

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia

Mateus Santos Nepomuceno

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SECAGEM
UTILIZANDO SECADOR SOLAR COM DIFERENTES
FORMATOS DE PLACA ABSORVEDORA**

Belo Horizonte

2019

Mateus Santos Nepomuceno

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SECAGEM
UTILIZANDO SECADOR SOLAR COM DIFERENTES
FORMATOS DE PLACA ABSORVEDORA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, em associação ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del Rei, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

Orientador: Prof. Dr. André Guimarães Ferreira.

Belo Horizonte

2019

Mateus Santos Nepomuceno

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SECAGEM
UTILIZANDO SECADOR SOLAR COM DIFERENTES
FORMATOS DE PLACA ABSORVEDORA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, em associação ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del Rei, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

Banca examinadora

Prof. Dr. _____

André Guimarães Ferreira

Prof. Dr. _____

Paulo Eduardo Lopes Barbieri

Prof. Dr. _____

Lucas Paglioni Pataro Faria

N441a Nepomuceno, Mateus Santos
Análise teórico-experimental de secagem utilizando secador solar com diferentes formatos de placa absorvedora. / Mateus Santos Nepomuceno. -- Belo Horizonte, 2019.
98f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia em associação ampla com a Universidade Federal de São João Del Rei, 2019.

Orientador: Prof. Dr. André Guimarães Ferreira
Bibliografia

1. Eficiência Energética. 2. Exergia. 3. Secadores Solares. I. Ferreira, André Guimarães. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 621.042

Dedicatória

Dedico este trabalho à Deus, por sempre olhar por mim.

Dedico também aos meus pais e à minha namorada, por sempre acreditarem nos meus esforços.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus, por me dar forças e não me deixar desistir nos momentos de dificuldade.

Agradeço ao Prof. Dr. André Guimarães Ferreira, pelos inúmeros conhecimentos passados desde as disciplinas cursadas, além da compreensão, apoio, incentivo, ajuda, educação e paciência em todos os momentos desta caminhada.

Agradeço aos meus pais, à minha irmã e à minha namorada, por todos os ensinamentos, amor, apoio e por sempre fazerem de tudo para que eu consiga realizar meus sonhos.

Agradeço aos meus padrinhos e familiares, por sempre me acolherem e ajudarem.

Agradeço à República “A Desordem dos Engenheiros”, pelo crescimento pessoal proporcionado.

Agradeço ao CEFET-MG por todo conhecimento fornecido, e aos seus funcionários que contribuíram para este trabalho, principalmente aos professores Gisele Mol da Silva e Dr. Paulo Eduardo Lopes Barbieri, aos técnicos Rogério Morouço Coutinho e Gilberto Caldeira Faria, e ao secretário Marcos Oliveira Lins, pela grande ajuda neste caminho percorrido.

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que a realização desse trabalho fosse possível.

*"Só quero o que é meu, não quero
o de mais ninguém. só vou buscar
o que Deus me deu, eu não quero
roubar o que é seu."*

(Lucas Kastrup Rehen)

Lista de figuras

Figura 1 – Secador solar ativo misto utilizado na dissertação	18
Figura 2 – Esquema do processo de secagem e da migração de umidade do interior para a superfície do sólido	22
Figura 3 – Curvas de secagem	23
Figura 4 – Classificação dos secadores solares	26
Figura 5 – Secadores solares integrados: ativo vs. passivo	27
Figura 6 – Secador solar integrado ativo de Alonge e Uduak.....	28
Figura 7 – Secador solar integrado ativo de Islam <i>et al.</i>	29
Figura 8 – Secador solar integrado passivo de Ikrang, Onwe e Onda.....	30
Figura 9 – Suporte de secagem solar de Dissa <i>et al.</i>	30
Figura 10 – Secadores solares distribuídos: ativo vs. passivo	32
Figura 11 – Secador solar distribuído ativo de Gatea.....	32
Figura 12 – Secador solar distribuído ativo de Shalaby e Bek	34
Figura 13 – Secador solar distribuído passivo de Jain e Tewari.....	35
Figura 14 – Secador solar distribuído passivo de Ullah <i>et al.</i>	35
Figura 15 – Secador solar misto ativo de Pardhi e Bhagoria.....	36
Figura 16 – Secador solar misto ativo de Lakshmi <i>et al.</i>	37
Figura 17 – Secador solar misto passivo de Arepally, Ravula e Kamidi	38
Figura 18 – Secador de cabine	39
Figura 19 – Secador de túnel.....	40
Figura 20 – Secador de leito fluidizado	41
Figura 21 – Secador pneumático	42
Figura 22 – Secador atomizador	43
Figura 23 – Secador solar misto passivo de Lawrence, Folayan e Pam.....	45
Figura 24 – Secador solar distribuído ativo de Akpınar	46
Figura 25 – Obstáculos de secador solar distribuído ativo de Akpınar e Koçyiğit	47
Figura 26 – Processo produtivo da indústria da cerâmica vermelha	50
Figura 27 – Tijolos cerâmicos maciços	51
Figura 28 – Tijolo cerâmico com seis furos	52
Figura 29 – Secador solar instalado com chicanas	53
Figura 30 – Coletor solar do secador com chicanas	54
Figura 31 – Chicanas no secador solar.....	55
Figura 32 – Inclinação ótima para coletores planos	56
Figura 33 – Tijolos na câmara de secagem	56
Figura 34 – Balança digital.....	57
Figura 35 – Estufa	57
Figura 36 – Sensores termo higrômetros digitais	58
Figura 37 – Sensor termo-higro-anemômetro	58
Figura 38 – Termômetros digitais.....	59
Figura 39 – Piranômetro e multímetro digital	59
Figura 40 – Volume de controle	61
Figura 41 – Irradiação solar incidente nos ensaios	70
Figura 42 – Temperaturas de entrada e saída nos ensaios	71
Figura 43 – Variação entre as temperaturas de saída e entrada nos ensaios	72
Figura 44 – Temperatura da placa coletora nos ensaios.....	73

Figura 45 – Temperatura da entrada da câmara de secagem nos ensaios.....	74
Figura 46 – Temperatura da câmara de secagem nos ensaios.....	75
Figura 47 – Vazão mássica de ar seco nos ensaios	76
Figura 48 – Umidades relativas do ar nos ensaios.....	77
Figura 49 – Umidades absolutas do ar nos ensaios.....	79
Figura 50 – Variação entre as umidades absolutas do ar de saída e entrada nos ensaios ..	80
Figura 51 – Teores de umidade em base úmida dos tijolos nos ensaios.....	81
Figura 52 – Teores de umidade em base seca dos tijolos nos ensaios.....	82
Figura 53 – Eficiência térmica nos ensaios	83
Figura 54 – Eficiência de secagem nos ensaios	85
Figura 55 – Eficiência exergética nos ensaios	86
Figura 56 – Eficiência exergética latente nos ensaios.....	88

Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades dos tijolos	52
Tabela 2 – Ensaio de umidade inicial.....	69
Tabela 3 – Irradiação solar incidente nos ensaios	69
Tabela 4 – Temperaturas de entrada e saída nos ensaios.....	70
Tabela 5 – Variação entre as temperaturas de saída e entrada nos ensaios	72
Tabela 6 – Temperatura da placa coletora nos ensaios.....	73
Tabela 7 – Temperatura da entrada da câmara de secagem nos ensaios	74
Tabela 8 – Temperatura da câmara de secagem nos ensaios.....	75
Tabela 9 – Vazão mássica de ar seco nos ensaios	76
Tabela 10 – Umidades relativas do ar nos ensaios	77
Tabela 11 – Umidades absolutas do ar nos ensaios.....	79
Tabela 12 – Variação entre as umidades absolutas do ar de saída e entrada nos ensaios .	80
Tabela 13 – Teores de umidade dos tijolos nos ensaios.....	81
Tabela 14 – Eficiência térmica nos ensaios	83
Tabela 15 – Eficiência de secagem nos ensaios.....	84
Tabela 16 – Eficiência exergética nos ensaios.....	86
Tabela 17 – Eficiência exergética latente nos ensaios	87

Lista de abreviaturas e siglas

a.C.	Antes de Cristo
CEFET-MG	Centro Federal de Estudo Tecnológico de Minas Gerais
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
PCM	Material de Mudança de Fase
PROPESQ	Projetos de Pesquisa
PVC	Policloreto de Polivinila

Lista de símbolos

A	Área de cobertura de vidro do secador (m ²)
c_c	Correção combinada (unidade da grandeza avaliada)
\dot{E}_C	Taxa de energia consumida (W)
\dot{E}_L	Taxa de energia latente (W)
\dot{E}_U	Taxa de energia útil (W)
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
G	Irradiação solar incidente (W/m ²)
G_C	Irradiação solar incidente no ensaio com chicanas (W/m ²)
G_{sc1}	Irradiação solar incidente no 1º ensaio sem chicanas (W/m ²)
G_{sc2}	Irradiação solar incidente no 2º ensaio sem chicanas (W/m ²)
h_e	Entalpia específica de entrada (J/kg)
h_{lv}	Calor latente de vaporização (J/kg)
h_s	Entalpia específica de saída (J/kg)
$K_{95\%}$	Fator de abrangência (adimensional)
\dot{m}	Vazão mássica (kg/s)
$\dot{m}_{\text{água}}$	Vazão mássica de água (kg/s)
\dot{m}_{ar}	Vazão mássica de ar seco (kg/s)
$\dot{m}_{ar,c}$	Vazão mássica de ar seco no ensaio com chicanas (kg/s)
$\dot{m}_{ar,e}$	Vazão mássica de ar seco na entrada (kg/s)
$\dot{m}_{ar,s}$	Vazão mássica de ar seco na saída (kg/s)
$\dot{m}_{ar,sc1}$	Vazão mássica de ar seco no 1º ensaio sem chicanas (kg/s)
$\dot{m}_{ar,sc2}$	Vazão mássica de ar seco no 2º ensaio sem chicanas (kg/s)
\dot{m}_e	Vazão mássica de entrada (kg/s)
m_f	Massa final do produto (kg)
m_i	Massa inicial do produto (kg)
MI	Média das indicações (K)
\dot{m}_s	Vazão mássica de saída (kg/s)
\dot{Q}_k	Taxa de transferência de calor de uma fonte (W)
Q_{sol}	Calor transferido do sol (J)
\dot{Q}_{sol}	Taxa de transferência de calor do sol (W)
\dot{Q}_{vc}	Taxa de transferência de calor no volume de controle (W)
RM	Resultado de medição dos instrumentos (K)
s_e	Entropia específica de entrada (J/kgK)
S_{ger}	Geração de entropia (J/K)

\dot{S}_{ger}	Taxa de geração de entropia (W/K)
s_s	Entropia específica de saída (J/kgK)
T	Temperatura (K)
T_0	Temperatura de referência (K)
T_{amb}	Temperatura ambiente (K)
T_{camara}	Temperatura da câmara de secagem (K)
$T_{camara;c}$	Temperatura da câmara de secagem no ensaio com chicanas (K)
$T_{camara;sc1}$	Temperatura da câmara de secagem no 1º ensaio sem chicanas (K)
$T_{camara;sc2}$	Temperatura da câmara de secagem no 2º ensaio sem chicanas (K)
T_e	Temperatura de entrada (K)
$T_{e;c}$	Temperatura de entrada no ensaio com chicanas (K)
$T_{e;sc1}$	Temperatura de entrada no 1º ensaio sem chicanas (K)
$T_{e;sc2}$	Temperatura de entrada no 2º ensaio sem chicanas (K)
$T_{entcamara}$	Temperatura da entrada da câmara de secagem (K)
$T_{entcamara;c}$	Temperatura da entrada da câmara no ensaio com chicanas (K)
$T_{entcamara;sc1}$	Temperatura da entrada câmara no 1º ensaio sem chicanas (K)
$T_{entcamara;sc2}$	Temperatura da entrada da câmara no 2º ensaio sem chicanas (K)
T_k	Temperatura da local de um ponto definido (K)
T_{med}	Média entre as temperaturas de entrada e saída (K)
T_{placa}	Temperatura da placa coletora (K)
$T_{placa;c}$	Temperatura da placa coletora no ensaio com chicanas (K)
$T_{placa;sc1}$	Temperatura da placa coletora no 1º ensaio sem chicanas (K)
$T_{placa;sc2}$	Temperatura da placa coletora no 2º ensaio sem chicanas (K)
T_s	Temperatura de saída (K)
$T_{s;c}$	Temperatura de saída no ensaio com chicanas (K)
$T_{s;sc1}$	Temperatura de saída no 1º ensaio sem chicanas (K)
$T_{s;sc2}$	Temperatura de saída no 2º ensaio sem chicanas (K)
T_{sol}	Temperatura do sol (K)
t_{solar}	Tempo solar (h)
U	Teor de umidade instantânea (%)
u_1	Incerteza da resolução do padrão de calibração (unidade da grandeza avaliada)
u_2	Incerteza da resolução do sistema de medição (unidade da grandeza avaliada)
u_3	Incerteza do padrão (unidade da grandeza avaliada)

u_4	Incerteza da calibração do sistema de medição (unidade da grandeza avaliada)
u_5	Incerteza do processo de medição (unidade da grandeza avaliada)
$U_{95\%}$	Incerteza expandida a 95%
U_{bs}	Teor de umidade instantânea em base seca (%)
$U_{bs;c}$	Teor de umidade em base seca no ensaio com chicanas (%)
$U_{bs;sc1}$	Teor de umidade em base seca no 1º ensaio sem chicanas (%)
$U_{bs;sc2}$	Teor de umidade em base seca no 2º ensaio sem chicanas (%)
U_{bu}	Teor de umidade instantânea em base úmida (%)
$U_{bu;c}$	Teor de umidade em base úmida no ensaio com chicanas (%)
$U_{bu;sc1}$	Teor de umidade em base úmida no 1º ensaio sem chicanas (%)
$U_{bu;sc2}$	Teor de umidade em base úmida no 2º ensaio sem chicanas (%)
u_c	Incerteza combinada a 68% (adimensional)
V_e	Velocidade de entrada (m/s)
V_s	Velocidade de saída (m/s)
\dot{W}_{vc}	Potência de saída do volume de controle (W)
\dot{W}_{vent}	Potência do ventilador (W)
X_{dest}	Exergia destruída (J)
\dot{X}_{dest}	Taxa de exergia destruída (W)
$\dot{X}_{dest;c}$	Taxa de exergia destruída no ensaio com chicanas (W)
$\dot{X}_{dest;sc1}$	Taxa de exergia destruída no 1º ensaio sem chicanas (W)
$\dot{X}_{dest;sc2}$	Taxa de exergia destruída no 2º ensaio sem chicanas (W)
\dot{X}_e	Taxa de exergia de entrada (W)
\dot{X}_{forn}	Taxa de exergia fornecida (W)
$\dot{X}_{Q,k}$	Taxa de exergia associada à transferência de calor de alguma fonte (W)
$\dot{X}_{Q,L}$	Taxa de exergia associada à transferência de calor latente
\dot{X}_{rec}	Taxa de exergia recuperada (W)
\dot{X}_s	Taxa de exergia de saída (W)
X_{sol}	Exergia do sol (J)
\dot{X}_{sol}	Taxa de exergia do sol (W)
z_e	Altura da entrada em relação a algum ponto de referência externa (m)
z_s	Altura da saída em relação a algum ponto de referência externa (m)
ΔT_c	Varição entre as temperaturas de saída e entrada no ensaio com chicanas (K)
ΔT_{sc1}	Varição entre as temperaturas de saída e entrada no 1º ensaio sem chicanas (K)

ΔT_{sc2}	Varição entre as temperaturas de saída e entrada no 2º ensaio sem chicanas (K)
$\Delta \omega_c$	Varição entre as umidades absolutas do ar de saída e entrada no ensaio com chicanas (kg vapor d'água/kg ar seco)
$\Delta \omega_{sc1}$	Varição entre as umidades absolutas do ar de saída e entrada no 1º ensaio sem chicanas (kg vapor d'água/kg ar seco)
$\Delta \omega_{sc2}$	Varição entre as umidades absolutas do ar de saída e entrada no 2º ensaio sem chicanas (kg vapor d'água/kg ar seco)
η_{II}	Eficiência exergética (%)
$\eta_{II;c}$	Eficiência exergética no ensaio com chicanas (%)
$\eta_{II;sc1}$	Eficiência exergética no 1º ensaio sem chicanas (%)
$\eta_{II;sc2}$	Eficiência exergética no 2º ensaio sem chicanas (%)
$\eta_{II;latente}$	Eficiência exergética latente (%)
$\eta_{II;latente;c}$	Eficiência exergética latente no ensaio com chicanas (%)
$\eta_{II;latente;sc1}$	Eficiência exergética latente no 1º ensaio sem chicanas (%)
$\eta_{II;latente;sc2}$	Eficiência exergética latente no 2º ensaio sem chicanas (%)
η_s	Eficiência de secagem (%)
$\eta_{s;c}$	Eficiência de secagem no ensaio com chicanas (%)
$\eta_{s;sc1}$	Eficiência de secagem no 1º ensaio sem chicanas (%)
$\eta_{s;sc2}$	Eficiência de secagem no 2º ensaio sem chicanas (%)
η_T	Eficiência térmica (%)
$\eta_{T;c}$	Eficiência térmica no ensaio com chicanas (%)
$\eta_{T;sc1}$	Eficiência térmica no 1º ensaio sem chicanas (%)
$\eta_{T;sc2}$	Eficiência térmica no 2º ensaio sem chicanas (%)
γ_1	Número de grau de liberdade 1 (adimensional)
γ_2	Número de grau de liberdade 2 (adimensional)
γ_3	Número de grau de liberdade 3 (adimensional)
γ_4	Número de grau de liberdade 4 (adimensional)
γ_5	Número de grau de liberdade 5 (adimensional)
γ_{ef}	Número de graus de liberdade efetivos (adimensional)
ω	Umidade absoluta do ar (kg vapor d'água/kg ar seco)
ω_e	Umidade absoluta do ar na entrada (kg vapor d'água/kg ar seco)
$\omega_{e;c}$	Umidade absoluta do ar na entrada no ensaio com chicanas (kg vapor d'água/kg ar seco)
$\omega_{e;sc1}$	Umidade absoluta do ar na entrada no 1º ensaio sem chicanas (kg vapor d'água/kg ar seco)

$\omega_{e;sc2}$	Umidade absoluta do ar na entrada no 2º ensaio sem chicanas (kg vapor d'água/kg ar seco)
ω_s	Umidade absoluta do ar na saída (kg vapor d'água/kg ar seco)
$\omega_{s;c}$	Umidade absoluta do ar na saída no ensaio com chicanas (kg vapor d'água/kg ar seco)
$\omega_{s;sc1}$	Umidade absoluta do ar na saída no 1º ensaio sem chicanas (kg vapor d'água/kg ar seco)
$\omega_{s;sc2}$	Umidade absoluta do ar na saída no 2º ensaio sem chicanas (kg vapor d'água/kg ar seco)
ϕ	Umidade relativa do ar (%)
ϕ_e	Umidade relativa do ar de entrada (%)
$\phi_{e;c}$	Umidade relativa do ar de entrada no ensaio com chicanas (%)
$\phi_{e;sc1}$	Umidade relativa do ar de entrada no 1º ensaio sem chicanas (%)
$\phi_{e;sc2}$	Umidade relativa do ar de entrada no 2º ensaio sem chicanas (%)
ϕ_s	Umidade relativa do ar de saída (%)
$\phi_{s;c}$	Umidade relativa do ar de saída no ensaio com chicanas (%)
$\phi_{s;sc1}$	Umidade relativa do ar de saída no 1º ensaio sem chicanas (%)
$\phi_{s;sc2}$	Umidade relativa do ar de saída no 2º ensaio sem chicanas (%)

Resumo

A secagem é uma das mais antigas operações unitárias de que se tem conhecimento. Atualmente, é aplicada principalmente na indústria alimentícia, e também em diversos processos, como em empreendimentos cerâmicos. Através da vaporização, este processo remove um líquido, que geralmente é a água, de um material sólido. Uma forma de proteger o produto a ser seco, reduzir seu tempo de secagem e aumentar a eficiência é a utilização de secadores, que podem ser de vários modelos. Os secadores solares, que são integrados, distribuídos ou mistos, destacam-se devido ao uso de uma fonte abundante e renovável de energia. No caso dos mistos, a radiação solar incide tanto no coletor, onde o ar é aquecido e encaminhado à câmara de secagem, quanto na própria câmara. Visando aumentar a eficiência da secagem nos secadores mistos, pode-se fazer com que o ar oriundo do coletor chegue à câmara de secagem com uma temperatura maior do que a alcançável normalmente. Assim, a presença de obstáculos no coletor pode aumentar o trajeto do ar, fazendo com que este fique mais aquecido. O objetivo deste trabalho foi comparar experimentalmente as eficiências energética e exérgica de um secador solar ativo misto com placa plana tradicional e com placa plana com chicanas, determinando as curvas de secagem. Os produtos utilizados na secagem foram tijolos cerâmicos, que permaneceram 12h em um recipiente antes da realização de cada experimento. Realizou-se um ensaio com chicanas e dois sem, devido à nebulosidade em um dos dias. Os ensaios sem chicanas apresentaram eficiências exérgicas médias superiores ao com chicanas em $(0,52 \pm 0,10)\%$ e $(0,22 \pm 0,12)\%$, e o com chicanas apresentou as outras eficiências médias maiores, superando os experimentos sem chicanas na eficiência térmica em $(5,8 \pm 1,9)\%$ e $(9,1 \pm 2,0)\%$, na de secagem em $(5,4 \pm 1,4)\%$ e $(7,3 \pm 1,5)\%$ e na exérgica latente em $(0,240 \pm 0,050)\%$ e $(0,495 \pm 0,048)\%$. A umidade final do ensaio com chicanas foi menor em $(0,3299 \pm 0,0068)\%$ e $(1,9120 \pm 0,0069)\%$ na base úmida e em $(0,3936 \pm 0,0082)\%$ e $(2,3220 \pm 0,0083)\%$ na base seca do que nos sem chicanas. Assim, a inserção de chicanas na placa coletora do secador fez com que seu desempenho fosse superior ao do equipamento com a placa plana tradicional.

Palavras-chave: Secador solar; Eficiência energética; Eficiência exérgica.

Abstract

Drying is one of the earliest known unit operations. Currently, it is mainly applied in the food industry, in addition to several processes, such as in ceramic enterprises. Through vaporization, this process removes liquid content, usually water, from a solid material. One way of protecting the product to be dried, reducing its drying time and increasing efficiency is the use of dryers, which can be of several models. Solar dryers, which are integrated, distributed or mixed, stand out due to the use of an abundant and renewable source of energy. In the case of the mixed, the solar radiation affects both the collector, where the air is heated and routed to the drying chamber, as well as in the chamber itself. In order to increase drying efficiency in the mixed dryers, the air from the collector can be brought into the drying chamber at a temperature higher than that normally achievable. Thus, the presence of obstacles in the collector can increase the air path, causing it to become warmer. The objective of this work was to compare the energy and exergetic efficiencies of a mixed active solar dryer with traditional flat plate and flat plate with baffles, determining the drying curves. The products used for drying were ceramic bricks, which remained for 12 hours in a container before each experiment. A test was performed with baits and two without, due to the cloudiness on one of the days. The non-baffled tests had mean exergetic efficiencies higher than those with baffles in $(0.52 \pm 0.10)\%$ and $(0.22 \pm 0.12)\%$, and the baffle tests showed the other average efficiencies greater, surpassing the experiments without $(5.8 \pm 1.9)\%$ and $(9.1 \pm 2.0)\%$, drying $(5.4 \pm 1.4)\%$ and $(7.3 \pm 1.5)\%$ and in the latent exergetics in $(0.240 \pm 0.050)\%$ and $(0.495 \pm 0.048)\%$. The final moisture content of the baffle assay was lower $(0.3299 \pm 0.0068)\%$ and $(1.9120 \pm 0.0069)\%$ in the wet basis and $(0.3936 \pm 0.0082)\%$ and $(2.3220 \pm 0.0083)\%$ on dry basis than on non-baffles. Thus, the insertion of baffles in the dryer collector plate made its performance superior to that of traditional flat plate equipment.

Keywords: Solar drying; Energy efficiency; Exergetic efficiency.

Sumário

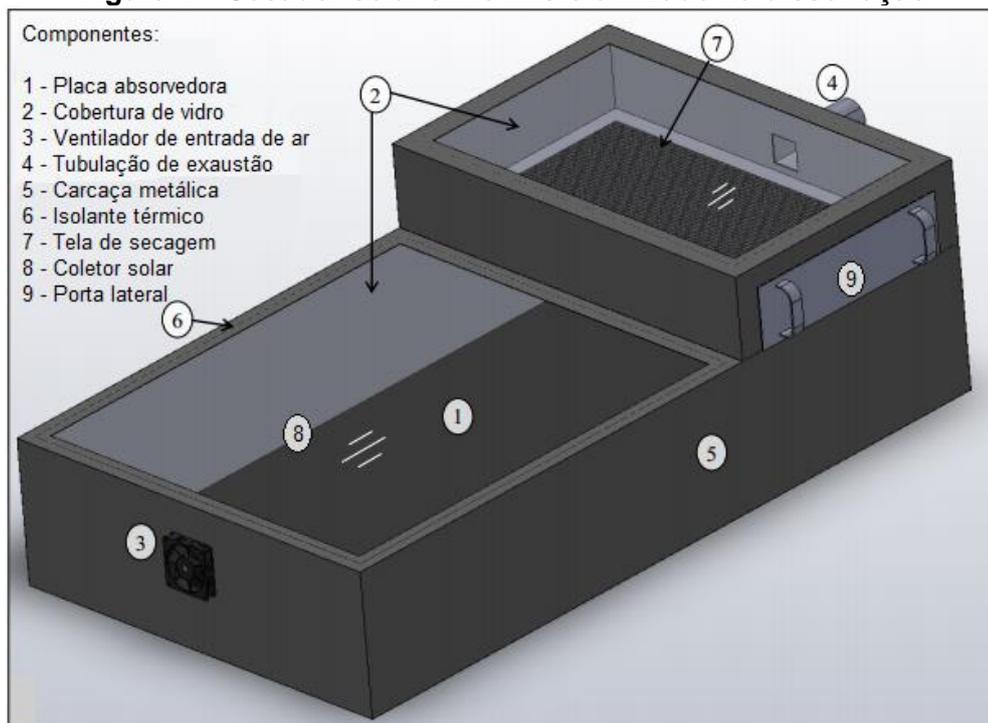
1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Justificativa	19
1.2 Objetivos	20
2. REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1 Princípios físicos da secagem	22
2.2 Tipos de secadores	24
2.2.1 Secadores solares	24
2.2.2 Secadores artificiais	39
2.2.3 Secadores híbridos	44
2.3 Análise exergética de secadores solares	45
2.4 Tijolos cerâmicos	47
3. MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 Secador solar ativo misto	53
3.2 Material cerâmico para secagem	56
3.3 Instrumentação para medição	57
3.4 Procedimentos dos ensaios	60
3.5 Análise energética dos secadores	61
3.6 Análise exergética dos secadores	64
3.7 Análise de incertezas	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1 Determinação do teor de umidade inicial	69
4.2 Ensaios de secagem solar	69
5. CONCLUSÕES	89
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	90
REFERÊNCIAS	91

1. INTRODUÇÃO

A secagem é normalmente, conforme Fumagalli (2003), considerada como uma operação de remoção de umidade de um sólido por evaporação. De acordo com Sousa (2012), este processo envolve simultaneamente transferência de massa e de calor. Existem diversos métodos de secagem, dentre os quais destaca-se a secagem solar, por utilizar a exposição à radiação solar incidente, fonte abundante e renovável de energia. Os secadores solares, através de seus coletores, segundo Kalogirou (2004), absorvem energia da incidência da radiação solar, convertem-na em calor e o utilizam para aquecer um escoamento de um fluido, que pode ser o ar, e este fornece calor para o material a ser seco. Santos Júnior (2014) afirma que o aumento de temperatura do produto submetido à secagem força a evaporação da água, e a circulação do ar remove a umidade evaporada.

