S.; RAMOS, E. J. H.; LAMBERT, G. F.; HERAZO, L. C. S.; PIZARRO, R. D. A. Post-industrial context of cassava bagasse and trend of studies towards a sustainable industry: A scoping review – Part I. **F1000Research**, v.11. Article 562, 2022a.

FAJARDO, J. S; GUERRERO, D. N.; PADILLA, C. S.; RAMOS. E. H.; LAMBERT, G. F. Assessment of Parameters to Apply Osmotic Dehydration as Pretreatment for Improving the Efficiency of Convective Drying of Cassava Bagasse. **Applied Science**, v.12, Article 12101, 2022b.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodityL>. Acesso em: 20 ago. 2024.

FELISARDO, R. J. A.; DOS SANTOS. G. N.; GALRÃO, D.G. Uso do arduino como ferramenta de prototipagem para desenvolvimento de dispositivos automáticos: uma revisão. Cadernos da graduação: Ciências exatas e tecnológicas. Aracaju. v.8, n.1, p. 11-26, 2023.

GILAGO, M. C.; CHANDRAMOHA, V. P. Performance parameters evaluation and comparison of passive and active indirect type solar dryers supported by phase change material during drying ivy gourd. **Energy**, v. 252, Article 123998, 2022.

GOUD, M.; REDDY, M. V. V; CHANDRAMOHAN, V. P.; SURESH, S. A novel indirect solar dryer with inlet fans powered by solar PV panels: Drying kinetics of Capsicum Annum and Abelmoschus esculentus with dryer performance. **Solar Energy**, v. 194, p. 871–85, 2019.

GUPTA, A.; BISWAS, A.; DAS, B.; REDDY, B. V. Development and testing of novel photovoltaic-thermal collector-based solar dryer for green tea drying application. **Solar Energy**, v. 231, p. 1072–1091, 2022.

HASANZADEHA, R.; AZDASTA, T.; LEE, P. C.; PARK, C. B. A review of the state-of-the-art on thermal insulation performance of polymeric foams. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 41, Article 101808, 2023.

HEGDE, V.N.; HOSUR, V.S.; RATHOD, S.K.; HARSOOR, P.A.; NARAYANA, K.B. Design, fabrication and performance evaluation of solar dryer for banana. **Energy, Sustainability and Society**. v. 5, n.1, 2015.

HODGE, B. K. **Alternative Energy Systems and Aplications**.1ª ed. Mississippi: Jonh Wiley & Sons, Inc., 2010. 417 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores. Estatística da Produção Agrícola municipal – Culturas temporárias e permanentes 2022. Disponível em: < https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-

agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques> Acesso em: 22 ago. 2024.

INCROPERA, F.P.; BERGMAN, T.L.; DEWITT, D. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 6ª ed., Rio de Janeiro-RJ: LTC, 643 p., 2008.

JUN, S.; KRISHNAMURTHY, K.; IRUDAYARAJ, J.; DEMIRCI, A. Fundamentals and Theory of Infrared Radiation. In: ATUNGULU, G. G.; PAN, Z. (eds). **Infrared Heating for Food and Agricultural Processing**. Chap. 1. New York: CRC Press, 2010.

KHANLARI, A.; SOZEN, A.; CSIRIN, C.; TUNCER, A.D.; GUNGOR, A. Performance enhancement of a greenhouse dryer: analysis of a cost-effective alternative solar air heater. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, n.1, Article 119672, 2020.

KOCABIYIK, H. Combined Infrared and Hot Air Drying. In: ATUNGULU, G. G.; PAN, Z. (eds). **Infrared Heating for Food and Agricultural Processing**. Chap 6. New York: CRC Press, 2010.

KONDAVEETI, H. K.; KUMARAVELU, N. K; VANAMBATHIN, S. D.; MATHE, A. E.; VAPPANGI, S. A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations. **Computer Science Review**, v. 40, Article 100364, 2021.

KOSASIH, E. A.; ZIKRI, A.; DZAKY, M.I.; Effects of drying temperature, airflow, and cut segment on drying rate and activation energy of elephant cassava. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 19, Article 100633, 2020.

KRABCH, H.; TADILI, R.; IDRISSI, A.Design, realization and comparison of three passive solar dryers. Orange drying application for the Rabat site (Morocco). **Results in Engineering**, v. 15, Article 100532, 2021.

LI, A.; QIAO, S.; XIA, M.; LIN, Y.; WNAG, L.; XIE, Y.; LI, J.; LI; X**.** Medium and short-wave infrared drying: Principles, applications, and future trends. **Drying Technology,** v. 41, n. 10, p. 1569-1582, 2023.

LINGAYATA, A.; BALIJEPALLI, R.; CHANDRAMOHA, V.P. Applications of solar energy based drying technologies in various industries – A review. **Solar Energy**, v. 229, p. 52-68, 2021.

LINGAYATA, A.; CHANDRAMOHA, V.P.; RAJU, V. R. K; MEDA, V. A review on indirect type solar dryers for agricultural crops –Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights. **Applied Energy**, v.258, Article 114005, 2020.

MATOS, A. C.; JÚNIOR, J. B. G.; BORGES, C. C.; MATOS, L. C.; FERREIRA, J.C.; MENDES, L. M. Influência de diferentes composições de lâminas de Schizolobium parahyba var. amazonicum (Huber ex Ducke) Barneby e Pinus oocarpa var. oocarpa (Schiede ex Schltdl) para produção de compensados multilaminados. **Scientia Forestalis**, v.47, n.124, p. 799-810, 2019.

MEWA, E. A.; OKOTH, M. W.; KUNYANGA, C. N.; RUGIRI, M. N. Experimental evaluation of beef drying kinetics in a solar tunnel dryer. **Renewable Energy**, v. 139, p. 235–241, 2019.

MIRZAEI, S.; AMERI, A.; MOTEZAPOUR, H. Comparative energy-exergy and economicenvironmental analyses of recently advanced solar photovoltaic and photovoltaic thermal hybrid dryers: a review. **Drying Technology**. 2022

MIRZAEI, S.; AMERI, A.; ZIAFOROUGHI, A.Energy-exergy analysis of an infrared dryer equipped with a photovoltaic-thermal collector in glazed and unglazed modes. **Renewable Energy,** v. 169, p. 542-596, 2021.

MOHANA, Y.; MOHANAPRIYA, R.; ANUKIRUTHIKA, T.; YOHA, K.S.; MOSES, J.A.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. **Solar Energy**, v. 208, p. 321-344, 2020.

MUGI, V. R.; CHANDRAMOHA, V. P. Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of passive and active-modes indirect type solar dryers while drying guava slices. **Sustainable Energy Technologies and Assessments Journal**, v. 52, Article 1002250, 2022.

OBONUKUT, M.; ALABI, S.; JOCK, A. Biochar from Cassava Waste: A Paradigm Shift from Waste to Wealth. In: BARTOLI, M.; GIORCELLI, M.; TAGLIAFERRO, A. (eds). **Biochar - Productive Technologies, Properties and Applications**. Chap 3. Italia: IntechOpen, 2023.

OLADEJO, A. O.; EKPENE, A. A. M.; ONWUDE, D. I.; ASSIAN, U. E.; NKEM, O. M. Effects of ultrasound pretreatments on the drying kinetics of yellow cassava during convective hot air drying. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 15, Article 152551, 2021.

OLIVEIRA, D. I.; DEMOGALSKI, L.; DIAS, A. H; PEREIRA, L. A. A.; ALBERTI, A.; LOS, P. L.; DEMIATE, I. M. Traditional sour cassava starch obtained with alterations in the solar drying stage . **Food Science and Technology**, v. 41, n. 1, p. 319-327, 2021.