O secador solar, objeto de estudo neste trabalho, mostrado na Figura 1, possui uma cobertura superior de vidro, por onde a radiação solar incidente penetra e atinge uma placa absorvedora, aumentando sua temperatura. O escoamento de ar (induzido por um ventilador), ao entrar no secador, absorve calor por convecção e, posteriormente, atravessa a câmara de secagem, onde o material a ser seco está presente. Este material recebe calor do ar, e a umidade presente é removida parcialmente e arrastada pelo escoamento através da saída de ar presente na câmara.

Figura 1 – Secador solar ativo misto utilizado na dissertação



Fonte: Adaptada de Gonçalves (2012).

Os secadores solares são tradicionalmente utilizados para desidratação de alimentos. Entretanto, sua aplicação em materiais inorgânicos também pode ser viável tecnicamente. Um exemplo são tijolos cerâmicos, que são amplamente usados na construção civil, possuem normalmente forma de paralelepípedo e cor avermelhada, devido ao cozimento de sua matéria, que é a argila. De acordo com Pereira (2008), a argila é um material muito fino, constituído de grãos lamelares inferiores a dois micrometros, formada, em proporções muito variáveis, de silicato de alumínio e óxidos de silício, ferro, magnésio, dentre outros elementos. A baixa granulometria dessas partículas faz com que o espaçamento entre elas seja pequeno. Consequentemente, a argila pode ser classificada como porosa, ou seja, apresenta elevada capacidade de adsorção de água.

Segundo Martins (2016), o processo de secagem na indústria cerâmica ocorre durante sua fabricação e visa a retirada de água da peça antes que esta prossiga para a fase da queima. Porém, como os tijolos já fabricados também acumulam água, são materiais adequados para realização de ensaios de secagem. Além disso, eles apresentam pequenas variações geométricas com a variação de seu teor de umidade (ao contrário das demais análises desenvolvidas no secador em estudo), favorecendo a padronização de ensaios de secagem.

Neste contexto, realizou-se ensaios de secagem com tijolos maciços em um secador solar ativo misto.

1.1 Justificativa

A dificuldade de conservação de produtos de origem vegetal após a extração é um grande problema para muitos produtores. Conforme Tunes (2009), produtos com alta umidade apresentam atividade metabólica intensa, criando assim um ambiente adequado ao desenvolvimento de microrganismos, o que conduz à uma rápida deterioração. A secagem torna-se de suma importância no retardamento deste processo, pois remove parcialmente a umidade do material. Portanto, quanto maior for a eficiência da secagem, mais lento será o processo de apodrecimento da cultura, ou seja, ela terá uma maior durabilidade e o produtor terá menos perdas. Dessa forma, para proteger o produto e melhorar a eficiência da secagem, torna-se vantajosa a utilização de secadores.

Secadores solares convectivos são muito utilizados por pequenos agricultores. Normalmente, possuem placas planas como absorvedores. Desta forma, a maior parte da radiação solar que atravessa a cobertura e incide sobre a placa é absorvida, sendo uma parcela restante refletida, geralmente, em direção à cobertura. No secador usado neste trabalho, um ventilador,

localizado na parte inferior do coletor, força o escoamento do ar, que o atravessa retirando calor por convecção das suas superfícies internas e, posteriormente, atinge a câmara de secagem, onde o material a ser seco está presente. Uma forma de aumentar a eficiência do secador é fazer com que o ar chegue à câmara de secagem com uma temperatura mais alta, o que, como resultado, elevaria mais a temperatura do produto a ser seco, removendo assim uma quantidade maior de umidade em menor tempo.

Chicanas são barreiras projetadas para direcionar um fluido. Seu uso permite ampliar o trajeto do escoamento de ar no coletor de um secador solar. Assim, algumas chicanas foram construídas no laboratório do CEFET-MG, com placas metálicas finas de custo reduzido. Juntamente com a placa plana absorvedora, as chicanas absorvem a radiação solar incidente, e transferem calor para o ar, que tem de percorrer o espaço entre elas, aumentando consideravelmente seu trajeto e, conseqüentemente, sua temperatura.

Verificou-se então, na literatura, estudos em que chicanas foram utilizadas em secadores solares. O trabalho de Akpınar e Koçyiğit (2010), mostrou resultados interessantes com o uso de obstáculos comparados à configuração padrão. O uso de chicanas no secador estudado por eles promoveu aumento de eficiência térmica de 20% para 82%. Portanto, concluiu-se que o uso de chicanas realmente poderia ter resultados que superariam o uso convencional do secador e que a verificação das melhorias poderá ser averiguada através de análises de eficiência térmica, exérgica e de secagem do secador.

Neste trabalho são utilizados tijolos cerâmicos como produto a ser secado em um secador solar ativo misto. A escolha dos tijolos se deve por serem materiais higroscópicos, de geometria padronizada e que não sofrem mudança significativa de dimensões durante a remoção de umidade, permitindo que a análise desenvolvida para as eficiências do dispositivo seja mais precisa do que quando realizada com produtos orgânicos.

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é comparar experimentalmente a eficiência de um secador solar ativo misto na secagem de tijolos cerâmicos maciços, com dois diferentes formatos de absorvedor: placa plana tradicional e placa plana com chicanas.

Os objetivos específicos da dissertação são:

- Determinar as curvas de secagem dos tijolos para as duas configurações do secador;

- Determinar a eficiência térmica instantânea e de secagem do secador para as duas configurações;
- Realizar análise exergética do processo de secagem.

2. REVISÃO DA LITERATURA

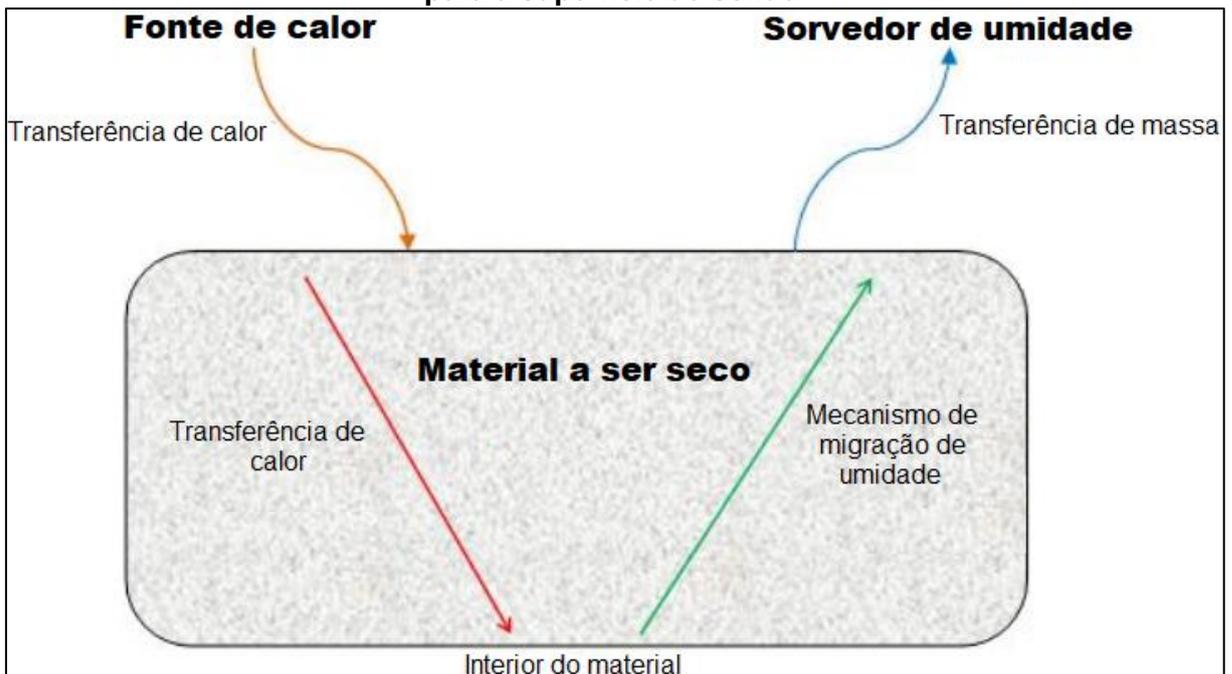
Este capítulo traz a revisão da literatura, que trata principalmente dos princípios de secagem, tipos de secadores, análise exergética de secadores e tijolos cerâmicos.

2.1 Princípios físicos da secagem

Segundo Santos (2013), a secagem é uma operação que envolve simultaneamente as transferências de calor e massa entre o material a ser seco e o meio secante, e recebe influência do escoamento desse meio sobre o sólido. Para Alonso (2001), a secagem tem a finalidade de eliminar um líquido volátil contido em um corpo não volátil, através de evaporação.

A Figura 2 mostra um esquema do processo de secagem. Conforme Santos (2013), calor é fornecido para o sólido úmido, promovendo a evaporação da água da superfície do material. Para que haja a evaporação dessa água, Alonso (2001) afirma que ela deve migrar do interior do sólido até a superfície. Santos (2013) diz que o vapor formado é removido por um sorvedor de umidade.

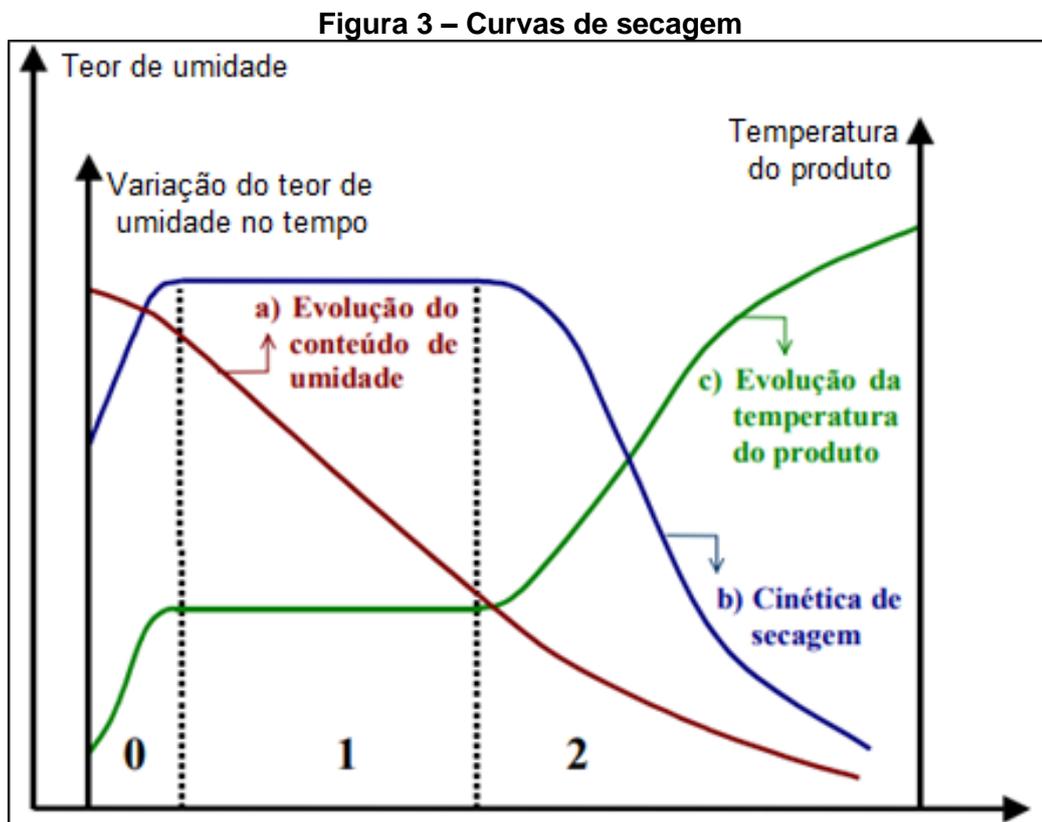
Figura 2 – Esquema do processo de secagem e da migração de umidade do interior para a superfície do sólido



Fonte: Adaptada de Santos (2013).

Gonçalves (2012) diz que a transferência de calor é feita a uma temperatura inferior à de evaporação da água, tendo como objetivo final a remoção do teor de umidade, que, conseqüentemente, reduz o volume e a massa do produto, podendo conservar suas propriedades.

Gonçalves (2012) afirma que as principais variáveis do processo de secagem são: o teor de umidade do produto, a temperatura, a umidade relativa e a pressão do escoamento do ar. De acordo com Silva (2005), a evolução das transferências simultâneas de calor e massa durante a secagem podem ser divididas em períodos, numerados de 0 (zero) a 2 (dois). A Figura 3 mostra, segundo Vasconcelos (2017), as curvas de evolução do teor de água do produto, de sua temperatura e da velocidade de secagem, também chamada de cinética de secagem.



Fonte: Adaptada de Alonso (2001).

No período 0, segundo Silva (2005), chamado de período de indução ou período de se entrar em regime operacional, a temperatura do sistema ar-produto é baixa e a pressão parcial de vapor da água na superfície do produto é débil, e portanto, a transferência de massa e a taxa de secagem, também são débeis. Park, Yado e Brod (2001) afirmam que nesse período ocorre a elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor d'água, que acontecem até que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água). Silva (2005)

diz ainda que, se a temperatura do ar for inferior àquela do produto, esta última diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio.

Posteriormente, segundo Vasconcelos (2017), inicia-se período de taxa de secagem constante, ou seja, o período 1, caracterizado por uma taxa de secagem independente do teor de umidade do produto. Park, Yado e Brod (2001) dizem que a água é evaporada como água livre. Silva (2005) afirma que a pressão de vapor d'água na superfície é constante e é igual à pressão de vapor d'água pura à temperatura do produto, que também é constante e igual à temperatura de bulbo úmido do ar, o que mostra que as transferências de calor e de massa se compensam exatamente. Nesse período, conforme Santos (2013), a migração de umidade dentro do sólido é rápida o suficiente para manter a condição saturada na superfície, formando-se, de acordo com Gonçalves (2012), um filme contínuo de água sobre o produto. Park, Yado e Brod (2001) afirmam que enquanto houver uma quantidade de água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante.

Em seguida, segundo Vasconcelos (2017), começa o período de taxa de secagem decrescente, denominado período 2. Para Silva (2005), isso acontece quando a água que migra do interior do sólido para a superfície começa a ser deficiente na superfície, reduzindo-se assim, conforme Park, Yado e Brod (2001), a transferência de massa. Silva (2005) afirma que durante este período, a troca de calor não é mais compensada e conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. De acordo com Park, Yado e Brod (2001), quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado.

2.2 Tipos de secadores

Os secadores, segundo Silva (2010), podem ser classificados conforme a sua fonte de aquecimento, podendo ser solares, artificiais e híbridos.

2.2.1 Secadores solares

Conforme Oliveira (2014), os secadores são considerados solares quando se aquece o ar através de energia solar. Para Costa (2010), são coletores solares nos quais o ar é aquecido pela irradiação solar incidente e os percorre por um sistema, que retira a umidade do material a ser seco.

Os secadores solares, segundo Belessiotis e Delyannis (2011), normalmente possuem pequena capacidade e são construídos com base em dados empíricos e semi-empíricos. Geralmente, conforme Paiva (2003), são construídos de materiais metálicos de boa condutividade térmica e paredes de espessura finas, visando a otimização da transferência de energia térmica.

Freitas Neto (2015) diz que a principal desvantagem da secagem solar é sua vulnerabilidade a variações climáticas, além de que o sistema não funciona no período noturno, interrompendo assim a continuidade do processo.

Diversos secadores solares estão disponíveis, conforme Kumar, Sansaniwal e Khatak (2016), com vários tamanhos e configurações, dependendo dos requisitos desejados. Pelo grande número de configurações e da quantidade de modelos empíricos, Belessiotis e Delyannis (2011) afirmam que realizar uma classificação confiável dos equipamentos de secagem solar é uma tarefa complexa.

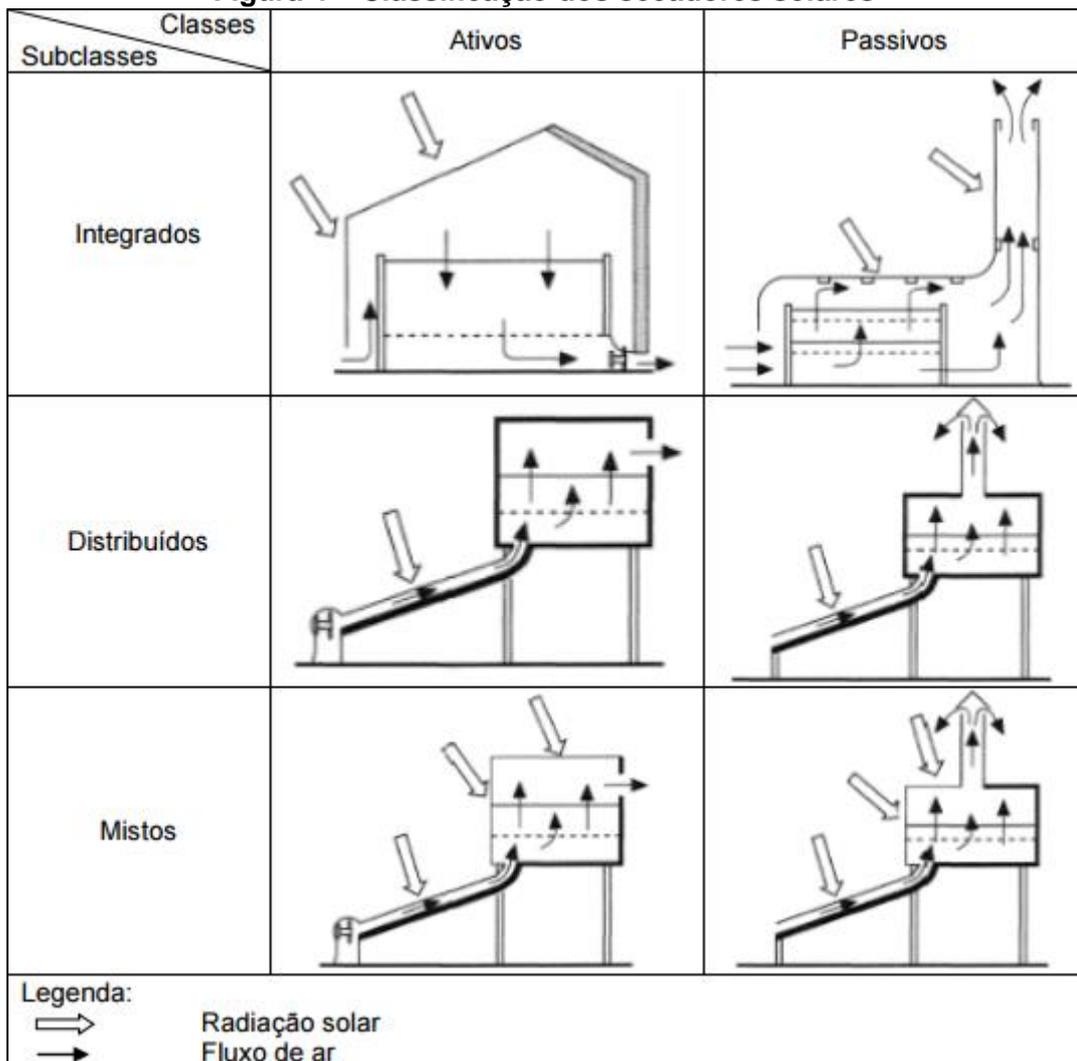
De acordo com Belessiotis e Delyannis (2011), existem diferentes classificações para os secadores solares, como considerando-se a temperatura de operação, o formato do secador, o material a ser seco e o tipo de operação. Uma categorização de secadores solares muito utilizada, citada por Mekhilef, Saidur e Safari (2011), é baseada no método de geração de fluxo de ar, e considera a divisão de dois grupos principais: secadores solares ativos e passivos.

Segundo Ali, Mabrouk e Sassi (2010), os secadores solares ativos são projetados incorporando meios externos, como os ventiladores, para mover o escoamento de ar aquecido da área do coletor para os leitos de secagem. Assim, conforme Balasuadhakar *et al.* (2016), eles possuem convecção forçada. Estes ventiladores, de acordo com Islam *et al.* (2018), podem funcionar através de energia elétrica, módulo solar ou combustível fóssil.

Em um secador solar passivo, de acordo com Kapadiya e Desai (2014), o ar circula naturalmente devido à variação da pressão e/ou por forças de empuxo. Portanto, Balasuadhakar *et al.* (2016) afirmam que esses secadores operam em convecção natural. Para Belessiotis e Delyannis (2011), esses secadores são primitivos, possuem baixo custo de construção, facilidade de instalação e operação, e são ideais para locais onde não exista rede elétrica. Prakash e Kumar (2013) dizem que ele pode ser fabricado a partir de materiais disponíveis localmente, sendo apropriado para pequenas fazendas, onde materiais de construção, como madeira, estão prontamente disponíveis.

Para López-Vidaña, Méndez-Lagunas e Rodríguez-Ramírez (2013), existem três subclasses distintas tanto para a classe dos ativos como para a dos passivos, definidas principalmente pelo projeto, pela disposição dos componentes e pelo modo de utilização da energia solar. Esses autores classificam essas subclasses como: secadores solares integrados, distribuídos e mistos. A Figura 4 mostra a divisão dos secadores conforme as classes e subclasses citadas.

Figura 4 – Classificação dos secadores solares



Fonte: Adaptada de Ekechukwu e Norton (1999, apud Balasuadhakar *et al.*, 2016).

Os secadores solares integrados, conforme Lawrence, Folyan e Pam (2013), podem ser chamados de diretos. Neles, segundo Abdulmalek *et al.* (2018), o material é exposto à radiação solar incidente diretamente na câmara de secagem. Assim, como mostra a Figura 4, eles possuem uma única estrutura como coletor solar e câmara de secagem.

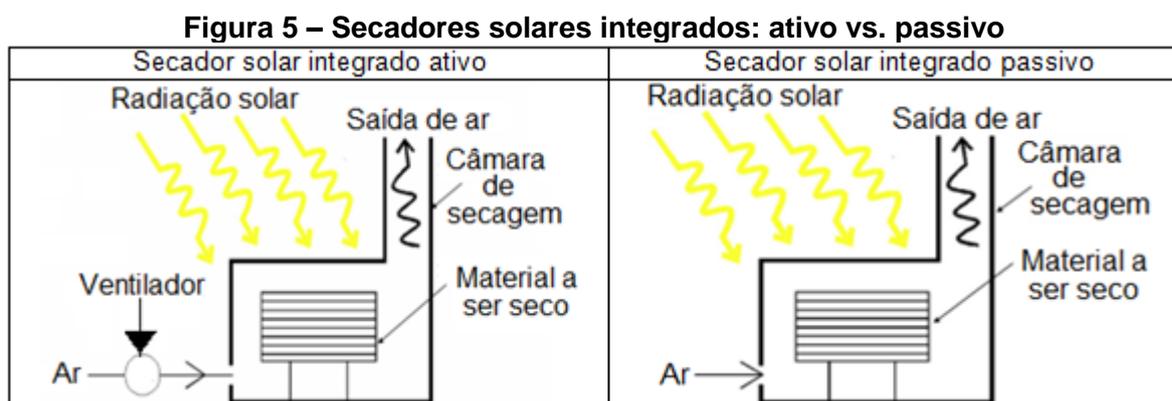
A câmara desses secadores, de acordo com Islam *et al.* (2018), normalmente é uma caixa rasa, isolada e com pequenos buracos de ar, que permitem sua entrada e saída. Prakash e Kumar (2013) afirmam que o ar entra na câmara, absorve a umidade do produto, e sai do secador. Durante esse trajeto, Islam *et al.* (2018) mencionam que o ar flui através do produto, colocado normalmente em bandejas perfuradas.

Esses secadores possuem uma cobertura transparente, que além de exercer importante papel no processo, de acordo com Mustayen, Mekhilef e Saidur (2014), fornece proteção ao produto contra alguns fatores, como chuva e poeira.

Quando a radiação solar atinge a superfície transparente do secador, que normalmente é vidro, conforme Balasuadhakar *et al.* (2016), há absorção, reflexão e transmissão. Prakash e Kumar (2013), afirmam que uma fração da radiação solar incidente na cobertura transparente é refletida de volta para a atmosfera e a parte restante é transmitida para dentro do secador, sendo que uma parcela é absorvida pelo material a ser seco e outra, devido à cobertura, é refletida de volta para esse produto. Balasuadhakar *et al.* (2016) alegam que além do aumento da temperatura do material, a temperatura dentro da câmara também aumenta. Segundo Prakash e Kumar (2013), isso acontece porque a superfície transparente reduz as perdas convectivas para o ambiente, e não permite que a radiação solar de longo comprimento de onda, emitida pelo material aquecido, saia para a atmosfera.

Conforme Prakash e Kumar (2013), os secadores solares integrados apresentam deficiências, como pequena capacidade, descoloração da cultura e condensação de umidade dentro das coberturas de vidro, que reduz sua transmissividade.

A Figura 5 mostra o desenho esquemático de dois secadores solares integrados: um ativo e um passivo.

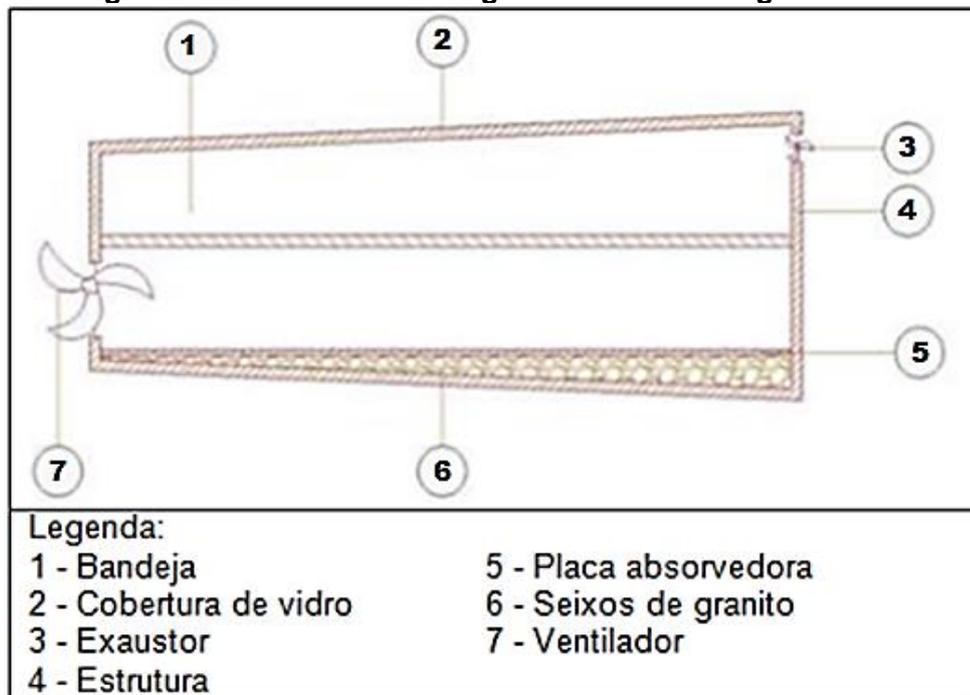


Fonte: Adaptada de Hage *et al.* (2018).

A Figura 5 mostra que os dois secadores recebem a radiação solar incidente diretamente na câmara de secagem. A diferença fica na entrada de ar, onde o ativo possui o ventilador e o passivo não.

Alonge e Uduak (2014) construíram um secador solar integrado ativo, mostrado na Figura 6, para secar as folhas de uma planta conhecida como maçã do mato. Em oito horas de secagem, o teor de umidade reduziu-se de 66,4% a 11,5%, o que demorou mais de um dia para acontecer em folhas secas ao ar livre. As folhas secas no secador também apresentaram uma melhor coloração e maior teor de vitamina C se comparadas às secas a céu aberto.

Figura 6 – Secador solar integrado ativo de Alonge e Uduak



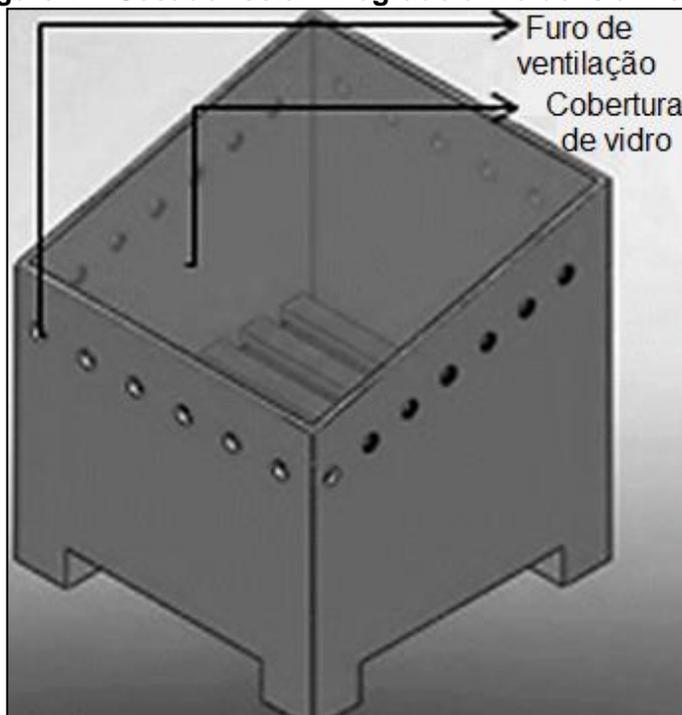
Fonte: Adaptada de Alonge e Uduak (2014).

O secador de Alonge e Uduak (2014) foi feito de madeira e pintado de cinza. Era composto de uma tampa de vidro, um ventilador de sucção e um exaustor. Além disso, possuía seixos de granito abaixo da placa absorvedora e um módulo fotovoltaico, localizado em seu exterior, para alimentar os ventiladores e carregar uma bateria de armazenamento de energia suplementar.

Islam *et al.* (2018) utilizaram um secador solar integrado ativo, exibido na Figura 7, para secar bananas e batatas. Foi realizado um teste de 36h com um ventilador de corrente contínua de 12 V, posicionado em seu interior, e outro sem esse ventilador, sendo que nessa forma o secador funcionou como secador solar integrado passivo. A umidade relativa no interior da

câmara de secagem no secador utilizado como passivo ficou entre 30% e 52%. Já no secador como ativo, a menor umidade relativa foi de 27%, o que facilitou o processo de secagem. Os autores verificaram que a eficiência no modo ativo foi superior ao modo passivo, e que um controle do ventilador automatizado, relacionado à taxa de secagem, apresentaria um melhor resultado.

Figura 7 – Secador solar integrado ativo de Islam *et al.*

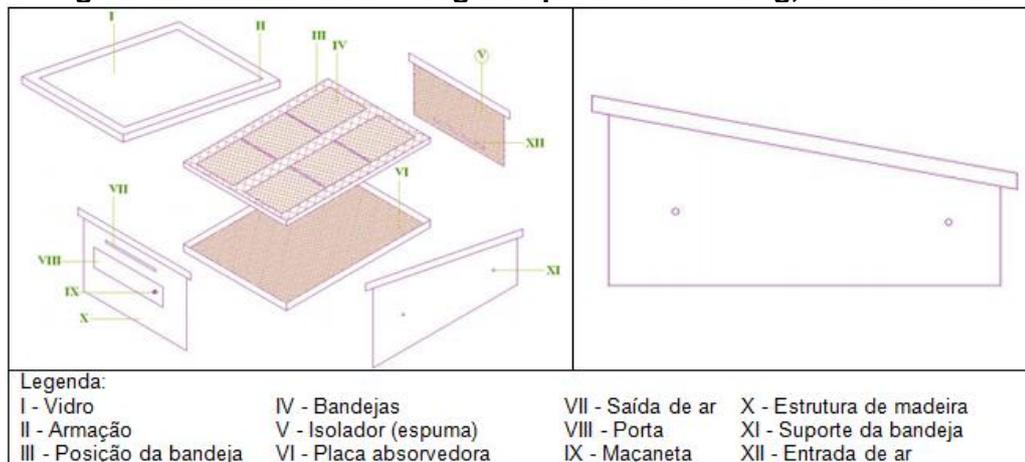


Fonte: Adaptada de Islam *et al.* (2018).

O secador de Islam *et al.* (2018) possuía uma armação de madeira com furos igualmente espaçados ao seu redor para remover a umidade do produto. Para um melhor isolamento, cobriu-se parte da madeira com folhas de cortiça e, sobre elas, foram inseridas folhas de PVC. A parte interna foi pintada de preto. A cobertura de vidro de 4 mm de espessura foi colocada na parte superior, e utilizada com uma inclinação de 25° em relação à horizontal. Uma bandeja foi anexada e havia uma porta traseira para retirada dos produtos.

Ikrang, Onwe e Onda (2015) utilizaram um secador solar integrado passivo, representado pela Figura 8, para a secagem de lagostins. Secagens de nove horas diárias reduziram a umidade dos lagostins de 76,6% para 12% em três dias, o que demorou cinco dias para acontecer em secagens ao ar livre. Além disso, os lagostins expostos a céu aberto sofreram contaminação por moscas e microrganismos, apresentando também coloração e aparência menos agradáveis que os retirados do secador.

Figura 8 – Secador solar integrado passivo de Ikrang, Onwe e Onda

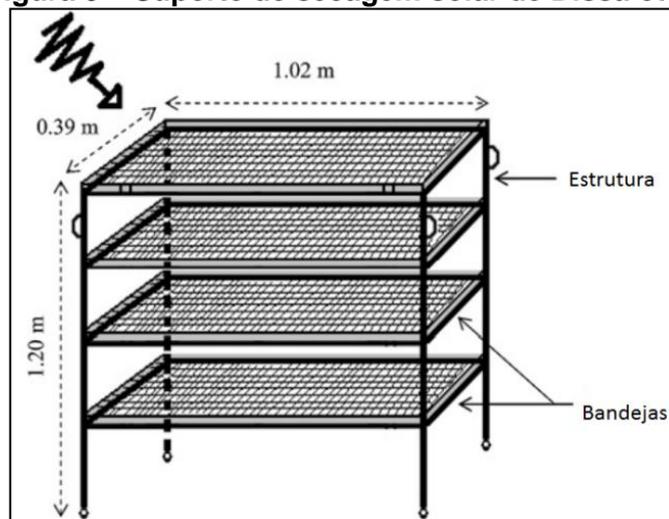


Fonte: Adaptada de Ikrang, Onwe e Onda (2015).

O secador de Ikrang, Onwe e Onda (2015) foi construído utilizando madeira, sendo a tampa do coletor solar de vidro de 4 mm de espessura, e utilizado inclinado a um ângulo de $15,06^\circ$ em relação à horizontal. Os lados e o fundo da câmara de secagem foram isolados com espuma fina, e cobertos com folhas de alumínio pintado de preto, que funcionaram como placa absorvente. O compartimento de secagem foi construído de arame para permitir a circulação de ar adequada no secador.

Dissa *et al.* (2011) utilizaram um suporte com quatro bandejas, representado pela Figura 9, para secar dois tipos de mangas ao ar livre, sendo que estes autores consideraram o suporte como um secador solar integrado passivo.

Figura 9 – Suporte de secagem solar de Dissa *et al.*



Fonte: Adaptada de Dissa *et al.* (2011).

Dissa *et al.* (2011) concluíram que a eficiência de secagem diminuiu progressivamente com o tempo, pois no primeiro dia de experimento alcançou-se até 34,13% de eficiência de secagem,

sendo que este valor chegou a apenas 0,85% no quarto dia. O teor de umidade ao final do experimento foi de 24,83% em uma espécie e de 66,32% na outra.

O suporte utilizado por Dissa *et al.* (2011) possuía quatro bandejas retangulares com alicerce de madeira e fundo de redes de nylon, suportados por uma estrutura de metal. A lateral do suporte foi coberta com redes de nylon para evitar contato entre o produto de secagem e o exterior. Nessa secagem, a energia solar foi diretamente utilizada para a evaporação da água do produto e o vapor d'água produzido é transportado pelo ar ambiente, cruzando o leito de secagem.

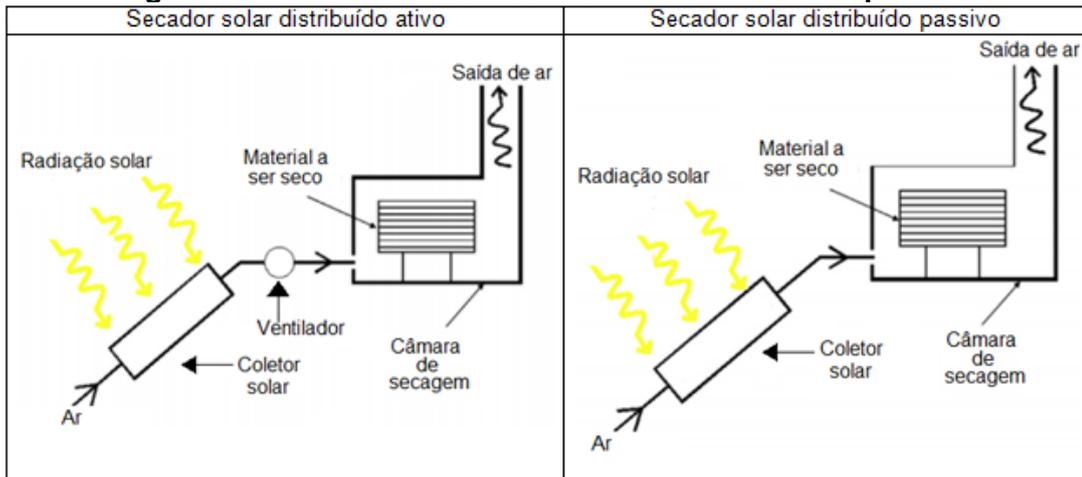
Os secadores solares distribuídos, segundo Lawrence, Folayan e Pam (2013), podem ser chamados de indiretos. Diferentemente dos secadores integrados, como mostra a Figura 4, possuem separadamente um coletor solar e uma câmara de secagem, que não recebe luz solar. Neles, de acordo com Balasuadhakar *et al.* (2016), o ar atmosférico é aquecido no coletor e flui até a câmara, onde o material a ser seco está. Por isso, conforme Prakash e Kumar (2013), ela minimiza a descoloração e fissuração na superfície do produto.

Sontakke e Salve (2015) afirmam que a umidade do produto nesses secadores pode ser perdida por convecção e difusão, tendo assim uma taxa de secagem alta em comparação com o secador integrado.

Belessiotis e Delyannis (2011), citando o próprio trabalho, realizado em 2009, mencionam diversas vantagens do secador solar distribuído em relação ao integrado, como alta taxa de secagem; possibilidade de controlar a secagem e garantir o teor adequado de umidade; eliminação de perdas por fenômenos naturais; possibilidade de menores superfícies devido à acomodação de bandejas em pilhas; maior produtividade, pois pode ser recarregado em poucas horas; flexibilidade de aceitar colheitas similares.

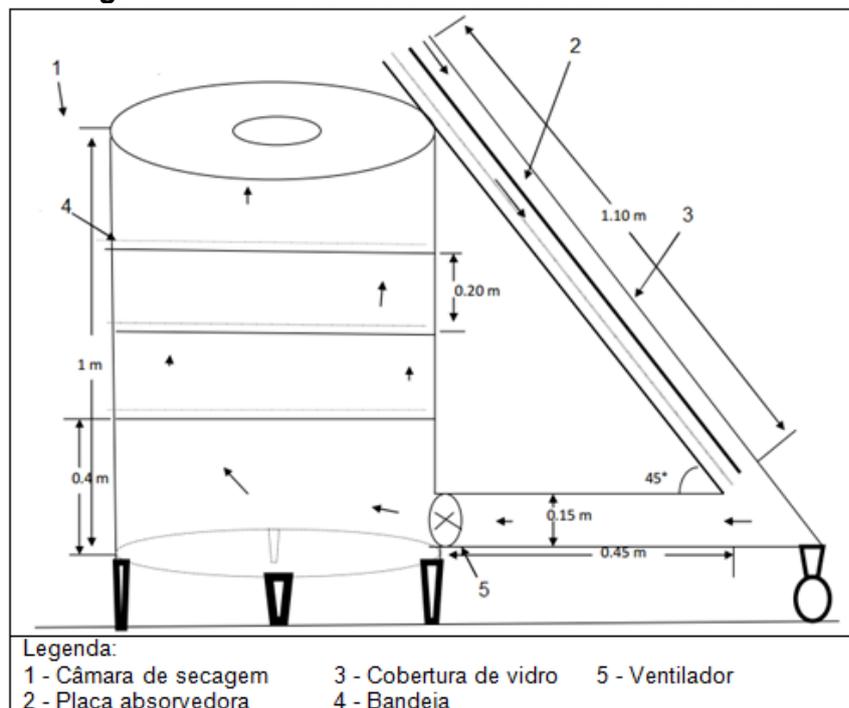
Para Belessiotis e Delyannis (2011), as únicas desvantagens do secador distribuído em relação ao integrado são os custos elevados do secador e dos equipamentos auxiliares necessários, e a necessidade de maior qualificação para operar o processo de secagem.

A Figura 10 mostra o desenho esquemático de dois secadores solares distribuídos: um ativo e um passivo. Percebe-se que ambos recebem a irradiação solar incidente no coletor solar, onde o ar é aquecido antes de chegar à câmara de secagem. A diferença fica na entrada de ar na câmara, onde o ativo possui o ventilador e o passivo não.

Figura 10 – Secadores solares distribuídos: ativo vs. passivo

Fonte: Adaptada de Hage *et al.* (2018).

No trabalho realizado por Gatea (2011), um secador solar distribuído ativo, mostrado na Figura 11, foi utilizado na secagem de feijões.

Figura 11 – Secador solar distribuído ativo de Gatea

Fonte: Adaptada de Gatea (2011).

O sistema de Gatea (2011) foi testado com diferentes fluxos de ar, sendo que a maior eficiência de secagem máxima diária obtida foi de 18,41%. Nesse caso, após nove horas, o teor de umidade dos feijões foi de 14%. O autor concluiu que essa eficiência é afetada tanto pelas propriedades dos materiais de secagem, como teor de umidade, tamanho, forma e

geometria, como pelas condições ambientais, que incluem radiação solar e temperatura, umidade relativa, velocidade e pressão atmosférica do ar ambiente.

O secador de Gatea (2011) possuía um coletor com uma placa plana de aço galvanizado, cobertura de vidro de 4 mm de espessura, isolamento na parte traseira e nas bordas de lã mineral, e estava em uma inclinação de 45° em relação à horizontal. As armações do sistema eram de alumínio. A câmara de secagem, de formato cilíndrico, foi feita de alumínio, com três bandejas em seu interior. Na entrada da câmara, estava localizado um ventilador.

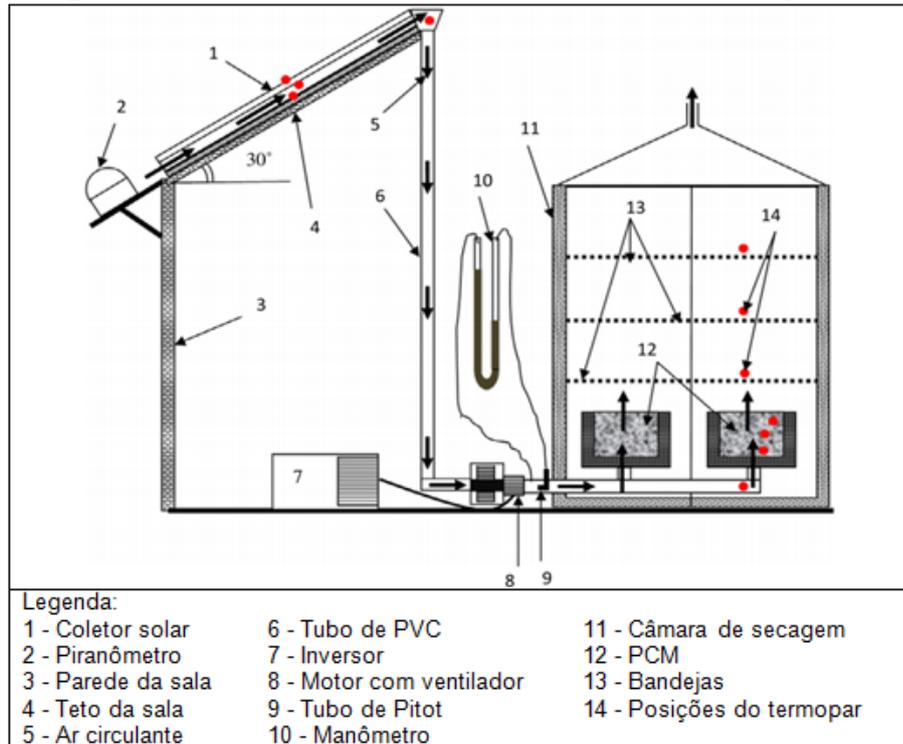
Shalaby e Bek (2014) utilizaram um secador solar distribuído ativo para secar manjeriço e chapéu-de-napoleão. Esse secador apresentava dois recipientes cilíndricos de plástico, fixados na parte inferior da câmara e isolados com espuma e vidro, preenchidos com Material de Mudança de Fase, ou *Phase Change Material* (PCM), que neste caso era cera de parafina. Foram realizados testes com a utilização do PCM e sem o seu uso, iniciados às 8h. A temperatura média do ar na câmara das 8h às 14h foi maior no teste sem PCM, o que pode ter sido ocasionado devido à grande quantidade de energia térmica absorvida pelo PCM no outro ensaio. Essa energia é economizada durante o processo de fusão e carregamento, e restaurada após as 14h, no processo de descarga, quando a temperatura do ar está abaixo da temperatura de fusão.

Assim, após esse horário, a temperatura no teste com PCM é maior entre 3,5°C e 6,5°C do que no outro ensaio. A temperatura é mantida constante por 7h consecutivas e, após a utilização do PCM, a temperatura do ar na câmara é maior do que a ambiente entre 2,5°C e 7,5°C após o pôr do sol, por no mínimo 5h. Essa temperatura do ar, considerada moderada, é adequada para a secagem de plantas medicinais, especialmente aquelas que contêm o óleo volátil. Em 12h, o manjeriço atingiu 13% de umidade com PCM, e com 18h, o chapéu-de-napoleão atingiu 12%, que são considerados ótimos resultados.

O secador de Shalaby e Bek (2014), representado na Figura 12, possuía dois coletores com placas planas de cobre de 1 mm de espessura, fixados no topo de uma sala com inclinação de 30°. Os coletores possuíam duas folhas de vidro de 5 mm de espessura. Houve isolamento em sua parte traseira e fundo com uma camada de espuma 40 mm de espessura, material que também foi utilizado para isolar todos os lados da câmara de secagem. A câmara foi feita de ferro galvanizado, e possuía seis bandejas de secagem e aço inoxidável, suportadas por uma moldura de alumínio e mantidas em armações de aço fixas à parede. Trinta e dois tubos de cobre foram verticalmente distribuídos regularmente com PCM e paralelos ao fluxo de ar, visando aumentar a área de transferência de calor entre o ar aquecido e PCM, e diminuir a

queda de pressão. O ar é levado do coletor por um tubo de PVC e forçado por um ventilador acoplado a um motor, com o fluxo controlado por um inversor, a passar através dos tubos de cobre, para assim ser distribuído livremente na câmara de secagem.

Figura 12 – Secador solar distribuído ativo de Shalaby e Bek



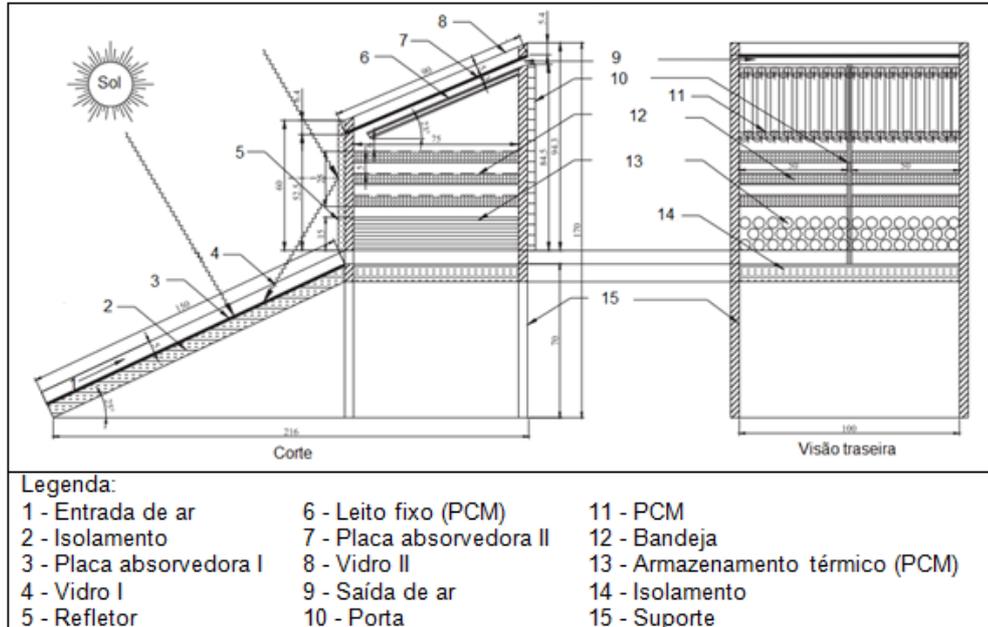
Fonte: Adaptada de Shalaby e Bek (2014).

Jain e Tewari (2015) analisaram um secador de distribuído passivo com armazenamento de energia térmica para manter a continuidade da secagem de ervas. Esse secador apresentou eficiência de secagem de 28,2%. Também foi realizada uma análise financeira sobre a viabilidade do secador, e concluiu-se que teria um retorno do investimento em 1,5 anos.

O secador de Jain e Tewari (2015), mostrado na Figura 13, apresentava um coletor com uma placa plana pintada de preto, com isolamento na base e inclinação de 25° em relação à horizontal, e um vidro temperado sobre a placa. A câmara de secagem possuía seis prateleiras de secagem retangulares, de aço inoxidável. Acima da câmara, havia uma placa absorvedora com uma inclinação de 23° em relação à horizontal, com um vidro temperado sobre ela e um leito com PCM, neste caso, cera de parafina, abaixo da placa. O sistema de armazenamento de energia térmica, localizado abaixo da câmara de secagem, com isolamento na base, possuía 48 tubos cilíndricos. Os tubos foram cheios com PCM e colocados em ziguezague, sendo que eles armazenaram energia na forma de calor sensível

e latente durante o dia, e esse calor foi utilizado na secagem durante a noite. Um espelho refletor foi direcionado para o sul adjacente da câmara de secagem.

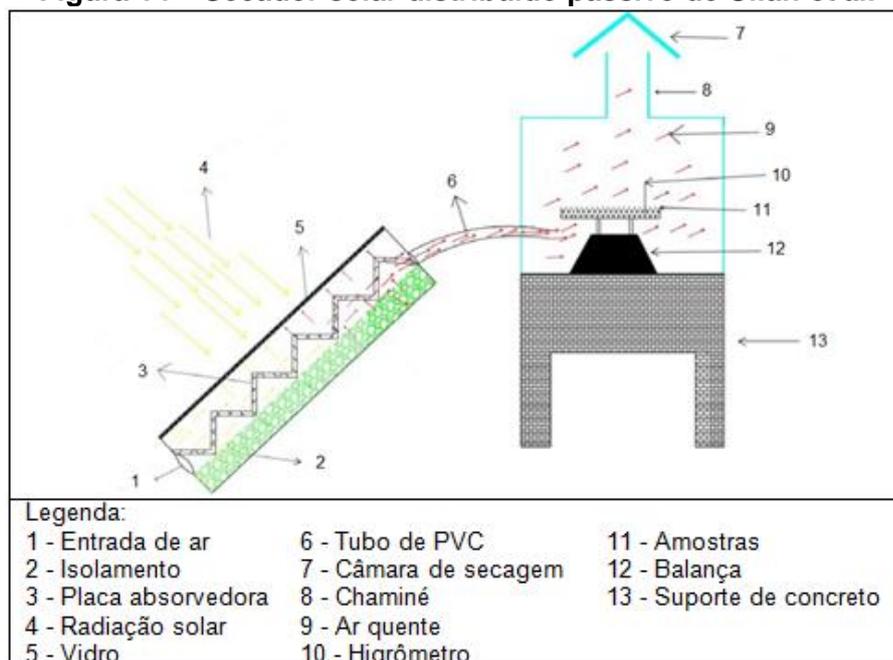
Figura 13 – Secador solar distribuído passivo de Jain e Tewari



Fonte: Adaptada de Jain e Tewari (2015).

No estudo de Ullah *et al.* (2018), um secador solar distribuído passivo, representado na Figura 14, foi utilizado para secagem de aspargos, tendo como resultado a eficiência térmica média do coletor entre 14,97% e 16,14%.