ONA, J. I.; HALLING P. J.; BALLESTEROSC M. Enzyme hydrolysis of cassava peels: treatment by amylolytic and cellulolytic enzymes. **Biocatalysis and biotransformation,** v.37, p. 77-85, 2018

PANGHAL, A.; MUNEZERO, C.; SHARMA, P.; CHHIKARA, N. Cassava toxicity, detoxification and its food applications: a review. **Toxin Reviews**, v. 40, n. 1, p. 1–16, 2021.

PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. Secagem: fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais,** v. 16, n. 1, p. 93-127, 2014.

PATTIYA A, TITILOYE J, BRIDGEWATER A. Fast pyrolysis of agricultural residues from cassava plantations for bio-oil production. **Asian Journal on Energy and Environment**, v. 8, n. 2, p .496-502, 2007.

PATTIYA A. Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor. **Bioresource Technology**, v. 102, p 1959-1967, 2011.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PERREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, 2ª ed. INPE: São José dos Campos, 2017, 80 p.

PROSAPIO, V.; NORTON, I. Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze-drying performance. **LWT - Food Science Technology,** v. 80, p. 401–408, 2017.

RABHA, D.K.; MUTHUKUMAR, P. Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax–based latent heat storage system. **Solar Energy**. v. 149, p. 214-226, 2018.

RAHMAN, M. M.; RAHMAN, M. M.; SALAM, K. A. **Design, construction and performance study of an indirect type solar dryer for food preservation**. 2017. Thesis (bachelor of Mechanical Engineering). Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET). Bangladesh, 2017.

REZVANI, Z.; MORTEZAPOUR, H.; AMERI, A.; AKHAVAN, H. R.; ARSLAN, S. Energy and exergy analysis of a water bed-infrared dryer coupled with a photovoltaic-thermal collector. **Journal of Food Processing Engeneering**, v. 45, n. 8, Article e14058, 2022.

RIBEIRO, J. de. M. O sistema produtivo de mandioca e seu aproveitamento industrial no estado da Bahia. Mandioca: a raiz necessária ao consumo! Belo Horizonte: Editora Dialética, 2021

RUEANGSAN, K.; KRAISODA, P.; HEMAN, A.; TASAROD, H.; WANGKULANGKOOL, M.; TRISUPAKITTI, S.; MORRIS, J. Bio-oil and char obtained from cassava rhizomes with soil conditioners by fast pyrolysis. **Heliyon**, v. 7, n. 11, Article e08291, 2021.

SANTOS, G. C.; PIMENTEL, J. A B. Análise espacial da volumetria de virola em floresta extrativista no município de Castanhal, Pará-Brasil. **Brazilian Journal of Business,** v.5, n.1, p. 728-734, 2023.

SEBRAE Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Os produtos da manipueira: Cartilha sobre resíduos de mandioca. Brasília, v.1, p. 36, 2015.

SHACKELFORD, J. E. **Ciência dos Materiais**. São Paulo: Prentice Hall, 2008.

SHAIK, S.; BHARDWA, J. M.; AGARWAL, S.; YENDALURU, R. S.; HASANUZZAMAN, M.; SHARMA K.V. Evaluation of optical transmissivity of transparent materials on the performance of solar flat plate collectors. **Journal of Solar Energy Engineering,** v. 143, n. 5, Article 054501, 2021.

SHARMA, V. K.; ANYANWU, C. N. Design analysis and studies on some solar drying systems. In: PRAKASH, O.; KUMAR, A. (eds). **Solar Drying Technology: Concept, Design, Testing, Modeling, Economics, and Environment.** Chap 6. India: Springer Nature, 2017

SHEKAR, H. S. S.; RAMACHANDRA, M. Green composites: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 1, p. 2518–2526, 2018.

SINGH, P.; GAUR, M. K. Review on development, recent advancement and applications of various types of solar dryers. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental**, v. 46, n. 1, p. 14471-14491, 2020.