Figura 14 – Secador solar distribuído passivo de Ullah *et al.*



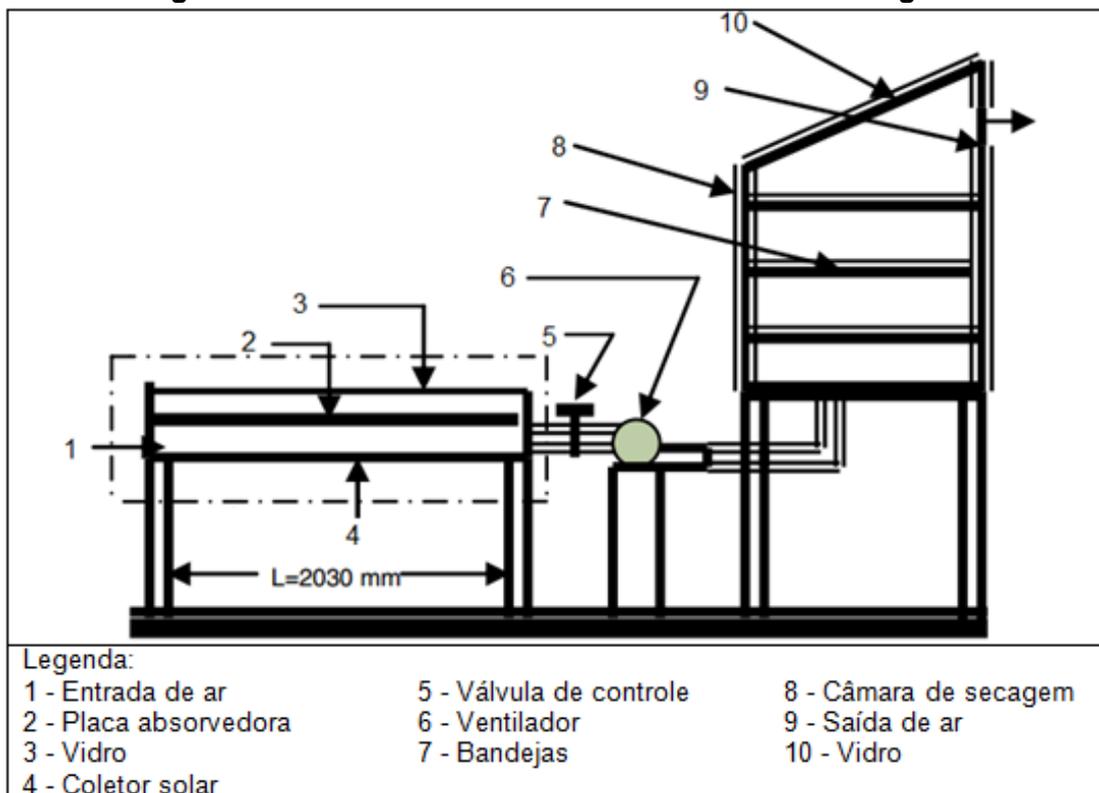
Fonte: Adaptada de Ullah *et al.* (2018).

O secador solar de Ullah *et al.* (2018) possuía um coletor de placa corrugada e uma câmara de secagem. O coletor foi constituído com uma folha de alumínio com revestimento preto, material de isolamento e uma folha de vidro transparente. A câmara de secagem foi fabricada com madeira e isolada para minimizar as perdas de calor. Ela foi conectada ao coletor através de um tubo de PVC.

Um secador solar misto é a combinação de um integrado e um distribuído, pois, conforme Balasuadhakar *et al.* (2016), o produto é seco por exposição direta à radiação solar e também por uma fonte de ar quente. A Figura 4 mostra que eles, como os secadores distribuídos, possuem separadamente um coletor solar e uma câmara de secagem. Mas, segundo Balasuadhakar *et al.* (2016), além do ar ser aquecido no coletor e ser fornecido à câmara, esta possui a parte superior composta de uma cobertura de vidro, que pode absorver diretamente a irradiação solar incidente.

Pardhi e Bhagoria (2013) construíram um secador solar misto ativo, mostrado na Figura 15, e o usaram para secar uvas. O teor de umidade inicial, de 81,4%, reduziu a 18,6% com quatro dias, o que aconteceu em oito dias em uma secagem a céu aberto. A eficiência de secagem diária foi de 31%.

Figura 15 – Secador solar misto ativo de Pardhi e Bhagoria

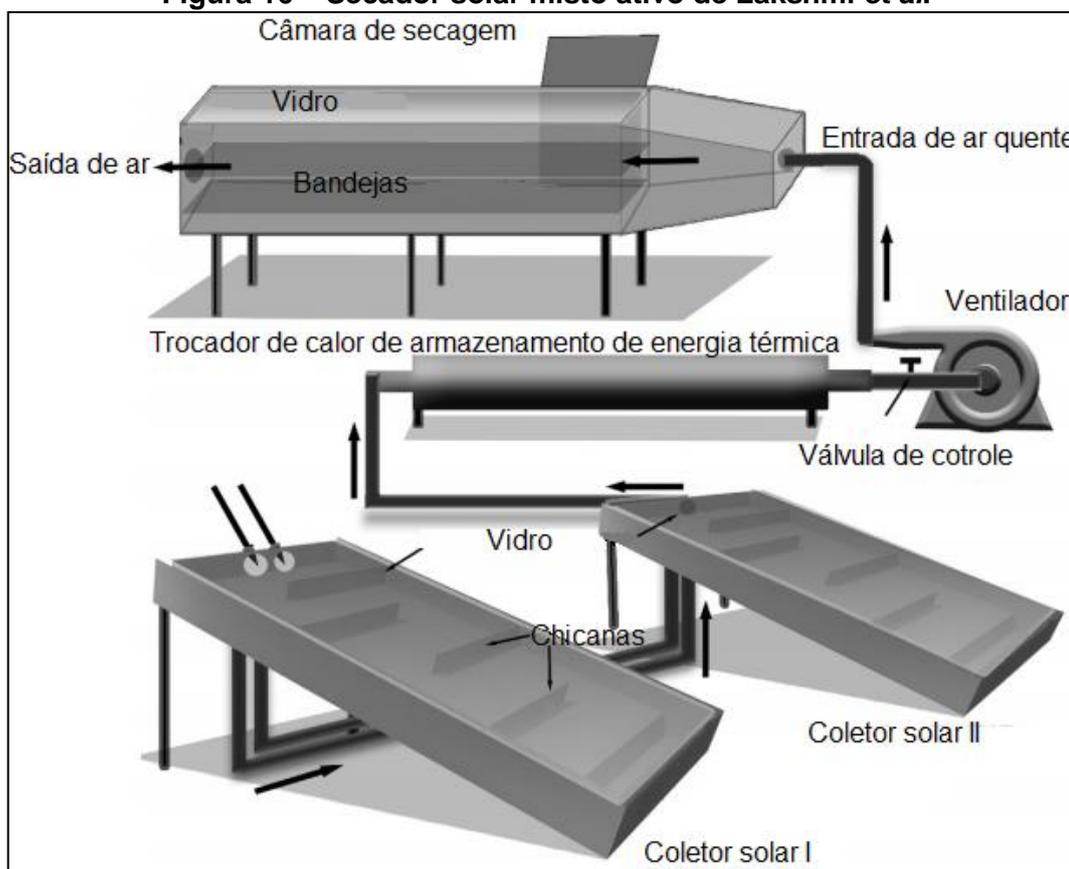


Fonte: Adaptada de Pardhi e Bhagoria (2013).

O secador de Pardhi e Bhagoria (2013) possuía um coletor com uma placa absorvedora de alumínio, de 3 mm de espessura, pintada de preto, e outra placa com chicanas, proporcionando assim obstáculos para o ar obter maior trajeto e conseqüentemente maior temperatura. Havia uma cobertura de vidro transparente de 4 mm de espessura. Além disso, possuía dois tubos de madeira. O coletor foi ligado a uma válvula de controle e um ventilador centrífugo, que estavam conectados à câmara de secagem. A câmara e a estrutura do secador foram feitas de madeira. O topo e as laterais da câmara eram de vidro transparente de 4 mm de espessura.

Lakshmi *et al.* (2018) construíram um secador solar misto ativo, representado na Figura 16, com armazenamento de energia térmica para secar cúrcuma negra. A umidade inicial das amostras era 73,4% e após 18,5h no secador, atingiu 8,5%. Para atingir esse percentual em uma secagem ao sol aberto, precisou-se de 46,5h. As eficiências térmica e de secagem do secador solar foram 25,6% e 12%, respectivamente.

Figura 16 – Secador solar misto ativo de Lakshmi *et al.*



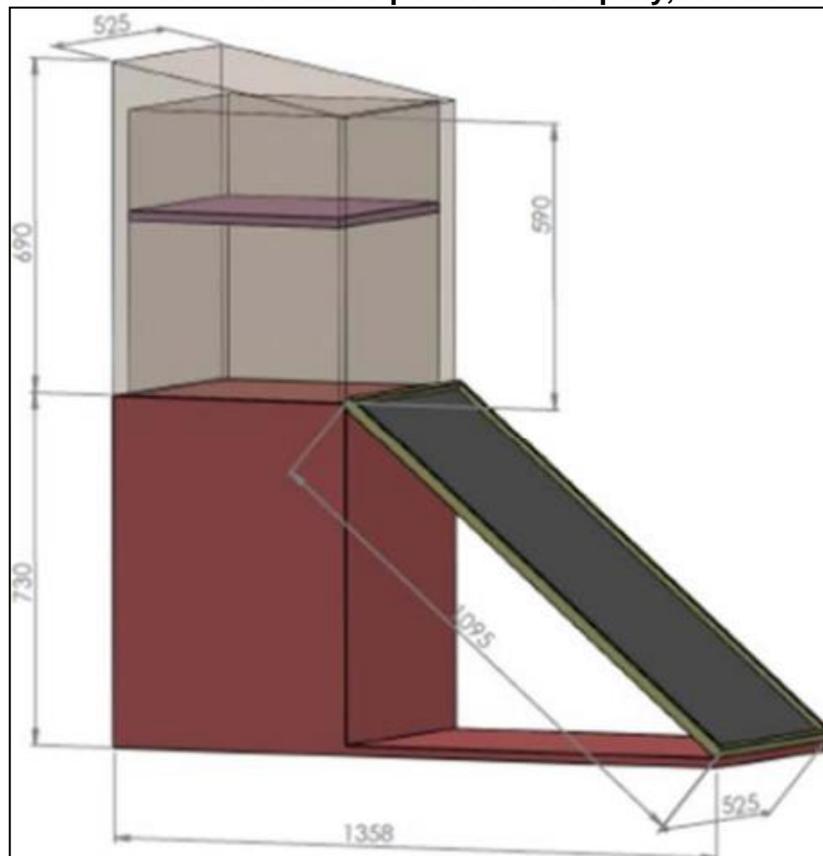
Fonte: Adaptada de Lakshmi *et al.* (2018).

O secador de Lakshmi *et al.* (2018) possuía dois coletores solares idênticos em série, inclinados a 20° em relação a horizontal, que eram caixas de madeira, tendo em cada uma

delas uma placa absorvedora de ferro galvanizado pintada de preto, de 1 mm de espessura, uma folha de alumínio como base, de 0,2 mm de espessura, isolamento de poliuretano na base, com 25 mm de espessura, cobertura de vidro de 5 mm de espessura, além de chicanas de ferro galvanizado de 1 mm de espessura, para aumentar o trajeto do ar. O sistema de armazenamento de energia térmica foi utilizado principalmente para secar o produto depois do pôr do sol. Ele possuía um reservatório de aço galvanizado, com 4 mm de espessura, e PCM, que no caso é cera de parafina. O ar oriundo do coletor passava por dez tubos de cobre. A câmara de secagem, que recebia o ar quente provindo de um ventilador, foi feita de aço leve, possuía seis bandejas e tinha cobertura de vidro. A vazão de ar foi controlada por uma válvula.

Arepally, Ravula e Kamidi (2017) utilizaram um secador solar misto passivo, mostrado na Figura 17, para secar fatias de tomate. Foram realizados três ensaios: o primeiro com 2 kg/m², o segundo com 4 kg/m² e o terceiro com 6 kg/m². O teor de umidade inicial, de 93,67%, reduziu-se a 7,76% em 20h no primeiro ensaio, a 7,65% em 23h no segundo e a 7,56% em 30h no terceiro. As eficiências de secagem do primeiro ao terceiro ensaio foram 17,33%, 30,37% e 35%, respectivamente.

Figura 17 – Secador solar misto passivo de Arepally, Ravula e Kamidi



Fonte: Adaptada de Arepally, Ravula e Kamidi (2017).

O secador de Arepally, Ravula e Kamidi (2017) possuía o coletor com uma placa absorvedora, e a câmara de secagem com as laterais e o topo de vidro. Duas bandejas com fatias de tomate foram usadas em cada teste.

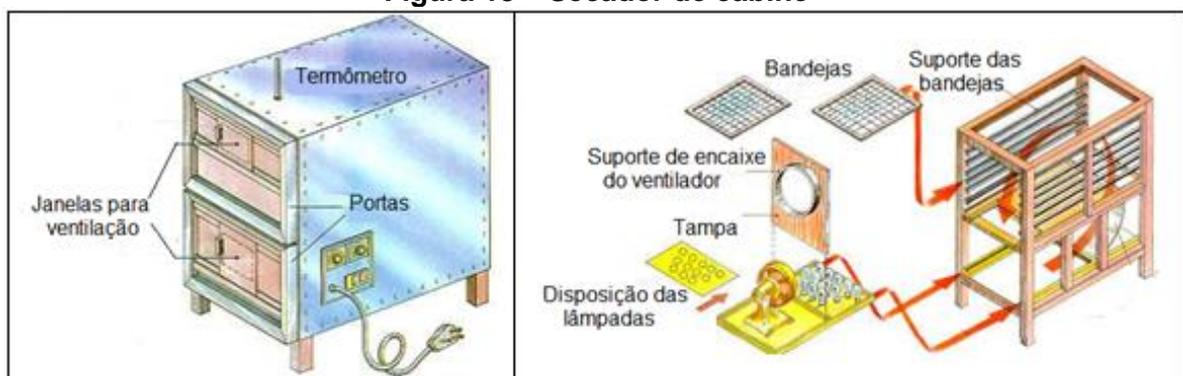
2.2.2 Secadores artificiais

Oliveira (2014) afirma que os secadores são artificiais quando o aquecimento é feito através de outra fonte de energia, como queima de combustíveis fósseis e aquecimento elétrico. Esses, de acordo com Nwakuba, Asoegwu e Nwagwe (2016), apresentam considerável consumo de energia.

A secagem artificial, conforme Sakurai (2017), ocorre em secadores adiabáticos, que utilizam o ar como meio de transferência do calor, ou em secadores com transferência de calor por superfície sólida. Segundo Tanaka (2007), no grupo dos adiabáticos pode-se citar os secadores de cabine, de túnel, de leito fluidizado, fornos, *flash dryers*, *spray dryers*, *puff dryers* e *foam mat dryers*. Para Gava (1977), nos secadores com transferência de calor por superfície sólida, pode-se enfatizar o secador de tambor e outros desidratadores à vácuo.

Os secadores de cabine, de acordo com Gava (1977), são constituídos de uma câmara que recebe as bandejas com o produto a secar. Para Oliveira (2014), possuem pequeno porte e são geralmente utilizados em laboratório e em plantas-piloto, para secagem experimental de frutas e legumes. Gava (1977) afirma que o ar é impulsionado por um ventilador, e passa por um sistema de aquecimento, que pode ser uma resistência elétrica, e dá entrada na câmara, passando pelo material que está secando. A Figura 18 mostra um exemplo de secador de cabine elétrico.

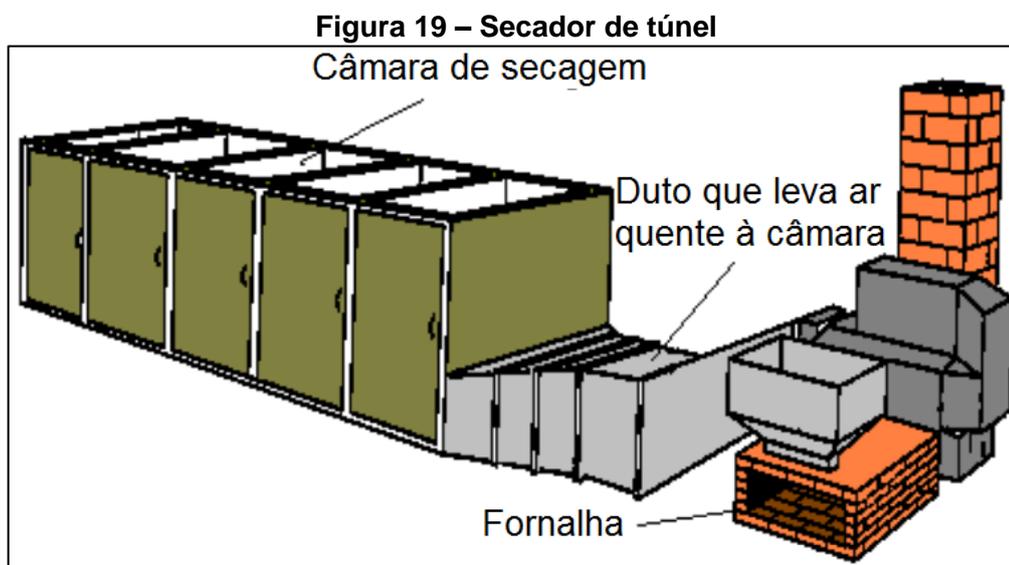
Figura 18 – Secador de cabine



Fonte: Adaptada de Cornejo, Nogueira e Wilberg (2003).

Os secadores de túnel, conforme Oliveira (2014), são constituídos basicamente por um grupo de carrinhos móveis com bandejas. Gava (1977) afirma que eles são construídos de tal maneira que a matéria prima entra por uma das extremidades e sai na outra, completamente seca. Oliveira (2014) diz que o material molhado é distribuído em camadas uniformes sobre bandejas dispostas em vagonetes ou carros, de modo a se manter um espaço adequado entre as bandejas para a circulação do ar. Segundo Gava (1977), o meio de secagem é o ar quente.

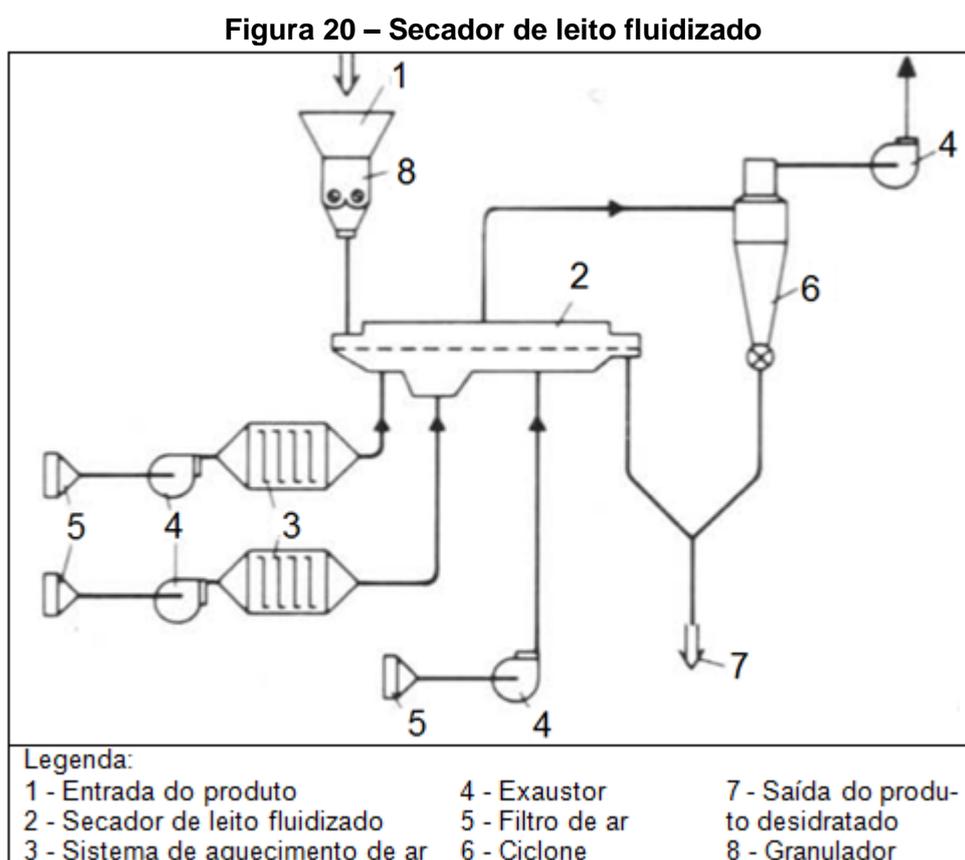
Nos secadores de túnel, para Oliveira (2014), os túneis variam conforme a direção relativa do movimento do ar e do produto, podendo ser concorrentes, contracorrentes, de evacuação central e de fluxo transversal. De acordo com Gava (1977), esses secadores são muito usados na desidratação de frutas e hortaliças. Oliveira (2014) cita que também são usados na secagem de massas alimentícias. A Figura 19 mostra um exemplo de secador de túnel.



Os secadores de leito fluidizado, segundo Vasconcelos (2017), possuem um sistema de secagem que realiza a circulação do ar quente através de um leito de sólidos, de modo que estes permanecem suspensos no ar. Gava (1977) diz que o material a ser desidratado é colocado em uma esteira perfurada, recebe ar quente pela parte inferior adquirindo, conseqüentemente, uma movimentação similar a um líquido em ebulição. Para Vasconcelos (2017), o contato direto e o tamanho do produto a ser seco (até 10 mm) faz com que o método apresente altas taxas de secagem.

Gava (1977) afirma que no secador de leito fluidizado, o ar de aquecimento ou de resfriamento dá entrada pela parte inferior e passa para um ciclone, onde são recuperadas as partículas finas que foram arrastadas no processo. De acordo com Vasconcelos (2014), esses

secadores são destinados à secagem de batata em grânulos ou flocos, cebola em flocos, farinhas, cenouras, cacau, dentre outros. Conforme Gava (1977), é um sistema de secagem muito usado em conjunto com um atomizador, objetivando aglomerar ou instantaneizar um produto, e isoladamente como método de secagem de produtos alimentícios. A Figura 20 representa um secador de leito fluidizado.

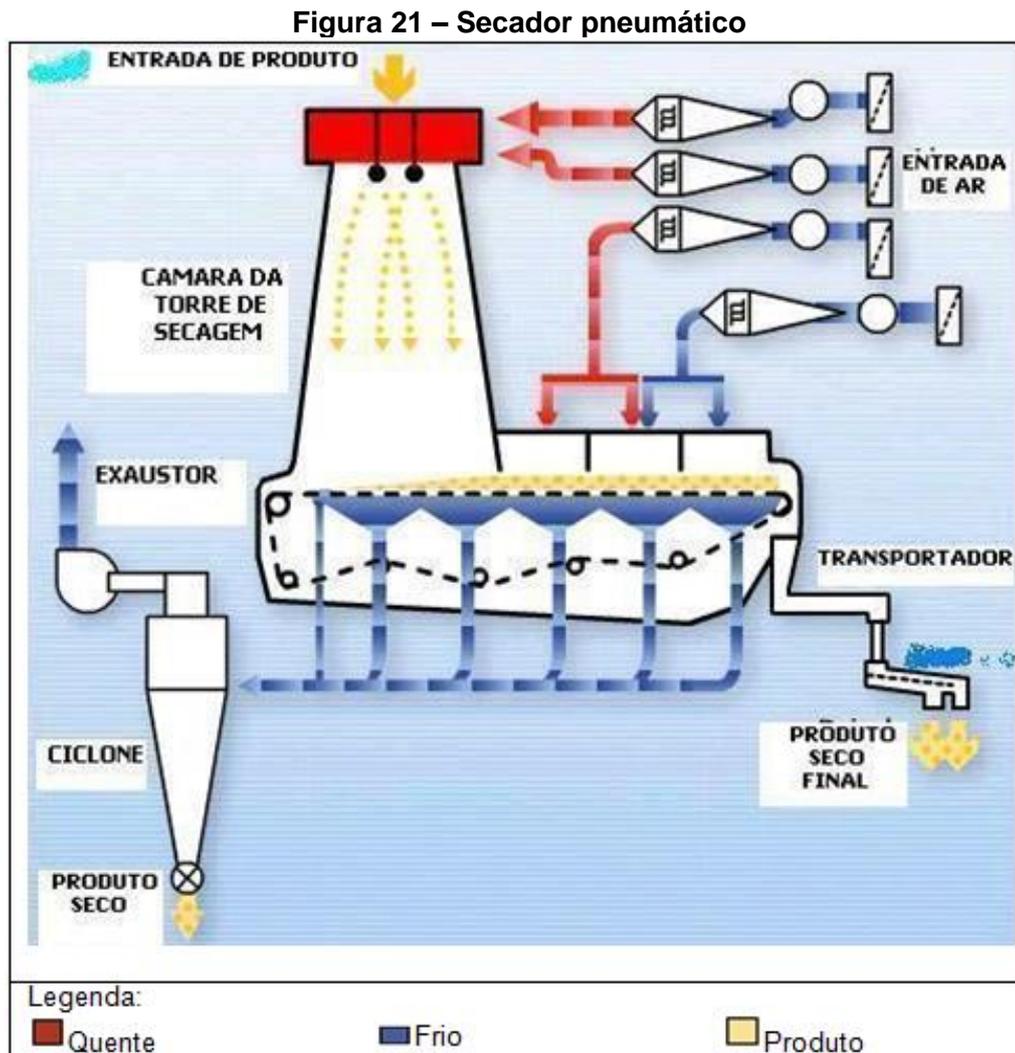


Fonte: Adaptada de Gava (1977).

Os fornos secadores ou *kilns*, de acordo com Gava (1977), são construções, em geral de dois pisos, usados em alguns países na secagem de malte, lúpulo, maçã e batata, sendo o produto inserido em sua parte superior. O mesmo autor afirma que o ar quente, obtido no primeiro piso pelo uso de forno ou estufa, passa pelo produto por movimentação natural ou com a ajuda de ventilador, e o material é mantido em contínua agitação, sendo o tempo de secagem relativamente longo.

Os secadores *flash dryers*, conforme Vasconcelos (2017), podem ser chamados de pneumáticos. Neles, segundo Cavichiolo (2010), o material úmido é transportado no interior de um tubo vertical por uma corrente ascendente de ar aquecido. Oliveira (2014) afirma que em dutos de secagem, a umidade é vaporizada do produto, formando o vapor de transporte, que é separado do material seco em um ciclone.

Vasconcelos (2017) diz que nos secadores pneumáticos, o tempo de retenção do alimento que está sendo seco, mesmo para sistemas de grande percurso, é da ordem de 4 a 5 segundos. De acordo com Cavichiolo (2010), esses secadores são frequentemente utilizados para secar materiais que possuem umidade superficial, característica comum a inúmeros resíduos celulósicos, como bagaço de laranja, bagaço de cana, borra de café, dentre outros. A Figura 21 mostra um secador pneumático.

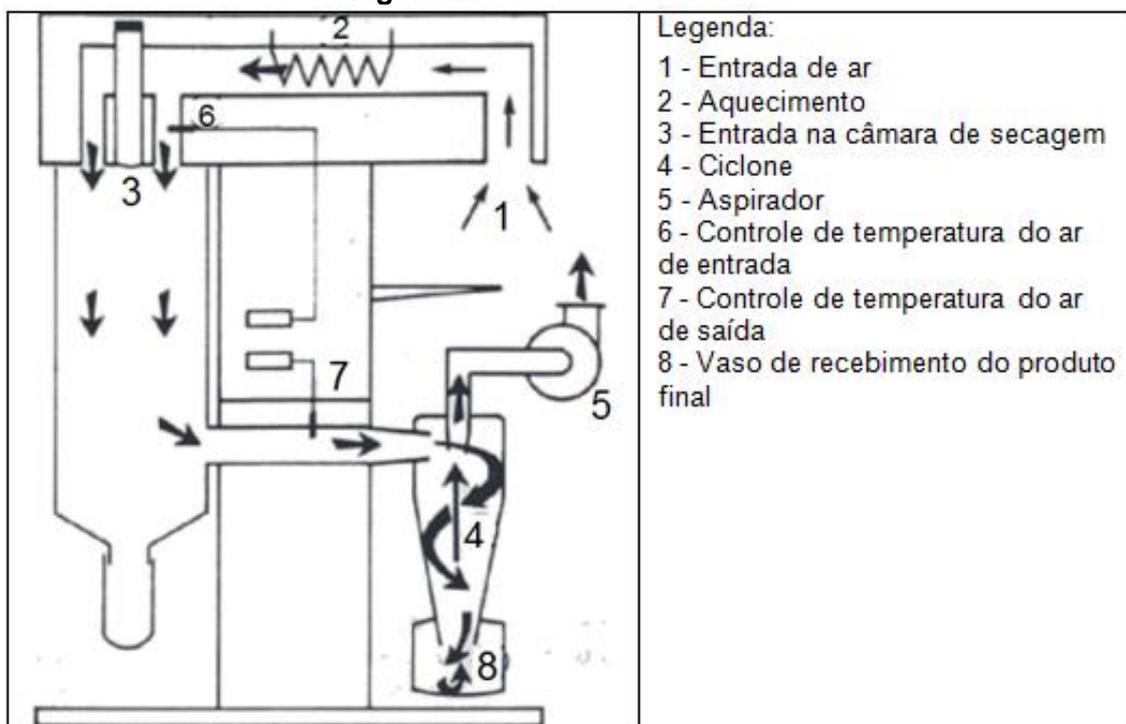


Os secadores *spray dryers*, segundo Luz (2016), podem ser chamados de atomizadores. Oi (2011) os chama de secadores pulverizadores. O processo de secagem, conforme Oliveira (2014), consiste em pulverizar o material em estado fluido dentro de uma câmara submetida a uma corrente controlada de ar quente, e dessa maneira se consegue uma evaporação dos solventes, em geral água, obtendo-se uma separação ultrarrápida dos sólidos e solúveis contidos. Para Gava (1977), a rápida evaporação da água permite manter baixa a temperatura das partículas de maneira que a alta temperatura do ar de secagem não afete

demasiadamente o produto. Oliveira (2014) afirma que o produto seco obtém uma mínima degradação, e o processo é finalizado com a recuperação do produto na forma de pó.

Gava (1977) diz que a pulverização do líquido na câmara de secagem do secador atomizador pode ser feita por discos ou bicos atomizadores. Para Oliveira (2014), o método de secagem por aspersão é o mais importante para a secagem de produtos alimentícios líquidos, e é aplicado a qualquer produto possível de bombear. Segundo Gava (1977), esse secador não é só usado na indústria alimentícia, mas também na indústria farmacêutica, cerâmica, de detergentes, dentre outras. Oliveira (2014) cita que os principais produtos comerciais secados nesse método são cereais e extratos de plantas, cafés e seus sucedâneos, leveduras, hidrolisados de proteínas, sucos e extratos de frutas. A Figura 22 mostra um exemplo de um secador atomizador.

Figura 22 – Secador atomizador



Fonte: Adaptada de Lannes e Medeiros (2003).

Os secadores *puff dryers*, segundo Gava (1977), possuem um sistema especial de desidratação utilizado na secagem de cereais expandidos e sucos de frutas, sendo que o produto desidratado apresenta uma estrutura porosa, que permite uma boa reconstituição em água fria ou outro líquido qualquer.

Os secadores *foam mat dryers*, conforme Gava (1977), podem também ser chamados de formatadores. Silva *et al.* (2008) chamam essa técnica de secagem de camada de espuma.

Esse método, de acordo com Melo *et al.* (2013), consiste em um processo de conservação através do qual o material líquido ou semilíquido é transformado em uma espuma estável por meio de batidura e incorporação de ar ou outro gás. Silva *et al.* (2008) dizem que após a transformação, o material é desidratado. Melo *et al.* (2013) afirmam que a secagem é realizada com ar aquecido, até o ponto em que impeça o crescimento de microrganismos, reações químicas e/ou enzimáticas. Para Silva *et al.* (2008), essa técnica destaca-se em relação à outras na obtenção de produtos alimentícios em pó.

Os secadores de tambor, de acordo com Gava (1977), também são conhecidos como rolo secadores, *drum dryers* e *roller dryers*. Celestino (2010) refere-se a eles como secadores de tambor rotativo. Gava (1977) diz que eles são constituídos de um ou dois tambores, rotativos, com diâmetro variável, aquecidos internamente pelo uso de vapor e usados na desidratação de produtos especiais, principalmente aqueles com alto teor de amido. O produto é aplicado na superfície do tambor e forma-se uma película que, conforme Celestino (2010), é desidratada devido ao contato com a parede quente do tambor, e raspada quando apresentar-se seca.

Segundo Gava (1977), vários desidratadores a vácuo possuem um sistema de aquecimento indireto, através de superfícies sólidas, sendo de difícil manejo, custo elevado e por isso de pouco uso na indústria alimentícia.

2.2.3 Secadores híbridos

De acordo com Oliveira (2014), os secadores híbridos combinam a utilização da energia solar com uma fonte convencional de energia. Ferreira e Candeias (2005) afirmam que a utilização de energia suplementar tem por finalidade manter uma temperatura constante no secador e aumentar a circulação do ar através do uso de ventiladores elétricos.

Conforme Ferreira e Candeias (2005), os secadores híbridos funcionam independente das condições atmosféricas, permitindo assim um melhor controle da secagem e um aumento da produção, pelo fato de o secador poder funcionar 24 horas por dia. Esse controle, segundo Freitas Neto (2015), é a principal vantagem desses secadores em relação aos solares, uma vez que as condições de secagem são mantidas uniformes pelo sistema auxiliar de energia.

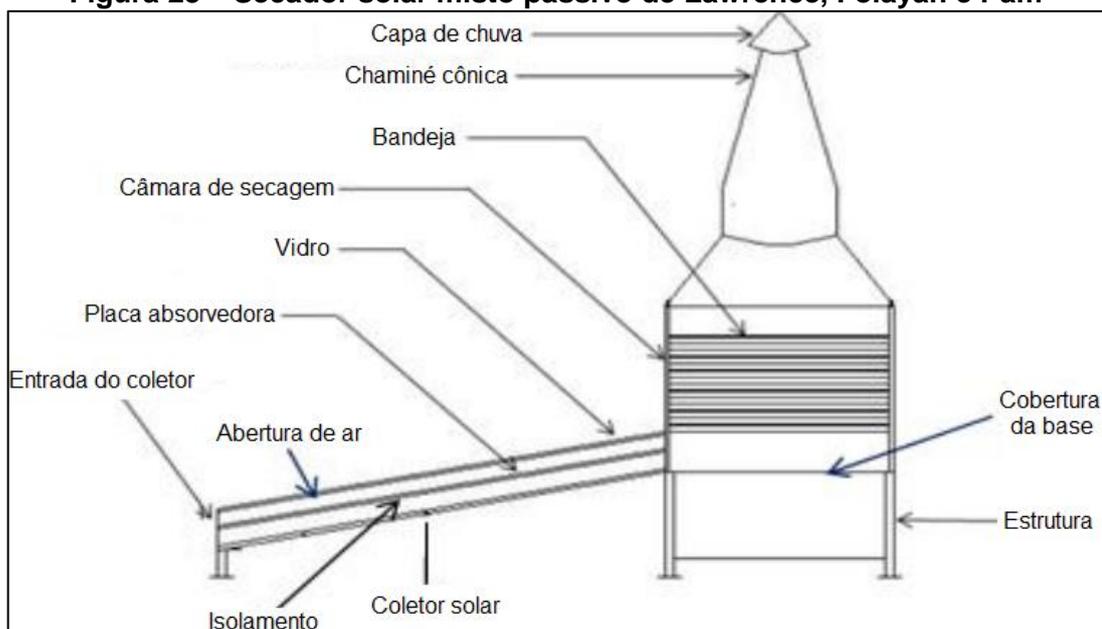
Ferreira e Candeias (2005) afirmam que o custo de investimento e de produção dos secadores híbridos são elevados, pois eles necessitam de abastecimento de energia, que pode ser combustível, eletricidade, gás ou resíduos agrícolas, além de pessoal qualificado para a sua

manutenção. Porém, Martins *et al.* (2010, apud Freitas Neto, 2015), afirmam que a vantagem desses secadores em relação aos artificiais é a economia, pois eles operam com uma fonte renovável como principal fonte de energia.

2.3 Análise exergética de secadores solares

Lawrence, Folayan e Pam (2013) construíram um secador solar misto passivo, mostrado na Figura 23, para secar mandioca. Foram realizados três testes, sendo o primeiro com 10% da capacidade total de carga do secador, o segundo com 25% e o terceiro com 50%. As eficiências de secagem médias do primeiro ao terceiro ensaio foram de 15,3%, 26% e 40%, respectivamente. As eficiências exergéticas médias encontradas do primeiro ao terceiro teste foram 39%, 45% e 34,5%, respectivamente. A radiação solar incidente direta na câmara de secagem contribuiu com 25% da energia total utilizada no processo.

Figura 23 – Secador solar misto passivo de Lawrence, Folayan e Pam



Fonte: Adaptada de Lawrence, Folayan e Pam (2013).

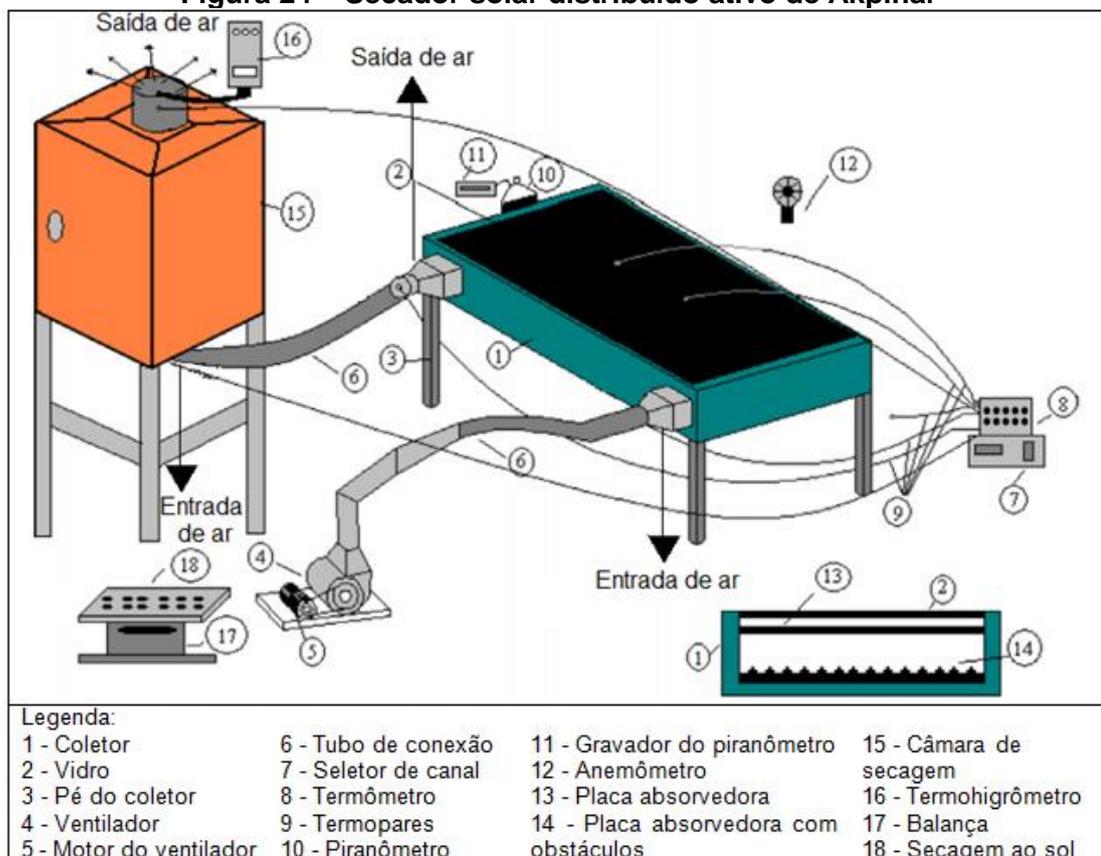
O secador de Lawrence, Folayan e Pam (2013) era composto de um coletor solar, que possuía uma placa absorvedora de ferro galvanizado pintada de preto, com cobertura de vidro de 4 mm de espessura, isolamento de serragem e lã de vidro, com 65 mm e 35 mm de espessura, respectivamente. A câmara de secagem, suportada por um cavalete de ferro, possuía o fundo coberto com uma placa de madeira compensada pintada de preto, com 20 bandejas sobre molduras com malhas de arame nas bases. As paredes laterais da câmara foram cobertas com vidros de 5 mm de espessura, fixados nas paredes com tubos pretos e vedações de

borracha. No topo da câmara, havia uma chaminé cônica de aço leve pintada de preto, que possui capa de chuva para evitar a entrada de água.

Akpinar (2010) utilizou chicanas em um secador solar distribuído ativo para secagem de folhas de hortelã e menta. Os valores de eficiência exérgica foram encontrados na faixa de 34,76% e 87,72%.

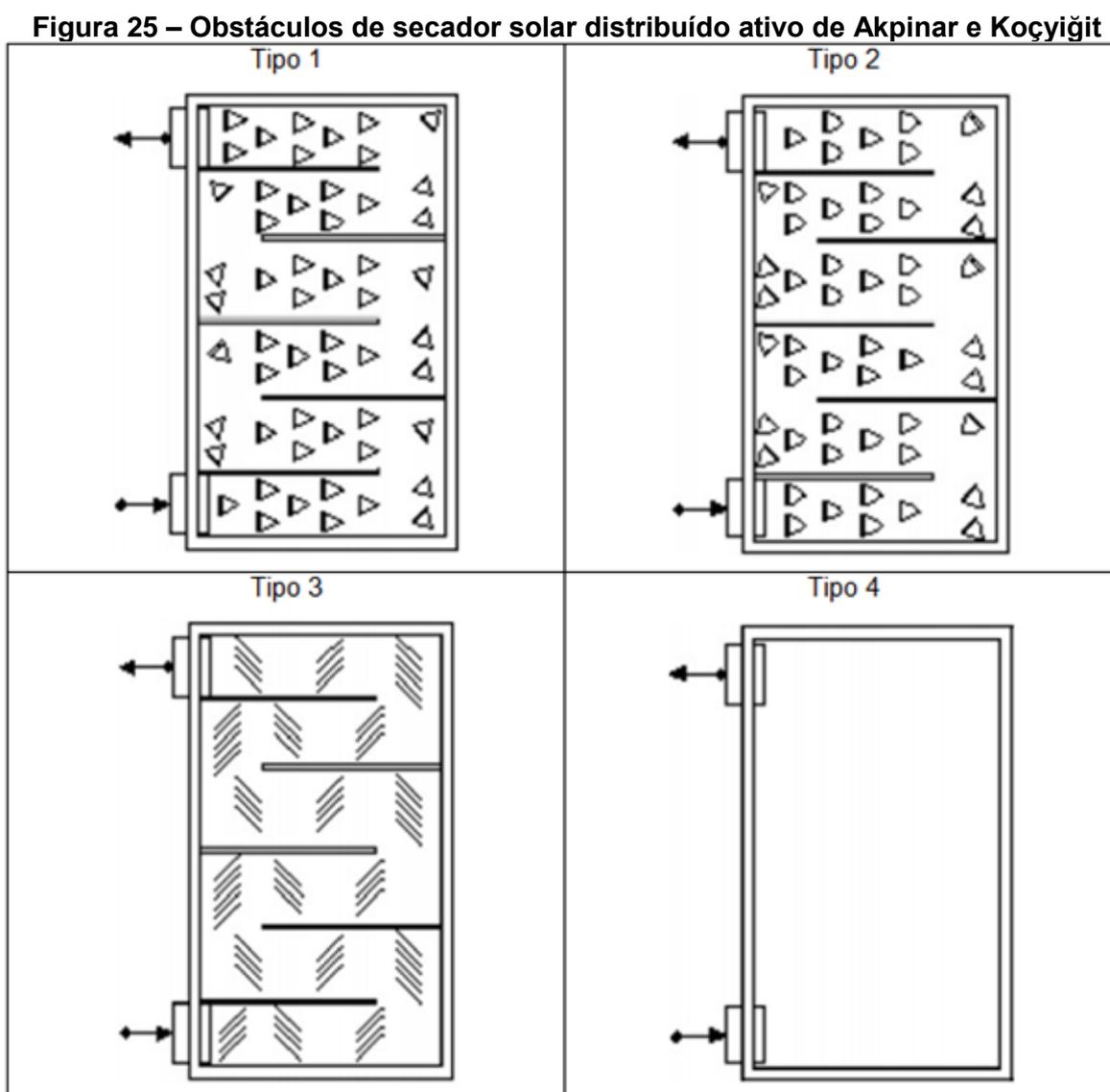
O secador solar de Akpinar (2010), mostrado na Figura 24, é composto por um coletor construído de chapas de aço inoxidável pintadas de preto de 0,5 mm de espessura, com a placa absorvedora de cobre também pintada de preto, com 0,4 mm de espessura, e chicanas para aumentar o coeficiente de transferência de calor e a temperatura de saída do ar, além de um vidro como cobertura transparente. O coletor foi inclinado à 23,7° em relação à horizontal. Um ventilador centrífugo foi conectado à câmara de secagem. A câmara foi construída em madeira, tendo na parte inferior um tubo circular para conectar o tubo provindo do coletor, sendo essa conexão feita com um tubo de alumínio espiral.

Figura 24 – Secador solar distribuído ativo de Akpinar



Fonte: Adaptada de Akpinar (2010).

Akpinar e Koçyiğit (2010) compararam o mesmo secador citado anteriormente com três tipos com obstáculos e um sem obstáculos, conforme a Figura 25, e obtiveram variação da eficiência térmica entre 20% e 82% e exergética entre 8,32% e 44,00%. A maior eficiência exergética foi encontrada com a placa absorvedora tipo 2 e a pior com a tipo 4. Esses resultados mostraram que a eficiência dos secadores solares depende significativamente da irradiação solar incidente, da geometria da superfície dos coletores e da extensão da linha de fluxo de ar.



Fonte: Adaptada de Akpinar e Koçyiğit (2010).

2.4 Tijolos cerâmicos

Materiais cerâmicos, conforme Silva (2006), são materiais inorgânicos não-metálicos, geralmente submetidos a temperaturas elevadas durante a produção ou uso, o que engloba

um espectro bastante amplo de materiais e processos de fabricação na obtenção de diferentes produtos. Assim, Grigoletti (2001) afirma que estão incluídos nesse grupo os materiais de cerâmica vermelha, como tijolos, blocos e telhas.

Os tijolos, segundo Silva (2014), podem ser fabricados a partir de argila, argila xistosa, silicatos de cálcio ou cimento, sendo a argila o elemento mais utilizado, devido à sua disponibilidade e ao seu baixo preço. De acordo com Florenzano (2016), como a matéria-prima é abundante no planeta, os produtos cerâmicos tornam-se elementos essenciais na história da humanidade, adquirindo gradativamente protagonismo na construção em várias regiões geograficamente e culturalmente distintas, tornando-se um dos principais materiais empregados em construções.

O tijolo cerâmico, segundo Costa (2014), pode ser considerado a melhor barreira térmica e ao fogo, em situações de construção civil, no que se refere ao comportamento estrutural em caso de incêndio.

Para Silva (2014), os tijolos foram uma inovação tecnológica importante, pois permitiram erguer edifícios resistentes à temperatura e à umidade, empregando a verticalidade nas construções, isto é, construindo edifícios cada vez mais altos. Florenzano (2016) afirma que apesar de grandes monumentos do passado terem sido construídos em pedra, as mais antigas e modestas habitações foram erguidas com tijolos crus, e depois com tijolos cozidos em fornos.

De acordo com Silva (2014), acredita-se que a primeira queima da argila ocorreu por volta de 23.000 a.C. Os primeiros vestígios da produção de tijolos, segundo Grigoletti (2001), surgiram com a descoberta de cavernas com desenhos ilustrando o método da época para fazer tijolos e outras peças, a cerca de 6.000 a.C.

Conforme Hollanda (1975, apud Grigoletti, 2001), a técnica construtiva em alvenaria de tijolos ou blocos cerâmicos remonta aos antigos caldeus e assírios, que em torno de 4.000 a.C., já usavam este material para erguer suas casas e palácios. Grigoletti (2001) afirma que no decorrer do desenvolvimento da humanidade, nos quatro continentes, existem manifestações do uso deste material, demonstrando sua versatilidade e aceitabilidade em diferentes culturas.

Até por volta dos 3000 a.C., de acordo com Correia (2014), os tijolos eram feitos manualmente em moldes com estrume ou palha incorporados para aumentar a resistência, e a partir dessa época descobriu-se que a cozedura ou queima conferia-lhes maior resistência e durabilidade.

Portanto, conforme o mesmo autor, apareceram assim os primeiros fornos, que inicialmente, pela sua condição de queima rudimentar, originavam uma grande variação de qualidade e dimensão dos tijolos, sendo que posteriormente, com a construção de fornos mais desenvolvidos, foi possível retirar melhor proveito da cozedura, obtendo assim um maior controle no processo de queima.

Florenzano (2016) afirma que apesar do tijolo ser conhecido e utilizado pelas sociedades do mundo antigo, coube ao Império Romano o aperfeiçoamento das técnicas construtivas existentes, inclusive as que utilizam o emprego do material cerâmico. O mesmo autor diz que no final do século II, os tijolos já eram produzidos por meio de um processo de fabricação semi-industrial, utilizando para o seu assentamento a argamassa de cal, obtida através da extração do calcário seguida do processo de queima.

Conforme Leseigneur e Guilluy (1988, apud Florenzano, 2016), com o surgimento da máquina a vapor de James Watt, no século XIX, a fabricação manual dos tijolos rapidamente cedeu lugar ao processo mecânico. Hoje, o processo de produção da cerâmica vermelha é composto de diversas etapas, que podem ser visualizadas na Figura 26.

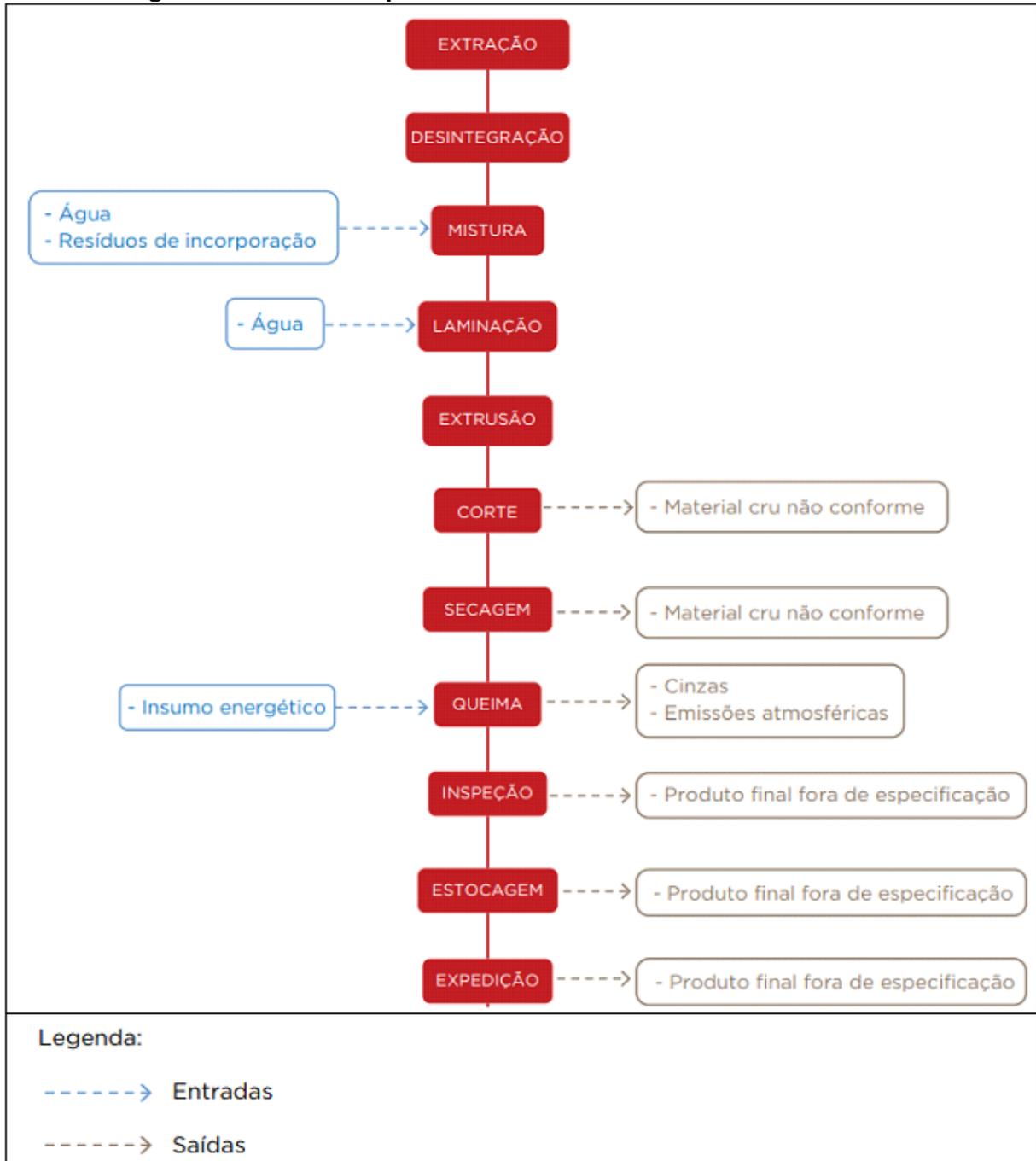
Segundo Santos (2015), a extração da argila ocorre nas jazidas, a céu aberto, com o auxílio de escavadeiras, pás-carregadeiras, trator de esteira com lâmina, entre outros equipamentos. Posses (2013) diz que a escolha dos equipamentos apropriados depende da forma e profundidade da jazida. Após a retirada, Santos (2015) afirma que a argila é transportada até o pátio da indústria onde é armazenada, passando por um período de descanso para acelerar a decomposição da matéria orgânica e sais solúveis.

Em seguida, conforme Santos (2015), a argila vai para um caixote alimentador, onde ocorre a desintegração e preparação da massa. Na mistura, Grun (2007) afirma que é utilizado um misturador com facas intercaladas, girando em sentidos opostos que diminuem ainda mais o tamanho dos torrões oriundos do desintegrador. Santos (2015) diz que diversos tipos de argilas e água são misturados nessa etapa.

Segundo Posses (2013), a argila, que se tornou pastosa devido à mistura, é reduzida a lâminas finas pelo laminador, que a faz passar entre dois cilindros de aço que giram a velocidades diferentes, e a massa, conforme Grun (2007), fica homogeneizada. Em seguida, ocorre a extrusão, onde Santos (2015) afirma que a massa laminar é forçada a passar por um bocal modelador, produzindo telhas, blocos ou tijolos. A extrusora, de acordo com Posses (2013), também é conhecida como maromba, e pode ser a vácuo ou não. Santos (2015) diz

que por inspeção visual, os produtos são selecionados e encaminhados ao setor de secagem ou, quando defeituosos, reintroduzidos na etapa de preparação da massa.

Figura 26 – Processo produtivo da indústria da cerâmica vermelha



Fonte: Adaptada de Santos (2015).

De acordo com Santos (2015), o corte pode ser realizado por cortadores manuais ou automáticos, conferindo ao produto a dimensão desejada. Posteriormente, acontece a secagem que, segundo Posses (2013), permite a eliminação da água utilizada na fabricação das peças. Santos (2015) afirma que a secagem pode ser natural ou artificial, sendo a natural

realizada em galpões ou em estufas cobertas com lona, e a artificial com a utilização de equipamentos, como secador, termômetros e higrômetros. Posses (2013) diz ainda que se a água fica distribuída quase homoganeamente entre as partículas de argila, deve ser retirada também homoganeamente, o que aproxima as partículas, reduz o tamanho das peças e produz retração linear em todas as dimensões, evitando assim formação de trincas e quebra.