SOUTO, L. R. F.; CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR, M. S.; FIORDA, F. A.; GARCIA, M. C. Utilization of residue from cassava starch processing for production of fermentable sugar by enzymatic hydrolysis. **Food Science and Technology**, v. 37, n.1, p. 19–24, 2017.

TEIXEIRA, S. T.; ALVES, L. S.; SILVA, A. L. F; ÁLVARES, V. S.; FELISBERTO, F. A. V. Comunicado técnico da Embrapa: Reciclagem Agrícola de Manipueira e Casca de Mandioca. Rio Branco, 2011.

VEERAMANIPRIYA, E.; SUNDARI, A. R. U. Performance evaluation of hybrid photovoltaic thermal (PVT) solar dryer for drying of cassava. **Solar Energy**, v. 215, p. 240-251, 2021.

VERA, F. H. C.; SORIANO, A. N.; DUGOS, N. P.; RUBI, R. V. C. Comprehensive review on the drying kinetics of common tubers. **Applied Science and Engineering Progress**, v. 14, n.2, p. 146-155, 2021.

VIJAYAN, S.; ARJUNAN, T.V.; KUMAR, A. Fundamental concepts of drying. In: PRAKASH, O.; KUMAR, A. (eds). **Solar Drying Technology: Concept, Design, Testing, Modeling, Economics, and Environment.** Chap 1. India: Springer Nature, 2017.

VILHALVA D. A. A.; SOARES JÚNIOR M. S.; CALIARI M.; SILVA F. A. DA. Secagem convencional de casca de mandioca proveniente de resíduos de indústria de amido. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 3, p. 331-339, 2012.

VILLALVA, G. M. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**, 2ª ed. Érica: São Paulo, 2015, 224 p.

WARJI, W.; TAMIRIM, T. Hybrid dryer of cassava chips. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE AGRICULTURE AND BIOSYSTEM. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, v. 757, Article 12027, 2021.

WESTPHAL, F. S**. Manual técnico do vidro plano para edificações.** ABIVIDRO, 2016.

WESTPHAL, F. S**. Vidro plano para edificações,** 1ª ed. São Paulo, SP: Oficina de textos, 2022.

YUE, H.; MAI, L.; XU, C.; YANG, C.; SHUTTLEWORTH, P. S.; CUI, Y. ,Recent advancement in bio-based adhesives derived from plant proteins for plywood application: A review. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**. v. 33, Article 101143, 2023.

ZIAFOROUGHI, A.; ESFAHANI, J. A. A salient reduction of energy consumption and drying time in a novel PV-solar collector-assisted intermittent infrared dryer. **Solar Energy**, v. 136, p. 428-436, 2016.

ZULKIFLI, N. N.; KARIM, L. Biorefinery approach for cassava peels: A review. **Malaysian Journal of Science, Health & Technology,** v. 8, n.12, p. 1-8, 2022.

APÊNDICE A

Metodologia de cálculo

Os parâmetros considerados constantes para o cálculo são descritos abaixo, sendo que Q_{LH}, ρ_{ar} e $C_{P,ar}$ foram extraídos de Çengel e Ghajar (2012) a 40°C, valor médio da temperatura de entrada e saída do coletor:

Q_{LH} = 2257 J/g;

ρ_{ar} = 1,127 kg/m^3;

$C_{P,ar}$ = 1007 J/kg K

Dimensões do coletor =1 m x 0,80 m; A_C = 0,8 m²

d_{duto} = 0,1 m; A_{duto} = 0,00785 m^2

P_{IV} = tensão x corrente= (10 V) x (5 A) = 50 W

Para v_{ar} =3,7 m/s:

(Eq. 2): $\dot{m}_{ar}$= 1,127 x 3,7 x 0,00785= 0,0326 kg/s

(Eq. 6): P_{vent}= 1,6579 x 3,7^2 - 5,0035 x 3,7 + 4,7156= 8,9 W

Para v_{ar} = 1,3 m/s

(Eq. 2) $\dot{m}_{ar}$= 1,127*1,3 x 0,00785 = 0,0113 kg/s

(Eq. 6) P_{vent}= 1,6579x 1,3^2 - 5,0035 x 1,3 + 4,7156 = 1,01 W

Os dados de variáveis/parâmetros envolvidos no cálculo das eficiências dos Ensaios 3, 4, 5 e 6 são apresentadas a seguir em tabelas, juntamente com seus valores médios avaliados no tempo total de secagem e em um tempo inferior fixo de 200 min, comum a todos os experimentos. Isso objetivou permitir uma comparação das eficiências de todos os ensaios supracitados, incluindo aqueles que foram interrompidos por alterações das condições

climáticas e que o teor de umidade alvo da biomassa não foi atingido. Para os Ensaios 1 e 2 não foram realizados os cálculos devido à não uniformidade do fluxo de ar e do teor de umidade do produto obtidos.

Na Tabela A1, encontram-se sumarizados os dados utilizados para calcular as eficiências do Ensaio E3.

Tabela A1: Dados utilizados para cálculo das eficiências do Ensaio E3 (v_{ar} = 3,7 m/s).

Tempo (min)	**IR (W/m²)**	**ΔT (°C)**	**q_a (J/s)**	**A*IR (J/s)**	**m_w (g)**	**Q_e (J)**	**$q_a + P_{vent}$ (J/s)**
0	152,50	5,5	180,57	122,00	180	0	189,47
20	726,50	2,5	82,08	581,20	160	45140	90,98
40	77,00	4,2	137,89	61,60	150	22570	146,79
60	686,50	7,0	229,82	549,20	132	40626	238,72
80	732,50	7,3	239,67	586,00	116	36112	248,57
100	174,50	8,8	288,91	139,60	104	27084	297,81
120	691,50	3,9	128,04	553,20	92	27084	136,94
140	167,00	4,2	137,89	133,60	80	27084	146,79
160	213,50	4,7	154,31	170,80	72	18056	163,21
180	645,50	4,2	137,89	516,40	64	18056	146,79
200	260,00	5,5	180,57	208,00	60	902	189,47
220	627,50	2,0	65,66	502,00	56	9028	74,56
240	287,50	5,2	170,72	230,00	54	4514	179,62
260	97,00	2,5	82,07	77,6	54	0	90,97
Média ou *somatório (260 min)	**395,64**	**4,82**	**158,29**	**316,51**	**-**	***284382**	**173,05**
Média ou *somatório (200 min)	**411,55**	**5,25**	**172,51**	**329,24**		***270840**	**181,41**

O cálculo de q_a para cada tempo é feito aplicando a Equação (1) e depois faz-se a média dos valores, ou calcula-se a média das variáveis ΔT e IR para obter $q_{a,médio}$ e $\eta_{col,médio}$, como mostrado a seguir considerando o tempo de 260 min.

(Eq. 1): $q_{a,médio} = 0{,}0326 \times 1007 \times 4{,}82 = 158{,}29$ J/s

$A_C \times IR_{médio} = 0{,}8 \times 395{,}64 = 316{,}51$ J/s

(Eq. 3): $$\eta_{col,médio} = \frac{158,29}{316,51} = \ 50,01\%$$

O cálculo de Q_e pode ser feito considerando a perda de massa de água a cada 20 min e depois fazendo o somatório das energias requeridas em cada tempo para a vaporização, ou usa-se o total da massa de água removida (m_w) no referido tempo de secagem para determinar o total de Q_e e $\eta_{sec,médio}$.

(Eq. 4) $$Q_{e,total} = 2257 \times (180 - 54) = 2257 \times 126 = 284382,00 \text{ J}$$

$$(q_{a,médio} + P_{vent}) \text{ x t} = (158,29 + 8,9) \text{ x } 15600 = 173,05 \text{ x } 15600 = 2699648,16 \text{ J}$$

(Eq. 5) $$\eta_{sec,médio} = \frac{284382,00}{2699648,16} = 10,53\ \%$$

Na Tabela A2 são apresentados os dados utilizados para calcular as eficiências do Ensaio E4.