Na queima, Santos (2015) diz que os produtos são submetidos a temperaturas elevadas, entre 800°C e 1000°C, que ocasionam a soldagem dos grãos de argila. Posses (2013) afirma que a alta temperatura é fundamental para os blocos cerâmicos passarem por transformações físico-químicas, alterações nas propriedades mecânicas e adquirirem as características inerentes dos produtos cerâmicos, como resistência, cor e dimensões. A fase posterior é a inspeção que, para Santos (2015), é muito comum em grandes empresas, onde é feito o controle de qualidade do produto através de testes de dimensões, permeabilidade e sonoridade, dentre outros.

Conforme Santos (2015), a estocagem e a expedição correspondem as últimas etapas do processo produtivo, onde o produto final é armazenado a céu aberto, no pátio da empresa, até ser direcionado ao mercado consumidor.

Para Silva *et al.* (2017), algumas variações dos tijolos cerâmicos são o tijolo maciço e o tijolo furado. Segundo Masson *et al.* (2016), o tijolo maciço também é conhecido como tijolo comum e não possui espaços vazios, sendo que no caso de alvenaria exposta é necessária a impermeabilização para menor absorção de água. A Figura 27 mostra alguns tijolos cerâmicos maciços.

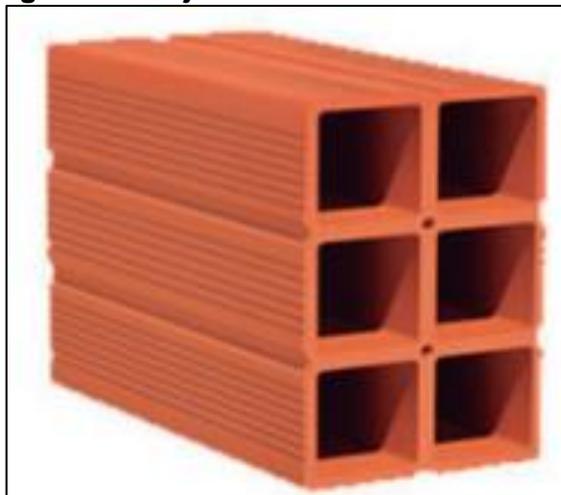
Figura 27 – Tijolos cerâmicos maciços



Fonte: Adaptada de Masson *et al.* (2016).

Masson *et al.* (2016) afirmam que o tijolo furado também é conhecido como tijolo baiano, e possui canais prismáticos, chamados de furos, que normalmente são de seis a oito, porém há uma grande variedade nessa quantia. A Figura 28 mostra um tijolo cerâmico com seis furos.

Figura 28 – Tijolo cerâmico com seis furos



Fonte: Adaptada de Masson *et al.* (2016).

Algumas vantagens dos tijolos com furos sobre os maciços, conforme Grigoletti (2001), são a menor massa por unidade de volume aparente, maior dificuldade de propagação de umidade e facilidade de dessecação das paredes, melhor isolamento térmico, aspecto mais uniforme se moldados à vácuo, e apesar da redução da seção horizontal, apresentam resistência da ordem dos tijolos maciços.

De acordo com Couto (2010), os tijolos cerâmicos podem ser classificados como materiais porosos, devido à sua microestrutura e a seus pequenos vazios disseminados em sua massa. Cadé, Nascimento e Lima (2005) afirmam que uma porosidade elevada acarreta elevados valores de absorção de água e baixa resistência mecânica dos materiais.

No trabalho de Azevedo (2004), foram calculados valores de porosidade do tijolo e da argila utilizada para fabricá-lo, sendo as porosidades totais 33,7% e 35,4%, respectivamente, e as porosidades aparentes 18,2% e 15,9%, na devida ordem. Outras propriedades dos tijolos podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades dos tijolos

Calor específico	790 J/kg.K
Condutividade térmica	0,72 W/m.K
Densidade	1.922 kg/m ³
Emissividade a 300K	0,93 - 0,96

Fonte: Adaptada de Çengel e Boles (2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo contém a descrição de toda instrumentação, dos materiais, dos equipamentos, do planejamento e dos procedimentos que foram utilizados nos ensaios de secagem.

3.1 Secador solar ativo misto

O secador utilizado neste trabalho foi projetado e construído pelo Prof. Dr. André Guimarães Ferreira, no laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG *campus I*, com financiamento do CEFET-MG através de recursos do PROPESQ.

Atualmente, o secador encontra-se sobre o telhado do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG *campus I*, como mostra a Figura 29.

Figura 29 – Secador solar instalado com chicanas



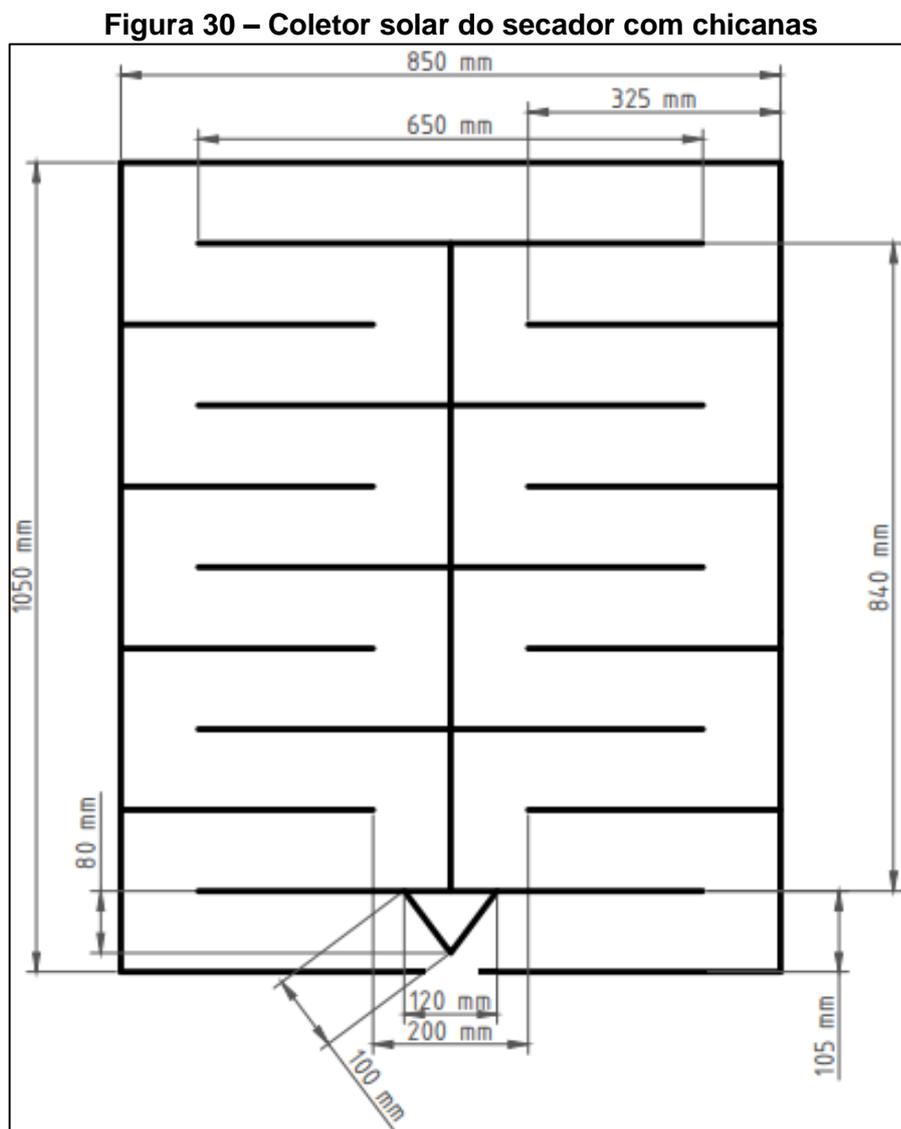
Fonte: Elaborada pelo autor.

O secador possui 1,8 m de comprimento e 1,0 m de largura. É dividido em coletor solar e câmara de secagem, ambas com cobertura de vidro temperado, e alturas de 0,35 m e 0,55 m, respectivamente. Sua carcaça foi feita com estrutura de madeira de baixo peso e alta resistência mecânica, revestida interna e externamente por chapas de aço galvanizado

pintadas na cor preto fosco, com isolamento interno de lã de vidro. A chapa do fundo funciona como placa absorvedora.

O secador apresenta um orifício na parte inferior frontal, onde é alocado um ventilador e uma tubulação suporte, para forçar a entrada de ar. O secador apresenta tubulação exaustora na parte superior traseira, para a saída do ar. Uma pequena porta na lateral da câmara de secagem é utilizada para inserir e remover os produtos.

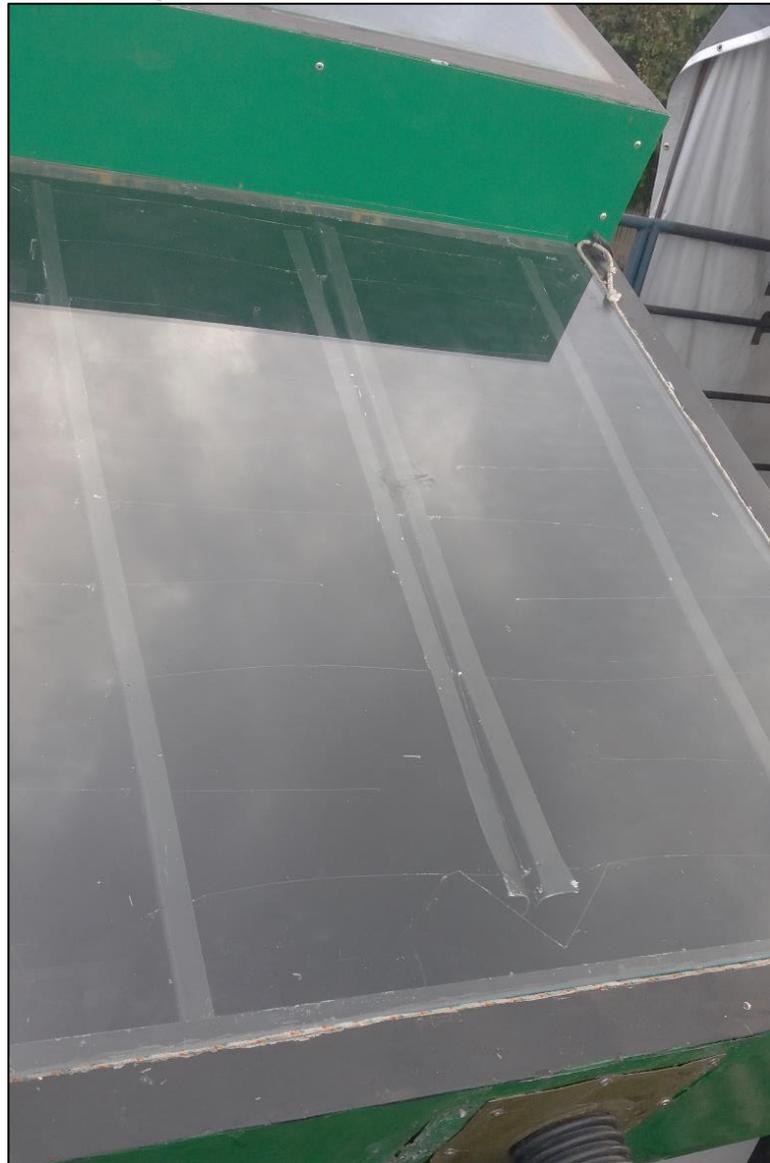
As chicanas foram construídas com a mesma altura do coletor, fixadas na placa absorvedora e tocando a cobertura de vidro, com as dimensões apresentadas na Figura 30, que representa uma visão da parte superior do coletor com as chicanas, sendo a entrada na parte inferior da figura. Foram feitas com chapas de aço galvanizado, pintadas na cor preto fosco.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Este formato de chicanas foi definido devido à quantidade de chapas disponíveis para construí-las e à localização da entrada de ar, dividindo seu fluxo e ampliando seu percurso. Procurou-se também evitar a formação de “bolsões de ar quente” no coletor. A Figura 31 mostra as chicanas instaladas no secador solar.

Figura 31 – Chicanas no secador solar

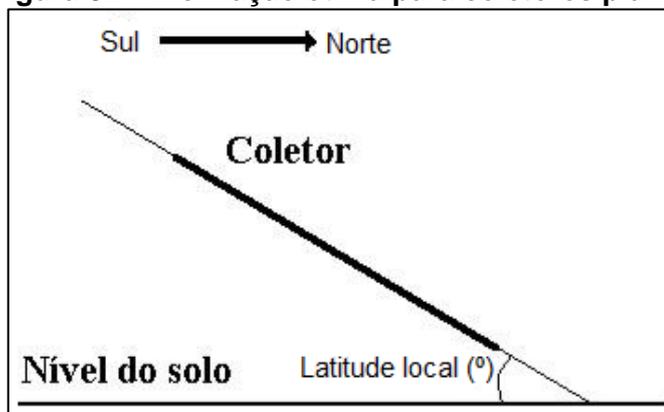


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para maximizar a energia coletada ao longo do ano, utilizou-se a inclinação ótima para coletores planos, como mostra a Figura 32, que é igual à latitude local voltada para o hemisfério oposto ao secador. No hemisfério sul, de acordo com Torre, Alves e Corrêa (2018), o sol nasce ao leste, sobe se inclinando ao norte, e se põe a oeste. Assim, uma inclinação voltada para o norte faz com que o coletor receba mais radiação solar ao longo do dia. Como

Belo Horizonte possui latitude $19,9^\circ$ sul, o secador foi posicionado com um ângulo de inclinação de 20° e voltado para o norte.

Figura 32 – Inclinação ótima para coletores planos



Fonte: Adaptada de Silva (2008, apud Vasconcelos, 2016).

3.2 Material cerâmico para secagem

No experimento, foram necessários 13 tijolos cerâmicos maciços, que possuíam aproximadamente 24 cm de comprimento, 9 cm de largura e 14 cm de altura. Foram utilizados 6 tijolos em cada uma das 2 bandejas alocadas na câmara de secagem nos três ensaios, como mostra a Figura 33, e um tijolo para o ensaio de determinação de umidade inicial.

Figura 33 – Tijolos na câmara de secagem



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os tijolos foram hidratados antes de serem inseridos no secador. Permaneceram por 12 horas em um recipiente plástico cilíndrico, com diâmetro de 58 cm e altura de 84 cm, contendo 80 L de água, e foram retirados 30 minutos antes do experimento, acumulando água devido à sua capacidade de adsorção.

3.3 Instrumentação para medição

A medição das massas das amostras antes da hidratação, após a hidratação e depois da secagem, além da massa das bandejas, foi feita com uma balança digital da marca Toledo modelo 9094C/4, com erro máximo de 1 g, exibida na Figura 34.

Figura 34 – Balança digital



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma estufa com controle de temperatura, de 40 L, da marca Nova Técnica, modelo NT522, foi utilizada para avaliar o teor de umidade inicial dos tijolos, e pode ser visualizada na Figura 35.

Figura 35 – Estufa



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a medição das temperaturas e umidades relativas da entrada e saída do escoamento de ar, foram utilizados dois sensores termo higrômetros digitais, com *data logger*, da marca Akso,

modelo AK174, conectados à entrada e à saída do secador, conforme a Figura 36, com a faixa de medição de temperatura de -30°C a 85°C e incerteza de $0,5^{\circ}\text{C}$, e faixa de medição de umidade relativa de 0% a 100%, com incerteza de 3%.

Figura 36 – Sensores termo higrômetros digitais



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a medição da velocidade de entrada do escoamento de ar, foi utilizado um sensor termo-higro-anemômetro, com *data logger* e impressora, da marca Icel, modelo AN-4870, acoplado à entrada do secador, como mostra a Figura 37, com a faixa de medição de velocidade de 0,1 m/s a 35 m/s e incerteza de 3%.

Figura 37 – Sensor termo-higro-anemômetro



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação às temperaturas no interior do secador, dois termômetros digitais da marca Icel, modelo TD-880, visualizados na Figura 38, foram utilizados na leitura de termopares do tipo K, com dois canais e sistema de armazenamento de dados.

Figura 38 – Termômetros digitais



Fonte: Elaborada pelo autor.

A irradiação solar incidente sobre o secador foi medida com um piranômetro da marca Kipp&Zonen, modelo CMP21, que funciona com temperaturas entre -40°C e 80°C , com incerteza de medição $<1\%$ para temperaturas entre -20°C e 50°C e que suporta incidência de radiação solar de até 4000 W/m^2 . Ele foi posicionado de forma que seu sensor estivesse no mesmo plano de inclinação do secador, com tolerância de $\pm 1^{\circ}$, e fixado no plano horizontal do equipamento. Para leitura das medições, o piranômetro foi acoplado a um multímetro digital da marca Exbom, modelo MD-180L, sendo ambos mostrados na Figura 39.

Figura 39 – Piranômetro e multímetro digital



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 Procedimentos dos ensaios

Foram realizados três ensaios de secagem solar, iniciados às 8h30 e finalizados às 15h30, considerando o horário solar, tendo assim 7h de duração.

A cada 30 minutos, mediu-se a irradiação solar incidente no plano coletor (W/m^2), a velocidade de entrada do escoamento (m/s), as umidades relativas de entrada (%) e saída (%), e as temperaturas de entrada (K), saída (K), da placa absorvedora (K), da entrada da câmara de secagem (K) e da parte superior da câmara de secagem (K), totalizando medições em 15 horários diferentes por ensaio. Um tijolo foi retirado a cada 15 minutos na primeira hora de experimento e a cada 30 minutos nas horas subsequentes, para a medição de sua massa (kg). A massa inicial (kg) e a massa final (kg) de cada amostra foram medidas no início e no fim dos ensaios.

Antes dos ensaios, a massa das bandejas vazias foi medida com a balança. Simultaneamente aos ensaios de secagem, foi realizado o ensaio de determinação de umidade inicial, no qual pesou-se um único tijolo e registrou-se sua massa. Em seguida, ele foi inserido na estufa e ajustou-se a temperatura para $(105,0 \pm 2,0)^\circ C$, permanecendo nela pelo período de 24h.

Após a secagem, o tijolo foi retirado da estufa e teve sua massa registrada. Foram então realizados os cálculos de umidade das amostras. Para encontrar os valores das umidades em base úmida, de acordo com Vasconcelos (2017), utilizou-se a Equação 1.

$$U_{bu} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \quad (1)$$

Onde U_{bu} é o teor de umidade instantânea em base úmida, m_i a massa inicial do produto e m_f a massa final.

Assim, foi possível encontrar também as umidades em base seca, que se relacionam com as umidades em base úmida, segundo Bortolaia (2011), pela Equação 2.

$$U_{bs} = \frac{U_{bu}}{100 - U_{bu}} \quad (2)$$

Onde U_{bs} é o teor de umidade instantânea em base seca.

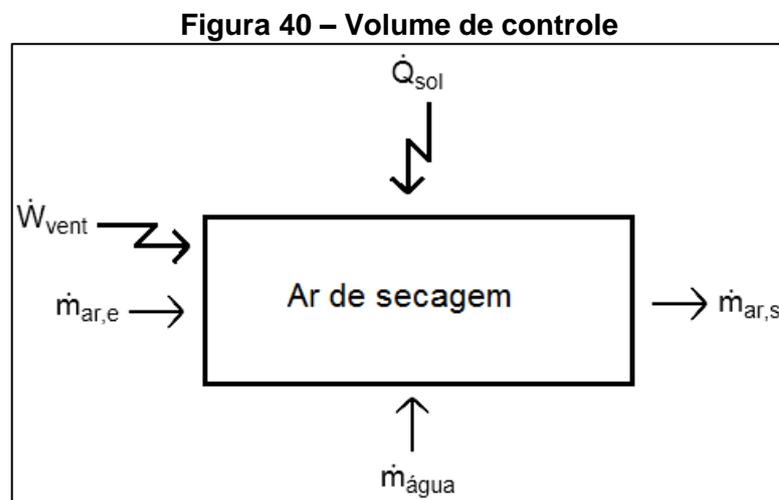
Para a secagem com as chicanas, removeu-se o vidro do coletor, inseriu-se as chicanas, que foram posicionadas e ajustadas com o auxílio de silicone, sendo o vidro recolocado sobre o coletor. Antes do início do ensaio, os equipamentos de medição foram alocados em seus respectivos locais e ligados.

Na secagem solar, a radiação solar incidente atravessa as coberturas de vidro, atingindo assim a placa absorvedora no coletor, e o produto de forma direta, iniciando a desidratação. Através do canal de entrada, o escoamento de ar entra no secador forçado pelo ventilador. O ar absorve então calor da placa por convecção, chega até a câmara de secagem e atravessa a bandeja com o produto a ser desidratado, removendo parte de sua umidade, que deixa o secador através do tubo exaustor. No ensaio com as chicanas, o trajeto do ar do coletor até a câmara de secagem cresce consideravelmente, aumentando assim a absorção de calor pelo ar.

Ao final da secagem solar, os dados foram coletados, as amostras pesadas, os equipamentos eletrônicos desligados e guardados. Limpou-se as bandejas e o secador após cada ensaio.

3.5 Análise energética dos secadores

Os processos de condicionamento de ar, de acordo com Akpinar (2010), podem ser modelados como processos de fluxo constante, analisados empregando-se os princípios de conservação de energia e conservação de massa de fluxo constante (tanto para ar seco quanto para umidade). Portanto, o secador utilizado pôde ser analisado em regime permanente. Nestas análises, o ar de secagem foi utilizado como volume de controle, como mostra a Figura 40.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O balanço de energia em um volume de controle para regime permanente, segundo Çengel e Boles (2013), pode ser escrito como mostra a Equação 3.

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \left[\dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \right] = \dot{W}_{vc} + \sum \left[\dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \right] \quad (3)$$

Onde \dot{Q}_{vc} é a taxa de transferência de calor no volume de controle, \dot{m}_e e \dot{m}_s são as vazões mássicas de entrada e saída, h_e e h_s são as entalpias específicas de entrada e saída, V_e e V_s são as velocidades de entrada e saída, g é a aceleração da gravidade, z_e e z_s são as alturas da entrada e saída em relação a algum ponto de referência externo e \dot{W}_{vc} é a potência de saída do volume de controle.

O secador utilizado possui variação do fluxo de ar desprezível nas energias cinética e potencial. Nesse caso, conforme Santos Filho (2009), a Equação 4 representa o balanço de energia.

$$\dot{Q}_{vc} + \sum (\dot{m}_e h_e) = \dot{W}_{vc} + \sum (\dot{m}_s h_s) \quad (4)$$

O princípio da conservação da massa para um processo de regime permanente, segundo Çengel e Boles (2013), pode ser expresso pela Equação 5.

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (5)$$

Assim, a Equação 6 aplica esse princípio para o ar.

$$\dot{m}_{ar,e} = \dot{m}_{ar,s} = \dot{m}_{ar} \quad (6)$$

Onde $\dot{m}_{ar,e}$ e $\dot{m}_{ar,s}$ são as vazões mássicas de ar seco na entrada e na saída, e \dot{m}_{ar} é a vazão mássica de ar seco.

Baseada também no princípio da conservação da massa para um processo de regime permanente, tem-se a Equação 7 para vapor d'água no volume em questão, que pode ser representada pela Equação 8.

$$\dot{m}_{\acute{a}gua} + \dot{m}_{ar,e} \omega_e = \dot{m}_{ar,s} \omega_s \quad (7)$$

$$\dot{m}_{\acute{a}gua} = \dot{m}_{ar} (\omega_s - \omega_e) \quad (8)$$

Onde $\dot{m}_{\text{água}}$ é a vazão mássica de água, ω_e e ω_s são as umidades absolutas do ar úmido de entrada e saída.

Assim, conforme o volume de controle em questão, a Equação 9 pode representar o balanço de energia, e pode ser escrita como mostra a Equação 10.

$$\dot{Q}_{\text{sol}} + \dot{m}_{\text{ar}}h_e = \dot{m}_{\text{ar}}h_s - \dot{W}_{\text{vent}} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{\text{sol}} + \dot{W}_{\text{vent}} = \dot{m}_{\text{ar}}(h_s - h_e) \quad (10)$$

Onde \dot{Q}_{sol} é a taxa de transferência de calor do sol e \dot{W}_{vent} é a potência do ventilador.

A eficiência térmica, conforme Galbiatti (2014), também é chamada de rendimento térmico. Esse valor, segundo Silva (2012), pode ser determinado pela Equação 11.

$$\eta_T = \frac{\dot{E}_U}{\dot{E}_C} \quad (11)$$

Onde η_T é a eficiência térmica, \dot{E}_U é a taxa de energia útil e \dot{E}_C a taxa de energia consumida.

A taxa de energia útil do secador solar, de acordo com Leon *et al.* (2002, apud Vasconcelos, 2017) pode ser determinada pela Equação 12.

$$\dot{E}_U = \dot{m}_{\text{ar}}(h_s - h_e) \quad (12)$$

Leon *et al.* (2002, apud Vasconcelos, 2017) afirmam que a taxa de energia consumida, para experimentos como o em questão, pode ser calculada pela Equação 13.

$$\dot{E}_C = \dot{Q}_{\text{sol}} + \dot{W}_{\text{vent}} \quad (13)$$

A taxa de transferência de calor do sol pode ser calculada com a Equação 14.

$$\dot{Q}_{\text{sol}} = AG \quad (14)$$

Onde A é a área da cobertura de vidro do secador e G é a irradiação solar incidente.

Portanto, a eficiência térmica de secagem pode ser representada pela Equação 15.

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_{ar}(h_s - h_e)}{AG + \dot{W}_{vent}} \quad (15)$$

Em um processo de secagem, Vasconcelos (2017) diz que autores sugerem que a eficiência de secagem pode ser calculada pela Equação 16.

$$\eta_S = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_C} \quad (16)$$

Onde η_S é a eficiência de secagem e \dot{E}_L é a taxa de energia latente.

A taxa de energia latente dos secadores, segundo Vasconcelos (2017), é determinada pela Equação 17.

$$\dot{E}_L = \dot{m}_{\acute{a}gua} h_{lv} \quad (17)$$

Onde h_{lv} é o calor latente de vaporização.

Portanto, a eficiência de secagem pode ser calculada pela Equação 18.

$$\eta_S = \frac{\dot{m}_{\acute{a}gua} h_{lv}}{AG + \dot{W}_{vent}} \quad (18)$$

Os valores das umidades absolutas, das entalpias, do calor latente de vaporização e também da densidade do ar, necessária para calcular seu fluxo de massa, foram determinados com o software *Engineering Equation Solver* (EES) V. 10.000-3D.

3.6 Análise exérgica dos secadores

A exergia, de acordo com Moran *et al.* (2013), é o máximo trabalho teórico possível de ser obtido a partir de um sistema global, composto por um sistema e o ambiente, conforme eles entram em equilíbrio. O sistema em equilíbrio, segundo Çengel e Boles (2013), possui exergia zero, sendo o estado do ambiente chamado de estado morto, uma vez que sob o ponto de vista termodinâmico, o sistema está praticamente morto, não podendo realizar qualquer trabalho após atingir esse estado.

O balanço exérgico geral, conforme Atmaca e Yumrutaş (2014), pode ser demonstrado pela Equação 19.

$$\sum \dot{X}_{\text{dest}} = \sum \dot{X}_e - \sum \dot{X}_s \quad (19)$$

Onde \dot{X}_{dest} é a taxa de exergia destruída, \dot{X}_e e \dot{X}_s são as taxas de exergia de entrada e saída.