Tabela A2: Dados utilizados para cálculo das eficiências do Ensaio E4 (v_{ar} = 1,3 m/s).

Tempo (min)	**IR (W/m²)**	**ΔT (°C)**	**q_a (J/s)**	**A*IR (J/s)**	**m_w (g)**	**Q_e (J)**	**$q_a + P_{vent}$ (J/s)**
0	310,50	14,7	163,32	248,40	186	0	164,33
20	655,50	10,1	112,21	524,40	170	36112	113,22
40	620,00	14,1	156,65	496,00	166	9028	157,66
60	539,50	13,5	149,98	431,60	156	22570	151,00
80	631,00	15,8	175,54	504,80	150	13542	176,55
100	140,00	15,0	166,65	112,00	142	18056	167,66
120	625,50	8,2	91,10	500,40	132	22570	92,11
140	625,00	13,5	149,98	500,00	128	9028	151,00
160	619,50	12,8	142,21	495,60	122	13542	143,22
180	681,50	10,9	121,10	545,20	114	18056	122,11
200	576,00	7,2	79,99	460,80	112	4514	81,00
220	572,00	8,2	91,10	457,60	108	9028	92,11
240	515,00	6,1	67,77	412,00	106	4514	68,78
Média ou *somatório (240 min)	**547,00**	**11,55**	**128,28**	**437,60**	**-**	***180560**	**129,29**
Média ou *somatório (200 min)	**547,64**	**12,35**	**137,16**	**438,11**	**-**	***167018**	**138,17**

Para o tempo de 200 min:

(Eq. 1) $q_{a,médio} = 0{,}0113 \times 1007 \times 12{,}35 = 137{,}16$ J/s

$A_C{*}IR_{médio} = 0{,}8 \times 547{,}64 = 438{,}11$ J/s

(Eq. 3) $$\eta_{col,médio} = \frac{137{,}16}{438{,}11} = 31{,}30\%$$

(Eq. 4) $Q_{e,total} = 2257 \times (186 - 106) = 2257 \times 80 = 167018$ J

$(q_{a,médio} + P_{vent}) \times t = (137{,}16 + 1{,}01) \times 12000 = 138{,}26 \times 12000 = 1659120$

(Eq. 5) $$\eta_{sec,médio} = \frac{167018}{1659120} = 10{,}07\ \%$$

Os dados obtidos para calcular as eficiências do Ensaio E5 são apresentados na Tabela A3.

Tabela A3: Dados utilizados para cálculo das eficiências do Ensaio E5 (P_{IV} = 50 W, v_{ar} = 3,7 m/s).

Tempo (min)	**IR (W/m²)**	**ΔT (°C)**	**q_a (J/s)**	**A*IR (J/s)**	**m_w (g)**	**Q_e (J)**	**$q_a + P_{vent} + P_{IV}$ (J/s)**
0	710,00	7,1	229,38	568,00	186	0	289,79
20	258,50	6,8	219,69	206,80	164	49654	280,09
40	616,00	6,9	222,92	492,80	148	36112	283,33
60	364,50	6,9	222,92	291,60	124	54168	283,33
80	399,00	8,6	277,84	319,20	112	27084	338,25
100	630,50	8,7	281,07	504,40	102	22570	341,48
120	603,50	8,6	277,84	482,80	92	22570	338,25
140	576,00	7,4	239,07	460,80	82	22570	299,48
160	597,00	6,5	209,99	477,60	78	18056	270,40
180	365,50	4,8	155,07	292,40	72	13542	215,48
200	237,00	3,8	122,77	189,60	66	9028	183,17
220	162,00	2,1	67,84	129,60	64	4514	128,25
240	148,00	1,8	58,15	118,40	64	0	118,56
Média ou *somatório (240 min)	**435,96**	**6,15**	**198,81**	**348,77**	**-**	***279868**	**259,22**
Média ou *somatório (240 min)	**487,05**	**6,92**	**223,50**	**389,64**		***275354**	**283,91**