Segundo Çengel e Boles (2013), a exergia destruída pode ser descrita conforme a Equação 20.

$$X_{\text{dest}} = T_0 S_{\text{ger}} \quad (20)$$

Onde X_{dest} é a exergia destruída, T_0 é a temperatura de referência e S_{ger} é a geração de entropia.

Assim, a taxa de exergia destruída no volume de controle utilizado pode ser calculada pela Equação 21.

$$\dot{X}_{\text{dest}} = T_{\text{amb}} \dot{S}_{\text{ger}} \quad (21)$$

Onde T_{amb} é a temperatura ambiente e \dot{S}_{ger} é a taxa de geração de entropia.

O balanço de entropia em um processo com escoamento em regime permanente, conforme Çengel e Boles (2013), pode ser demonstrado pela Equação 22.

$$\dot{S}_{\text{ger}} = \sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad (22)$$

Onde s_e e s_s são as entropias específicas de entrada e saída, \dot{Q}_k é a taxa de transferência de calor de alguma fonte e T_k é a temperatura dessa fonte.

Considerando o volume de controle em questão, o balanço de entropia pode ser escrito como mostram a Equação 23 e a Equação 24.

$$\dot{S}_{\text{ger}} = \dot{m}_{\text{ar}} s_s - \dot{m}_{\text{ar}} s_e - \frac{\dot{E}_U}{T_{\text{med}}} \quad (23)$$

$$\dot{S}_{\text{ger}} = \dot{m}_{\text{ar}} (s_s - s_e) - \frac{\dot{E}_U}{T_{\text{med}}} \quad (24)$$

Onde T_{med} é a média entre as temperaturas de entrada e saída do volume de controle.

A exergia do sol, de acordo com Chowdhury, Bala e Haque (2011), pode ser calculada pela Equação 25.

$$X_{\text{sol}} = \left[1 - \frac{4T_0}{3T_{\text{sol}}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{\text{sol}}} \right)^4 \right] \cdot Q_{\text{sol}} \quad (25)$$

Onde X_{sol} é a exergia do sol, T_{sol} é a temperatura do sol e Q_{sol} o calor transferido do sol.

Portanto, a taxa de exergia do sol pode ser descrita, para os ensaios em questão, pela Equação 26.

$$\dot{X}_{\text{sol}} = \left[1 - \frac{4T_{\text{amb}}}{3T_{\text{sol}}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{sol}}} \right)^4 \right] \cdot \dot{Q}_{\text{sol}} \quad (26)$$

Onde \dot{X}_{sol} é a taxa de exergia do sol.

A taxa de exergia fornecida para o volume de controle em questão depende da taxa de exergia do sol e da potência do ventilador. Assim, a Equação 27 mostra o seu cálculo.

$$\dot{X}_{\text{forn}} = \dot{X}_{\text{sol}} + \dot{W}_{\text{vent}} \quad (27)$$

Onde \dot{X}_{forn} é a taxa de exergia fornecida.

Maia *et al.* (2013) afirmam que a eficiência exergética pode ser representada pela Equação 28.

$$\eta_{\text{II}} = 1 - \frac{\dot{X}_{\text{dest}}}{\dot{X}_{\text{forn}}} \quad (28)$$

Onde η_{II} é a eficiência exergética.

A taxa de transferência de exergia associada à transferência de calor, conforme Moran *et al.* (2013), é dada pela Equação 29.

$$\dot{X}_{\text{Q,k}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k \quad (29)$$

Onde $\dot{X}_{\text{Q,k}}$ é a taxa de exergia associada à transferência de calor de alguma fonte.

Analisando apenas a taxa de transferência de exergia associada à transferência de calor latente para o volume de controle em questão, tem-se a Equação 30.

$$\dot{X}_{Q,L} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{med}}\right) \dot{E}_L \quad (30)$$

Onde $\dot{X}_{Q,L}$ é a taxa de exergia associada à transferência de calor latente.

Çengel e Boles (2013) afirmam que a eficiência exergetica do sistema também pode ser escrita pela Equação 31.

$$\eta_{II} = \frac{\dot{X}_{rec}}{\dot{X}_{form}} \quad (31)$$

Onde \dot{X}_{rec} é a taxa de exergia recuperada.

Portanto, a Equação 32 pode definir a eficiência exergetica do sistema em questão relacionada ao calor latente.

$$\eta_{II,latente} = \frac{\dot{X}_{Q,L}}{\dot{X}_{form}} \quad (32)$$

Onde $\eta_{II,latente}$ é a eficiência exergetica latente.

Os valores das entropias foram determinados com o software EES V. 10.000-3D.

3.7 Análise de incertezas

Na análise de incerteza dos instrumentos de medição, considerou-se os valores de erro máximo presentes nos devidos manuais de fabricação, exceto para o termômetro digital com sensores termopares do tipo K, que foram calibrados no Laboratório do Mestrado em Engenharia da Energia do *campus II* do CEFET-MG.

Na determinação da incerteza combinada dos termopares, conforme Gonçalves (2012), cujo padrão possui probabilidade de enquadramento de 68%, identificou-se todas as fontes de incerteza, e os cálculos foram realizados através da Equação 33.

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} \quad (33)$$

Onde u_c é a incerteza combinada a 68%, u_1 a incerteza da resolução do padrão de calibração, u_2 a incerteza da resolução do sistema de medição, u_3 a incerteza do padrão, u_4 a incerteza da calibração do sistema de medição e u_5 a incerteza do processo de medição.

Considerando o grau de confiança de 95%, Gonçalves (2004, apud Vasconcelos, 2017) afirma que o número efetivo de graus de liberdade pode ser dado pela Equação 34.

$$\frac{u_c^4}{\gamma_{ef}} = \frac{u_1^4}{\gamma_1} + \frac{u_2^4}{\gamma_2} + \frac{u_3^4}{\gamma_3} + \frac{u_4^4}{\gamma_4} + \frac{u_5^4}{\gamma_5} \quad (34)$$

Onde γ_{ef} é o número de graus de liberdade efetivos e $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4,$ e γ_5 os números de grau de liberdade 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

A partir do número efetivo de graus de liberdade, segundo Oliveira (2014), é possível determinar o coeficiente de Student, também conhecido como o fator de abrangência de 95%, e assim obter a incerteza expandida, que corresponde à faixa de valores que enquadra a incerteza com nível de confiança de aproximadamente 95%, como mostra a Equação 35.

$$U_{95\%} = K_{95\%} \cdot u_c \quad (35)$$

Onde $U_{95\%}$ é a incerteza expandida a 95% e $K_{95\%}$ o fator de abrangência.

O resultado de medição dos instrumentos, conforme Vasconcelos (2017), foi calculado pela Equação 36.

$$RM = MI + c_c \pm U_{95\%} \quad (36)$$

Onde RM é o resultado de medição dos instrumentos, MI a média das indicações e c_c a correção combinada.

De acordo com Oliveira (2014), a correção combinada pode ser calculada a partir de uma equação gerada entre a temperatura e os dados de correção do termopar. Assim, esse valor foi encontrado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados, analisados, discutidos e comparados os resultados das medições experimentais realizadas na estufa e no secador solar com e sem chicanas.

4.1 Determinação do teor de umidade inicial

O ensaio de determinação do teor de umidade inicial dos tijolos foi realizado com uma amostra, inserida no interior da estufa elétrica. O valor da umidade inicial de base úmida do tijolo foi obtido a partir do método padrão da estufa, nas condições de $(105,0 \pm 2,0)^\circ\text{C}$, com duração de 24 horas, conforme descrito no item 3.4. Na Tabela 2, apresentam-se os valores de massa medidos e umidade inicial de base úmida.

Tabela 2 – Ensaio de umidade inicial

Massa inicial	$(2,3860 \pm 0,0010)$ kg
Massa final	$(2,0190 \pm 0,0010)$ kg
Umidade inicial	$(15,381 \pm 0,055)\%$

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Ensaios de secagem solar

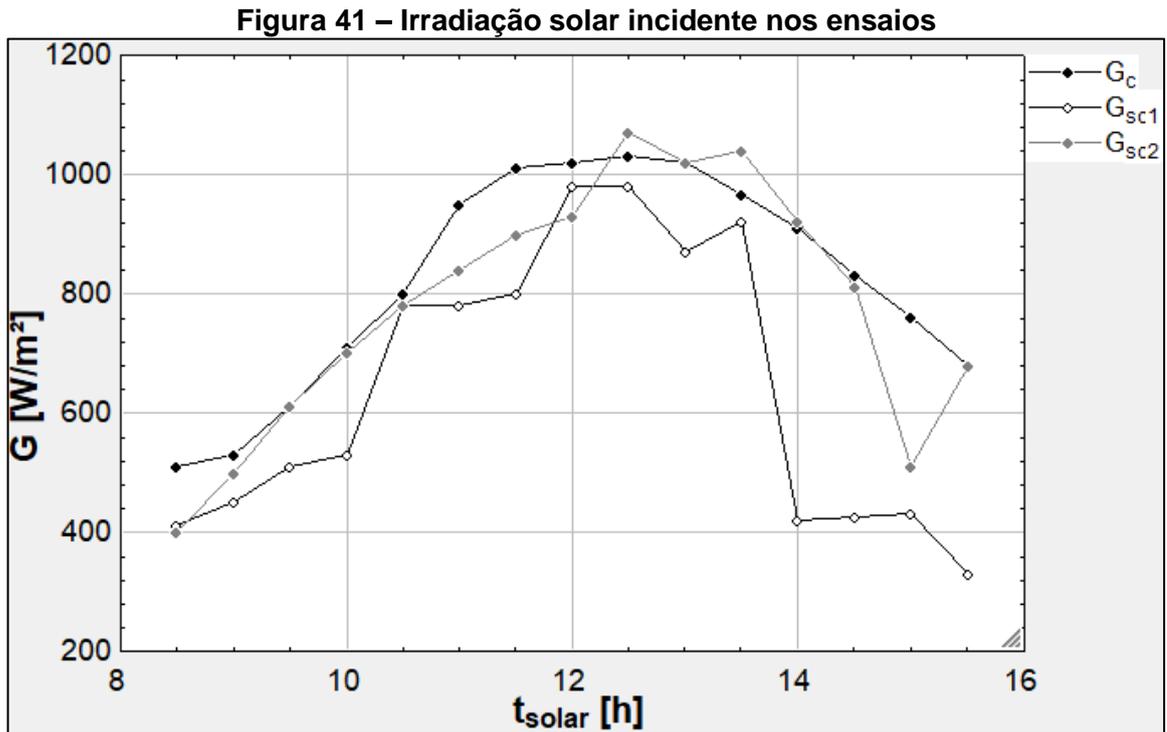
Realizou-se o primeiro ensaio de secagem solar no dia 10/01/2019, com as chicanas instaladas no secador. No dia 11/01/2019, o primeiro ensaio com o secador sem as chicanas foi feito. Devido à alta nebulosidade nesse dia, realizou-se um novo ensaio no secador sem as chicanas no dia 14/01/2019.

Valores de irradiação solar incidente no plano do coletor nos ensaios, que é o parâmetro de maior influência no processo de secagem solar, podem ser observados na Tabela 3 e na Figura 41.

Tabela 3 – Irradiação solar incidente nos ensaios

G (W/m²)	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	1030 ± 10	$980,0 \pm 9,8$	1070 ± 11
Média	$822,3 \pm 2,1$	$641,0 \pm 1,8$	$780,7 \pm 2,1$

Fonte: Elaborada pelo autor.



Na Tabela 3, G é o valor da irradiação solar incidente. Na Figura 41, o termo t_{solar} representa o horário solar, e G_c , G_{sc1} e G_{sc2} representam os valores de irradiação solar incidente no ensaio com chicanas, no primeiro ensaio sem chicanas e no segundo ensaio sem chicanas, respectivamente.

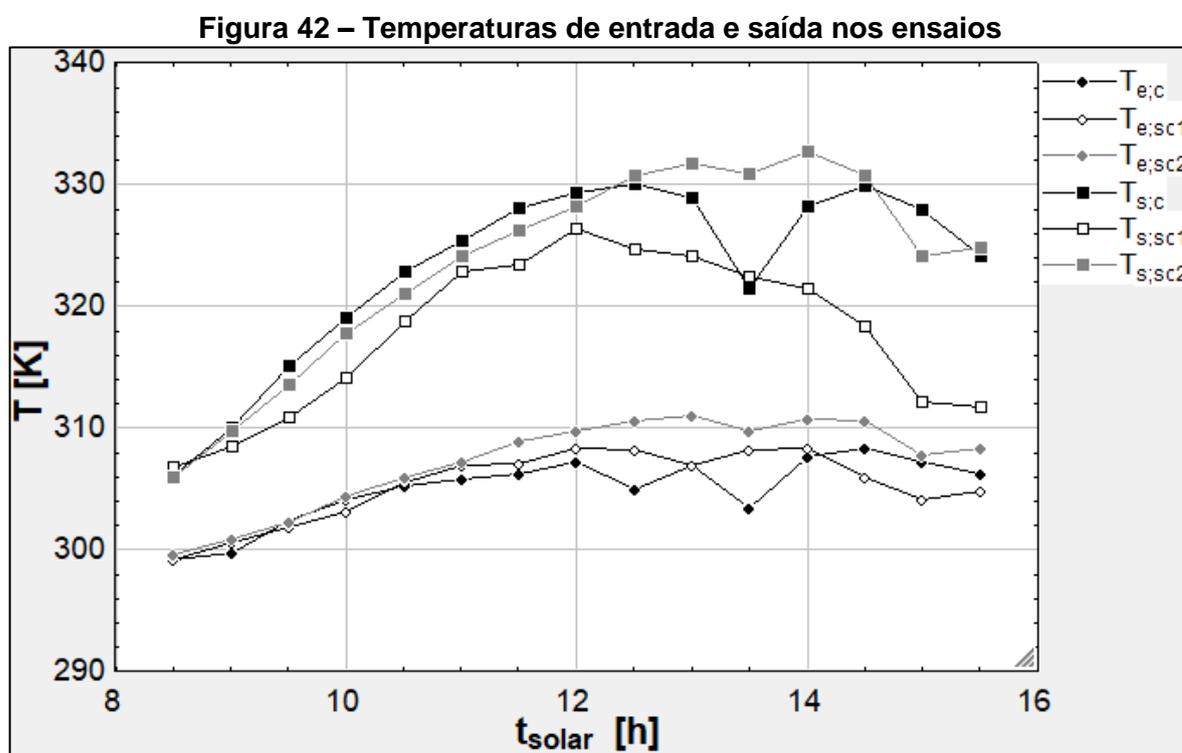
Em todos os ensaios, o maior valor medido de G ocorreu às 12h30 do horário solar. Os valores próximos a este horário também foram altos, o que mostra que irradiação solar incidente próxima ao horário solar das 12h é mais alta. O maior valor médio ocorreu no ensaio com as chicanas e o maior valor máximo no segundo ensaio sem as chicanas. Pode-se observar que, em diversos momentos do dia, as medições desses dois ensaios apresentaram valores muito próximos, possibilitando assim uma melhor comparação. Já no primeiro ensaio sem as chicanas, todos os valores desse parâmetro são inferiores aos do ensaio com chicanas, sendo que em muitos pontos essa diferença é considerável, principalmente a partir das 14h, quando houve muita nebulosidade neste experimento.

Tabela 4 – Temperaturas de entrada e saída nos ensaios

T (K)	T_e (K)			T_s (K)		
	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	308,30 ±0,50	308,40 ±0,50	311,10 ±0,50	330,10 ±0,50	326,40 ±0,50	332,70 ±0,50
Média	304,90 ±0,13	305,20 ±0,13	307,10 ±0,13	323,10 ±0,13	317,70 ±0,13	323,50 ±0,13

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 4 e a Figura 42 mostram as temperaturas de entrada e de saída do secador nos três ensaios.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 4, T , T_e e T_s representam, respectivamente, temperatura, temperatura de entrada e temperatura de saída. Na Figura 42, $T_{e,c}$ e $T_{s,c}$ são as temperaturas de entrada e saída no ensaio com chicanas, $T_{e,sc1}$ e $T_{s,sc1}$ correspondem aos mesmos termos no primeiro ensaio sem chicanas e $T_{e,sc2}$ e $T_{s,sc2}$ no segundo ensaio sem chicanas.

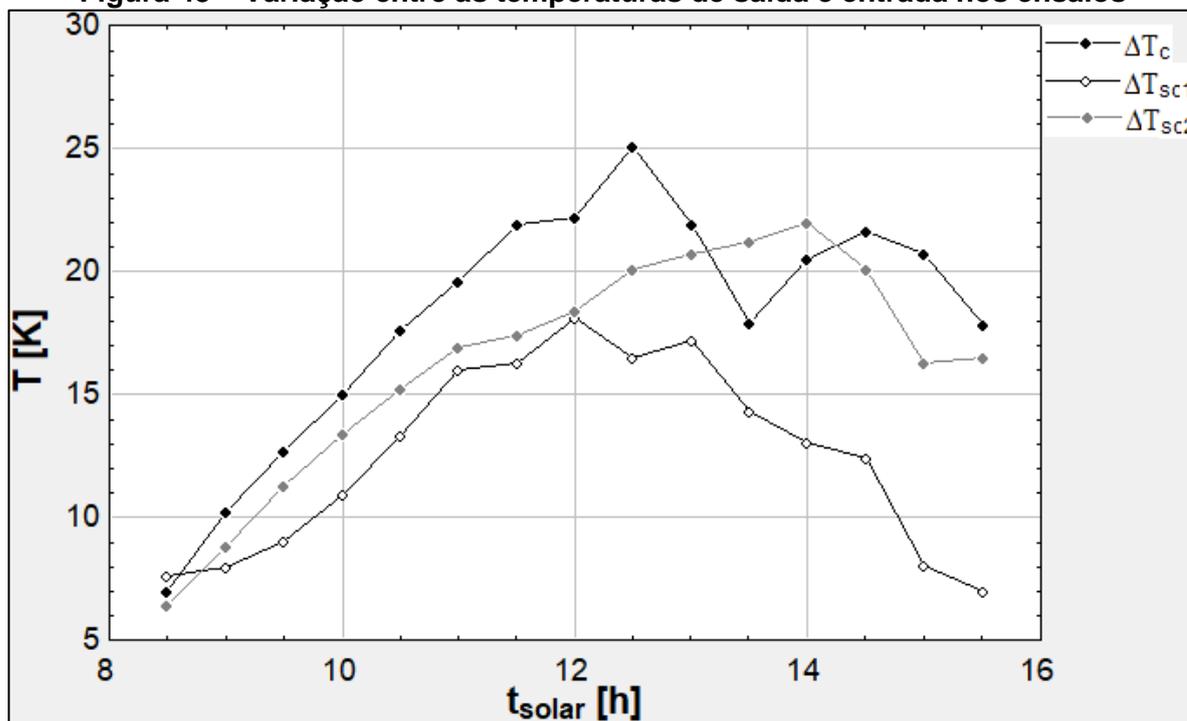
Pode-se observar que as temperaturas de saída são sempre maiores que as de entrada, pois o ar é aquecido no interior do secador solar. Apesar de as temperaturas de entrada do segundo ensaio sem chicanas serem maiores em quase todos os pontos que as do com chicanas, as de saída do com chicanas foram maiores até as 12h em todas as medições. A temperatura inicial de saída do primeiro ensaio sem chicanas foi maior que a dos outros. O outro único horário solar em que a temperatura de saída desse ensaio superou a de outro foi às 13h30, onde superou a do ensaio com chicanas. Isso aconteceu devido à nebulosidade próxima a esse horário no dia 10/01, o que mostra a influência direta da irradiação solar incidente na temperatura ar de secagem.

A Tabela 5 e a Figura 43 mostram a variação entre as temperaturas de saída e entrada nos ensaios.

Tabela 5 – Variação entre as temperaturas de saída e entrada nos ensaios

ΔT (K)	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	25,10±0,71	18,10±0,71	22,00±0,71
Média	18,11±0,18	12,50±0,18	16,31±0,18

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 43 – Variação entre as temperaturas de saída e entrada nos ensaios

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 5, ΔT representa a variação entre as temperaturas de saída e entrada nos ensaios. Na Figura 43, ΔT_c , ΔT_{sc1} e ΔT_{sc2} são as variações entre as temperaturas de saída e entrada no ensaio com chicanas, no primeiro ensaio sem chicanas e no segundo ensaio sem chicanas, nessa ordem.

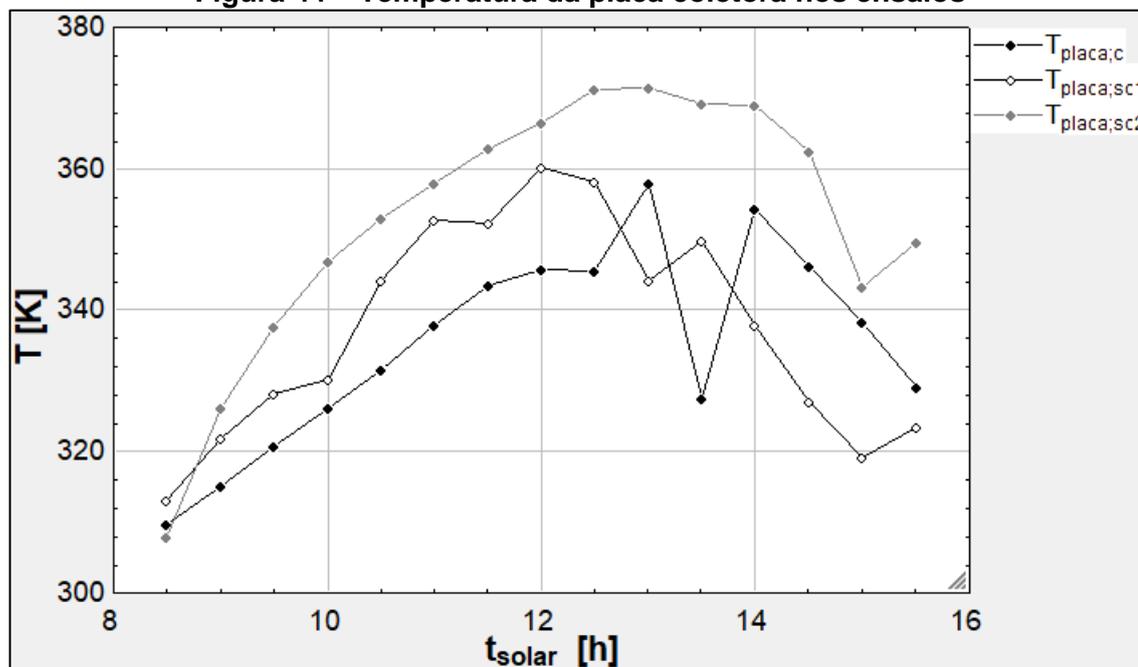
A única variação entre as temperaturas de saída e entrada no primeiro ensaio sem chicanas maior que a dos outros experimentos foi a inicial. O ensaio com chicanas teve as variações mais altas que o segundo ensaio sem chicanas em quase todas as medições, exceto às 13h30 e às 14h, horários próximos à ocorrência de nebulosidade no dia 10/01. O ensaio com chicanas possuiu as maiores variações máxima e média.

A Tabela 6 e a Figura 44 mostram as temperaturas da placa coletora nos três ensaios. O termopar que mediu essas temperaturas foi fixado exatamente no centro da placa, sobre a mesma.

Tabela 6 – Temperatura da placa coletora nos ensaios

T_{placa} (K)	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	358,00±0,40	360,10±0,40	371,50±0,40
Média	335,30±0,10	337,50±0,10	353,00±0,10

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 44 – Temperatura da placa coletora nos ensaios

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 6, T_{placa} representa a temperatura da placa coletora e na Figura 44, $T_{\text{placa;c}}$, $T_{\text{placa;sc1}}$ e $T_{\text{placa;sc2}}$ são as temperaturas da placa coletora nos ensaios com chicanas, primeiro ensaio sem chicanas e segundo ensaio sem chicanas, respectivamente.

Pode-se observar que, considerando a partir das 9h, a temperatura da placa no segundo ensaio sem chicanas sempre foi maior que a dos outros ensaios. A temperatura da placa no primeiro ensaio sem chicanas foi maior que a do com chicanas até as 12h30 e às 13h30, horário próximo à nebulosidade no dia 10/01. A partir das 14h, a nebulosidade esteve muito presente no dia 11/01.

As maiores temperaturas máxima e média foram no segundo ensaio com chicanas, seguidas do primeiro ensaio sem chicanas e do com chicanas. Assim, percebeu-se que, quando não há presença das chicanas, a temperatura da placa é superior, pois a irradiação solar incidente atinge quase toda superfície da placa, e as chicanas impedem que isso aconteça, cobrindo parte da placa e sombreando grande parte de sua superfície. Comprovou-se também o

impacto negativo da nebulosidade na irradiação solar incidente sobre o secador, o que afeta diretamente na temperatura da placa.

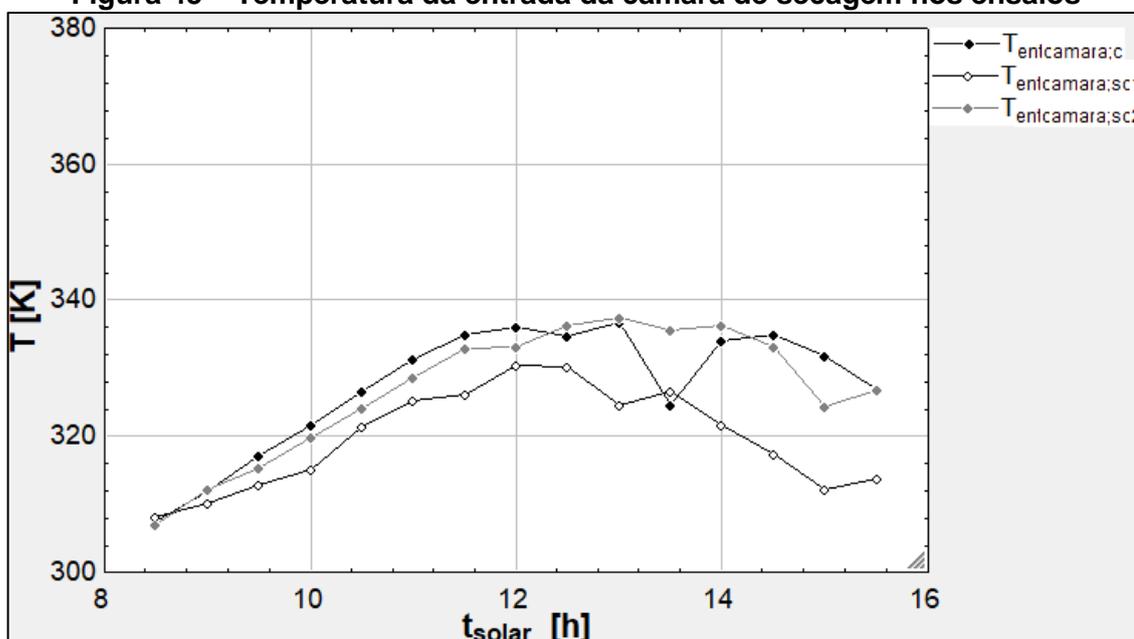
A Tabela 7 e a Figura 45 mostram as temperaturas da entrada da câmara de secagem nos três ensaios. O termopar que mediu essas temperaturas foi alocado entre o coletor e a câmara de secagem, na parte central inferior.