Para o tempo total de secagem de 240 min:

(Eq. 1) $q_{a,médio} = 0{,}0326 \times 1007 \times 6{,}15 = 198{,}8$ J/s

$A_C * IR_{médio} = 0{,}8 \times 435{,}96 = 348{,}7$ J/s

(Eq. 3) $$\eta_{col,médio} = \frac{198{,}8}{348{,}7} = 57{,}0\ \%$$

(Eq. 4) $Q_{e,total} = 2257 \times (186 - 64) = 2257 \times 122 = 279868$ J

$(q_{a,médio} + P) \times t = (198{,}8 + 8{,}9 + 50) \times 14400 = 257{,}7 \times 14400 = 3710880$ J

(Eq. 5) $$\eta_{sec,médio} = \frac{279868}{3710880} = 7{,}49\ \%$$

Os dados obtidos para calcular as eficiências do Ensaio E6 são apresentados na Tabela A4.

Tabela A4: Dados utilizados para cálculo das eficiências do Ensaio E6 (P_{IV} = 50 W, v_{ar} = 1,3 m/s).

Tempo (min)	**IR (W/m²)**	**ΔT (°C)**	**q_a (J/s)**	**A*IR (J/s)**	**m_w (g)**	**Q_e (J)**	**$q_a + P_{vent} + P_{IV}$ (J/s)**
0,00	610,00	17,8	200,97	488,00	182	0	251,98
20,00	552,00	11,5	129,84	441,60	170	27084	180,85
40,00	175,00	20,0	225,81	140,00	156	31598	276,82
60,00	624,00	15,2	171,61	499,20	146	22570	222,63
80,00	621,50	15,8	178,39	497,20	132	31598	229,40
100,00	645,50	17,1	193,06	516,40	122	27084	244,08
120,00	501,00	15,0	169,35	400,80	110	22570	220,37
140,00	479,00	13,3	150,16	383,20	102	18056	201,17
160,00	163,50	11,5	129,84	130,80	94	18056	180,85
180,00	155,50	8,6	97,10	124,40	90	9028	148,11
200,00	170,50	4,8	54,19	136,40	88	4514	105,21
Média ou somatório (200 min)	**427,05**	**13,69**	**154,57**	**341,64**		**212158**	**205,59**

Para o tempo total de secagem 200 min:

(Eq. 1) $q_{a,médio} = 0{,}0113 \times 1007 \times 13{,}69 = 154{,}57$ J/s

$A_C * IR_{médio} = 0{,}8 \times 427{,}05 = 341{,}64$ J/s

(Eq. 3) $$\eta_{col,médio} = \frac{154{,}57}{341{,}641} = 45{,}24\ \%$$

(Eq. 4) $Q_{e,total} = 2257 \times (182 - 88) = 2257 \times 94 = 212158$ J

$(q_{a,médio} + P) \times t = (154{,}57 + 1{,}01 + 50) \times 12000 = 205{,}8 * 12000 = 2469600$

(Eq. 5) $$\eta_{sec,médio} = \frac{212158}{2469600} = 8{,}6\ \%$$

APENDICE B

Levantamento de trabalhos da literatura sobre o tema

Tabela B1: Sumário de trabalhos publicados nos últimos anos sobre a secagem solar.

Tipo de secador	Autor/ano	Biomassa	Características da placa absorvedora e coletor	Dimensões do coletor (cm)	Material da cabine	Dimensões da cabine (cm)	Posição do ventilador	IV
Secador passivo indireto	Essalhi *et al. (2018)*	Uva	Placa: 2 placas corrugadas U de alumínio no plano central Material do coletor: não especifica	Não especifica	Não especifica	Não especifica	-	-
Secador passivo indireto e secador direto	Krabch (2022)	Fatias de laranja	Placa :Corrugada U de alumínio no centro do coletor Material do coletor: corpo de metal isolado	121×96×sem altura	Madeira Trespa	218× 96× sem profundidade	-	-
Secador passivo híbrido (indireto + IV intermitente)	Ziaforoughi e Esfahani (2016)	Batata	Placa: perfurada com aletas horizontais Material do coletor: não especifica	Não especifica	Não especifica	Não especifica	-	175 W
Secador passivo misto e hibrido: (indireto + direto + IV)	Albedini *et al. (2022)*	Camarão	Placa: corrugada no centro do coletor Material do coletor: não especifica	120×100×16	Não especifica	100×60×60	-	250 W

Secador ativo indireto	Morshed (2017)	Batata	Placa: malha fina inclinada pintada de preto de alumínio. Material do coletor: Corpo de madeira compensada isolada com espuma de polietileno	100×80×20	Madeira compensada com isolamento de espuma de polietileno	66×53×40	Saída do coletor (sucção para a cabine)	-
Secador ativo indireto	Etim *et al.* (2019, 2020)	Banana	Placa: não especifica Material do coletor: Corpo de madeira compensada isolada com serragem	Não especifica	Madeira compensada com isolamento de serragem	Não especifica	Entrada do coletor (sucção) 3,6 W 12 V 0,3 A	-
Secador ativo indireto	Zoukitt *et al.* (2019) Benhamza *et al.* (2021)	-	Placa: plana aletada de Alumínio no centro do coletor Isolamento do coletor: lã de vidro	200×100×sem altura	Placa de ferro galvanizado com isolamento de fibra mineral ou lã de vidro	100×100× sem profundidade	Fundo da cabine (exaustão)	-
Secador ativo indireto	Goud *et al.* (2019) Mugi e Chandramohan (2021, 2022) Gilago e Chandramohan (2022)	Quiabo e pimenta verde	Placa: corrugada V de cobre na base do coletor Isolamento do coletor: lã de rocha	200×105×7	Alumínio com isolamento de Thermocol Shet	105× 85× 40	Entrada do coletor (sucção) 12 V 0,25 A 3 cooler	-
Secador ativo puramente direto combinado com puramente indireto	Chaouch *et al.* (2018)	Carne de camelo	Placa: plana de metal na base do coletor Material do coletor: não especifica	95×100×4	Resinas de madeira de parede dupla, com uma camada	Não especifica	Fundo da cabine (exaustão) 6 W, 240 V	-

					intermediária de poliestireno			
Secador ativo misto	Onwualu (2017)	Tomate	Placa: plana de aço macio Material do coletor: não especifica	68,3×62,4×sem altura	Vidro	120×60×29,3	Entrada do coletor (sucção)	-
Secador ativo misto	Gupta (2022)	Folhas de chá verde	Placa: corrugada U de alumínio na base do coletor Material do coletor: Corpo de MDF isolada com espuma de poliuretano	205×108×12	Madeira com Isolamento de espuma de poliuretano	140×80×60	Saída do coletor (sucção para a cabine) 12 V 0,75 A	
Secador ativo hibrido (indireto + IV)	Mirzaei *et al.* (2022)	Fatias de batata	Placa: plana de alumínio no centro do coletor Material do coletor: corpo de MDF isolada com fibra e lã de vidro	195×54×35	Madeira com isolamento de lã de vidro	60×45×13	Entrada do coletor (sucção)	100 W
Secador ativo hibrido (indireto + IV) tipo esteira e Refractance window™ (usa água)	Rezvani *et al.* (2022)	Laranja	Placa: Passe duplo na base do coletor Material do coletor: não especifica	160×84×sem altura	Não especifica	Não especifica	Saída do coletor (sucção para a cabine) 40 W	200 W