Tabela 7 – Temperatura da entrada da câmara de secagem nos ensaios

$T_{\text{entcamara}} \text{ (K)}$	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	$336,70 \pm 0,40$	$330,40 \pm 0,40$	$337,40 \pm 0,40$
Média	$327,40 \pm 0,10$	$319,70 \pm 0,10$	$326,90 \pm 0,10$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 45 – Temperatura da entrada da câmara de secagem nos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 7, $T_{\text{entcamara}}$ é a temperatura da entrada da câmara de secagem e na Figura 45, $T_{\text{entcamara;c}}$, $T_{\text{entcamara;sc1}}$ e $T_{\text{entcamara;sc2}}$ são as temperaturas da entrada da câmara de secagem nos ensaios com chicanas, primeiro ensaio sem chicanas e segundo ensaio sem chicanas, nessa ordem.

Observou-se que as temperaturas da entrada da câmara de secagem no primeiro ensaio sem chicanas, a partir das 9h, foram inferiores em todas as medições se comparadas às dos outros ensaios, exceto às 13h30 em relação ao ensaio com chicanas, devido à nebulosidade. Considerando apenas o segundo ensaio sem chicanas e o ensaio com chicanas, as

temperaturas no com chicanas foram superiores em sete medições antes das 12h e apenas em duas após esse horário.

Os maiores valores máximo e médio de temperatura na entrada da câmara de secagem foram no ensaio com chicanas. Isso mostra que, apesar da placa não ter se aquecido tanto quando nos outros ensaios, a temperatura média na entrada da câmara de secagem foi maior nesse experimento, mostrando a grande influência do maior trajeto que o ar de secagem percorreu, e que as chicanas foram aquecidas e transferiram calor para o ar, pois a temperatura da entrada da câmara caiu significativamente nesse ensaio no momento de nebulosidade.

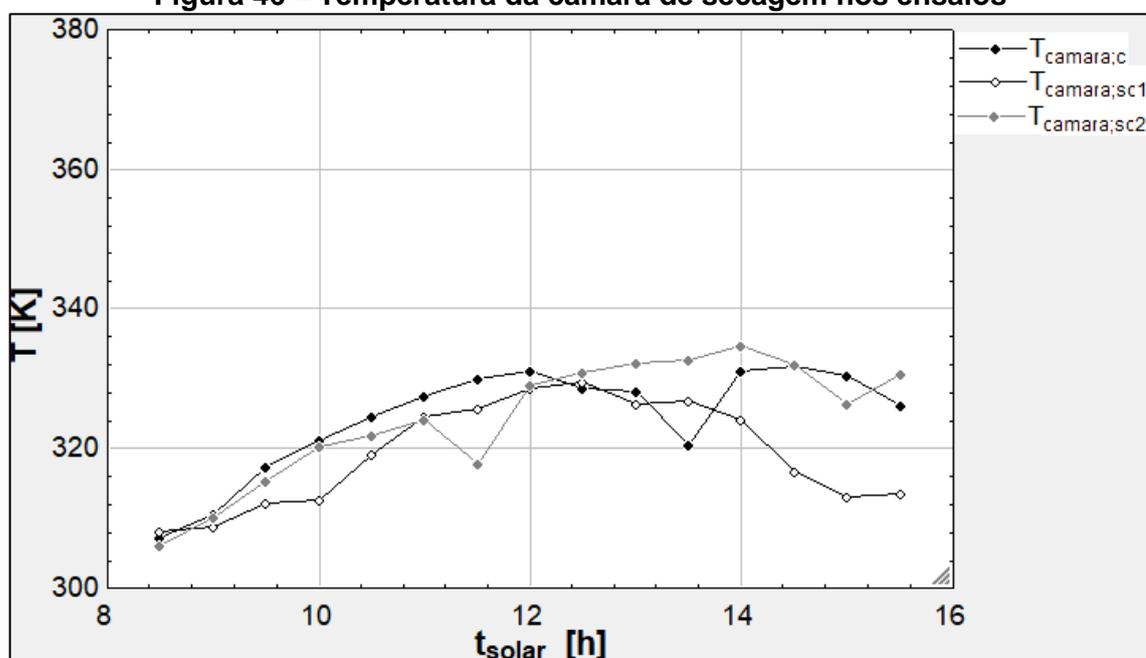
A Tabela 8 e a Figura 46 mostram as temperaturas da câmara de secagem nos três ensaios. O termopar que mediu essas temperaturas foi fixado no centro do vidro da câmara, na parte superior desta.

Tabela 8 – Temperatura da câmara de secagem nos ensaios

$T_{\text{camara}} \text{ (K)}$	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	331,70±0,40	329,50±0,40	334,70±0,40
Média	324,40±0,10	319,30±0,10	324,30±0,10

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 46 – Temperatura da câmara de secagem nos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 8, T_{camara} representa a temperatura da câmara de secagem e na Figura 46, $T_{\text{camara;c}}$, $T_{\text{camara;sc1}}$ e $T_{\text{camara;sc2}}$ são as temperaturas da câmara de secagem nos ensaios com chicanas, primeiro ensaio sem chicanas e segundo ensaio sem chicanas, respectivamente.

As temperaturas da câmara no primeiro ensaio sem chicanas foram superiores às do segundo em três momentos antes das 12h, e às do com chicanas em um momento antes e em dois após este horário. Comparando o segundo ensaio sem chicanas e o com chicanas, as temperaturas da câmara no com chicanas foram superiores em todas as medições até as 12h, e apenas em uma medição após este horário. Observou-se então que, no ensaio com chicanas, como a maioria dos valores de irradiação solar incidente foram superiores aos dos outros ensaios até as 12h, a temperatura da câmara foi mais alta nesta parte do dia, e no segundo ensaio sem chicanas, o mesmo ocorreu após este horário. O maior valor médio medido ocorreu no ensaio com chicanas e o maior máximo no segundo ensaio sem chicanas.

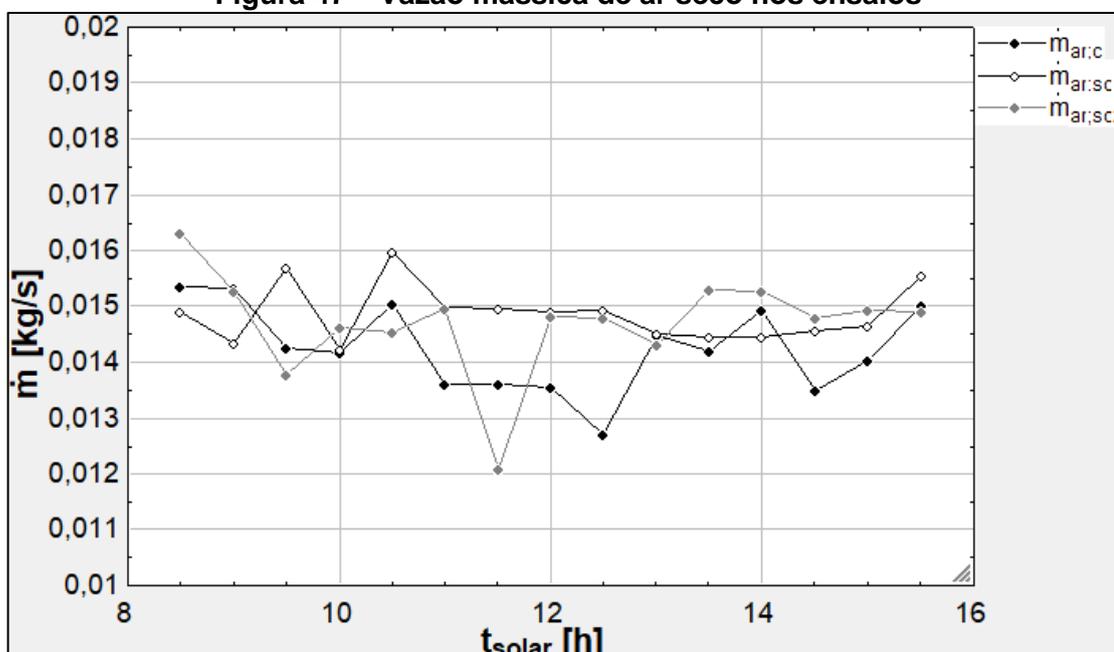
A Tabela 9 e a Figura 47 mostram valores de vazão mássica de ar seco nos ensaios realizados.

Tabela 9 – Vazão mássica de ar seco nos ensaios

\dot{m}_{ar} (kg/s)	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	0,01536±0,00061	0,01598±0,00064	0,01630±0,00065
Média	0,01425±0,00039	0,01487±0,00041	0,01471±0,00041

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 47 – Vazão mássica de ar seco nos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 9, \dot{m}_{ar} representa vazão mássica de ar seco. Na Figura 47, \dot{m} é a vazão mássica, e $\dot{m}_{ar,c}$, $\dot{m}_{ar,sc1}$ e $\dot{m}_{ar,sc2}$ são os valores de vazão mássica de ar seco nos ensaios com chicanas, no primeiro sem chicanas e no segundo sem chicanas, respectivamente.

A maior média ocorreu no primeiro ensaio sem chicanas, seguida do segundo ensaio sem chicanas e do com chicanas. Esses valores médios, além de todos os valores de vazão mássica, foram bem próximos, e justificam-se pelas oscilações da corrente elétrica de alimentação do ventilador, e pelas variações térmicas, que alteram as propriedades do ar, afetando a perda de carga e o empuxo devido a inclinação do secador.

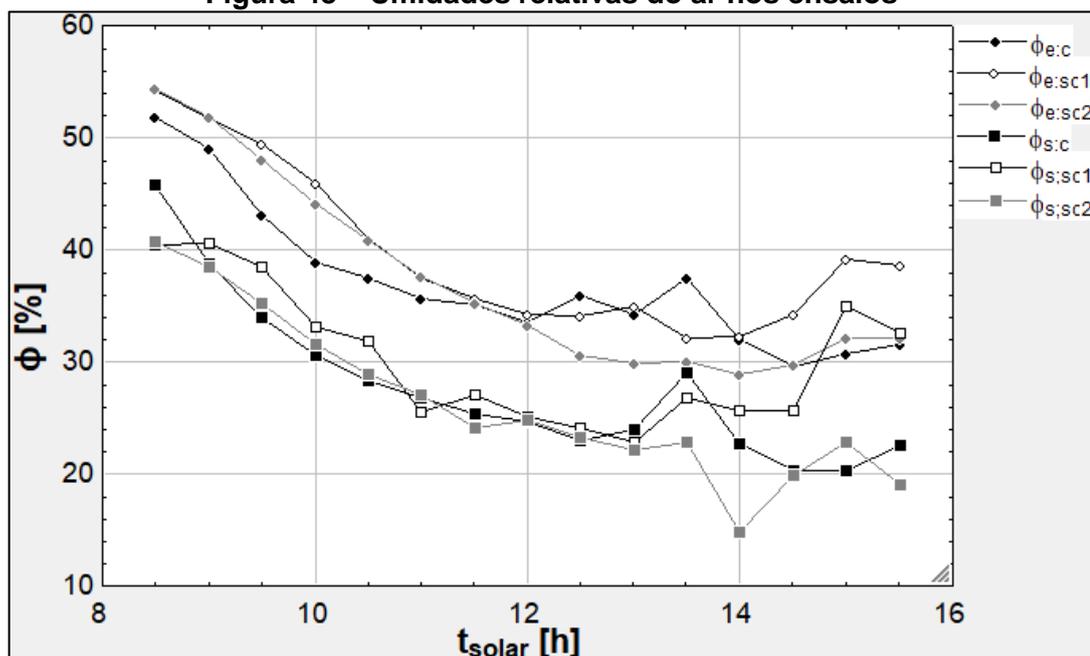
A Tabela 10 e a Figura 48 apresentam valores percentuais de umidade relativa do ar de entrada e saída nos ensaios realizados.

Tabela 10 – Umidades relativas do ar nos ensaios

ϕ (%)	ϕ_e (%)			ϕ_s (%)		
	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Mínima	29,60 $\pm 0,89$	32,10 $\pm 0,96$	28,90 $\pm 0,87$	20,30 $\pm 0,61$	22,80 $\pm 0,68$	14,80 $\pm 0,44$
Média	37,06 $\pm 0,29$	39,65 $\pm 0,31$	37,22 $\pm 0,30$	27,73 $\pm 0,22$	30,27 $\pm 0,24$	26,35 $\pm 0,21$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 48 – Umidades relativas do ar nos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 10, ϕ , ϕ_e e ϕ_s representam umidade relativa do ar, do ar de entrada e do ar de saída, respectivamente. Na Figura 48, $\phi_{e;c}$ e $\phi_{s;c}$ são as umidades relativas do ar de entrada e saída nos ensaios com chicanas, respectivamente, $\phi_{e;sc1}$ e $\phi_{s;sc1}$ são os mesmos valores no primeiro ensaio sem chicanas, e $\phi_{e;sc2}$ e $\phi_{s;sc2}$ no segundo ensaio sem chicanas.

A umidade relativa do ar na saída, em todos os ensaios, foi menor que a do ar de entrada. Isso aconteceu devido ao aumento da temperatura no interior do secador, que reduz a umidade relativa e aumenta, assim, o potencial de secagem.

Analisando a umidade relativa do ar na entrada, em todos os ensaios houve um declínio acentuado do percentual antes das 12h devido ao início da disposição de irradiação solar incidente, que reduziu a umidade relativa do ar ambiente. Até as 12h e em duas medições depois, os percentuais no ensaio com chicanas foram inferiores aos dos outros ensaios. Os percentuais no ensaio com chicanas sobem apenas em quatro horários após as 12h, que foram os mesmos momentos em que a temperatura de entrada caiu, sendo que nos dois primeiros horários, o valor superou os do primeiro ensaio sem chicanas. O valor da umidade subiu mais significativamente às 13h30, devido à nebulosidade.

Comparando os dois ensaios sem chicanas, os percentuais de umidade relativa de entrada até as 12h são muito próximos. A partir daí, os valores do primeiro ensaio são maiores e possuem uma diferença mais considerável. Os percentuais no segundo ensaio sem chicanas crescem três vezes após as 12h, horários com queda de temperatura de entrada. A maior média ocorre no primeiro ensaio sem chicanas e a menor no com chicanas, com valor muito próximo da do segundo ensaio sem chicanas, que possui o menor valor mínimo.

Analisando as umidades relativas do ar na saída, os percentuais são próximos nos três ensaios até as 13h. Às 13h30, o valor no ensaio com chicanas e no primeiro ensaio sem chicanas sobe consideravelmente, devido à nebulosidade. Às 14h, o percentual no ensaio com chicanas volta ao padrão, e o do segundo ensaio sem chicanas cai consideravelmente, no período em que apresenta a maior temperatura de saída, voltando ao padrão às 14h30 e chegando a valores próximos ao do ensaio com chicanas. Das 14h em diante, os valores do primeiro ensaio sem chicanas ficam sempre superiores aos outros, crescendo muito às 15h. Em quase todas as medições, quando o valor da umidade relativa do ar de entrada cai ou sobe, o mesmo ocorre para esse percentual na saída.

O aquecimento da temperatura do ar ambiente associado ao aumento de temperatura no escoamento de ar no interior do dispositivo mais a redução da taxa de umidade contida no resíduo estudado são responsáveis pela diferença entre as umidades relativas de entrada e saída do ar. Os menores valores médio e mínimo ocorreram no segundo ensaio sem chicanas, seguido do ensaio com chicanas.

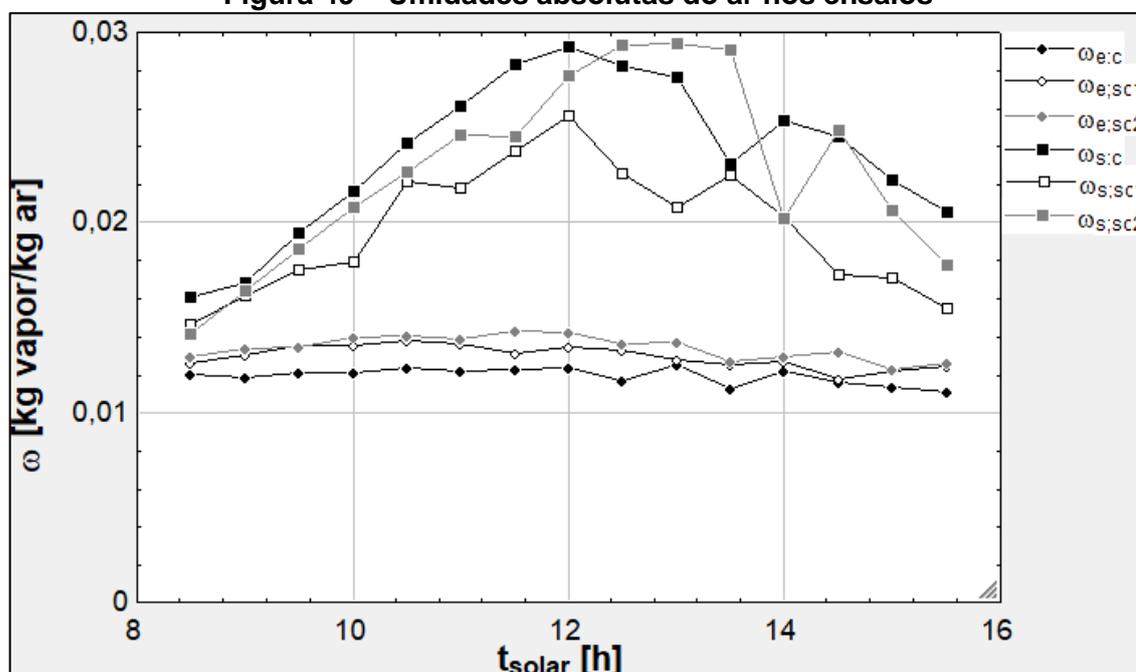
A Tabela 11 e a Figura 49 apresentam valores de umidade absoluta do ar de entrada e saída nos ensaios realizados.

Tabela 11 – Umidades absolutas do ar nos ensaios

ω (kg vapor / kg ar)	ω_e (kg vapor / kg ar)			ω_s (kg vapor / kg ar)		
	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	0,01249 $\pm 0,00045$	0,01377 $\pm 0,00051$	0,01431 $\pm 0,00046$	0,0292 $\pm 0,0012$	0,0256 $\pm 0,0010$	0,02938 $\pm 0,00087$
Média	0,01191 $\pm 0,00013$	0,01294 $\pm 0,00015$	0,01341 $\pm 0,00016$	0,02355 $\pm 0,00025$	0,01968 $\pm 0,00022$	0,02269 $\pm 0,00026$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 49 – Umidades absolutas do ar nos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 11, ω , ω_e e ω_s representam umidade absoluta do ar, do ar de entrada e do ar de saída, respectivamente. Na Figura 49, $\omega_{e;c}$ e $\omega_{s;c}$ são as umidades absolutas do ar de entrada e saída nos ensaios com chicanas, respectivamente, $\omega_{e;sc1}$ e $\omega_{s;sc1}$ são os mesmos valores no primeiro ensaio sem chicanas, e $\omega_{e;sc2}$ e $\omega_{s;sc2}$ no segundo ensaio sem chicanas.

Analisando a umidade absoluta do ar na entrada, observou-se que os valores variam muito pouco ao decorrer do ensaio, sendo os valores no ensaio com chicanas ligeiramente menores que os dos outros ensaios.

Os valores de umidade absoluta do ar na saída são superiores no ensaio com chicanas até as 12h, e em dois horários após este. Nos outros momentos, os valores do segundo ensaio

sem chicanas foram superiores. No ensaio com chicanas, os valores cresceram até as 12h e depois decresceram, exceto às 14h, onde cresceu devido à nebulosidade por volta das 13h30. No primeiro ensaio sem chicanas, os valores tenderam a crescer até as 12h e a decrescer após este horário, exceto em alguns horários específicos devido à nebulosidade. No segundo ensaio sem chicanas, os valores começaram a decrescer apenas às 13h30, crescendo às 14h30 e voltando a decrescer. O maior valor médio foi no ensaio com chicanas, e o maior valor máximo foi no segundo ensaio sem chicanas.

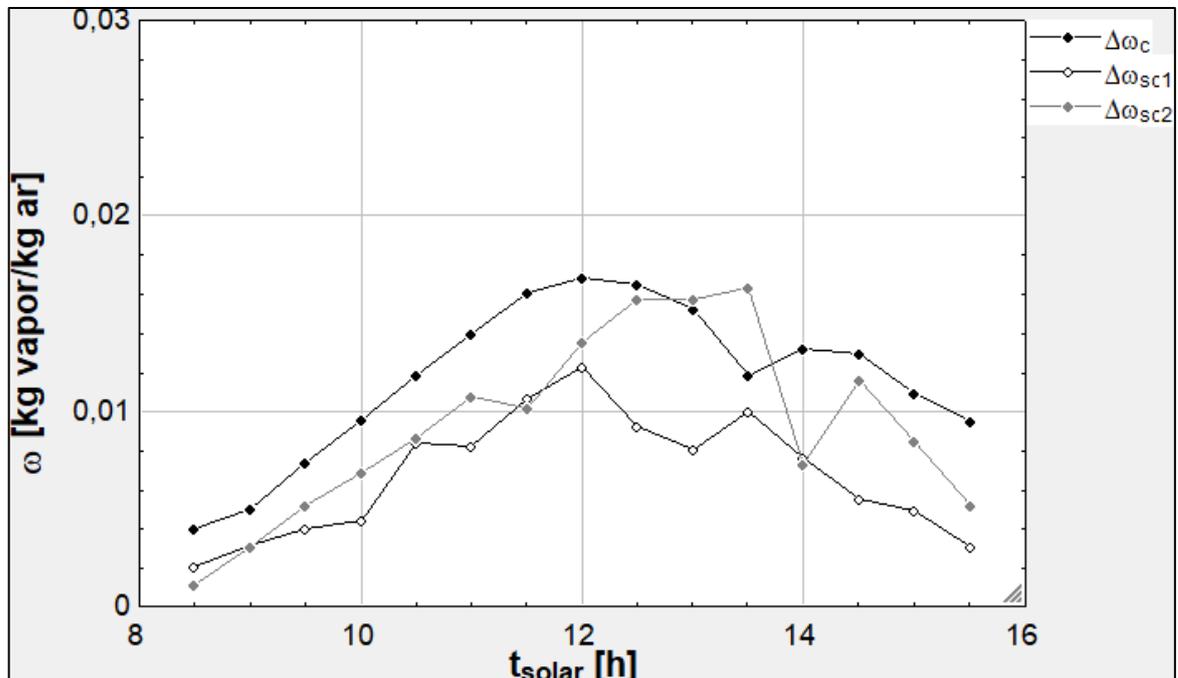
A Tabela 12 e a Figura 50 apresentam valores de variação entre as umidades absolutas do ar de saída e entrada nos ensaios realizados.

Tabela 12 – Variação entre as umidades absolutas do ar de saída e entrada nos ensaios

$\Delta\omega$ (kg vapor / kg ar)	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	0,0169±0,0013	0,0122±0,0012	0,0163±0,0013
Média	0,01164±0,00028	0,00674±0,00025	0,00929±0,00028

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 50 – Variação entre as umidades absolutas do ar de saída e entrada nos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 12, $\Delta\omega$ representa a variação entre as umidades absolutas do ar de saída e entrada e na Figura 50, $\Delta\omega_c$, $\Delta\omega_{sc1}$ e $\Delta\omega_{sc2}$ são as variações entre as umidades absolutas do ar de saída e entrada nos ensaios com chicanas, primeiro sem chicanas e segundo sem chicanas, nessa ordem.

Apenas às 15h e às 15h30 a variação entre as umidades absolutas do ar de saída e entrada no segundo ensaio sem chicanas foi maior que a do com chicanas. Esses valores no ensaio com chicanas foram superiores aos do primeiro ensaio sem chicanas em todos os horários. Os maiores valores máximo e médio foram no ensaio com chicanas, seguido do segundo ensaio sem chicanas. Portanto, a quantidade de umidade retirada dos tijolos e eliminada pelo ar de secagem no ensaio com as chicanas foi superior às dos ensaios sem as chicanas.

A Tabela 13 apresenta os teores de umidade dos tijolos em base úmida e em base seca nos ensaios realizados.

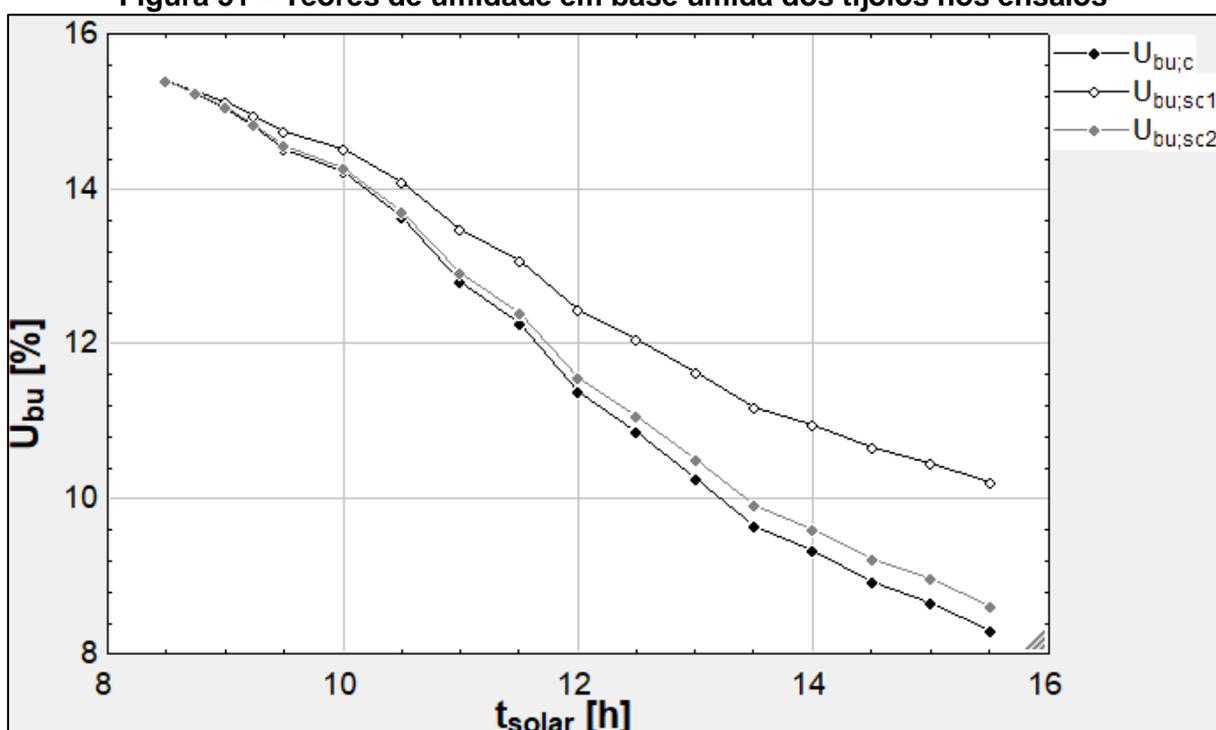
Tabela 13 – Teores de umidade dos tijolos nos ensaios

U (%)	U _{bu} (%)			U _{bs} (%)		
	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Mínima	8,289 ±0,060	10,200 ±0,058	8,619 ±0,059	9,039 ±0,071	11,360 ±0,072	9,432 ±0,071
Média	12,070 ±0,057	12,950 ±0,057	12,220 ±0,057	13,820 ±0,074	14,930 ±0,075	14,010 ±0,074

Fonte: Elaborada pelo autor.

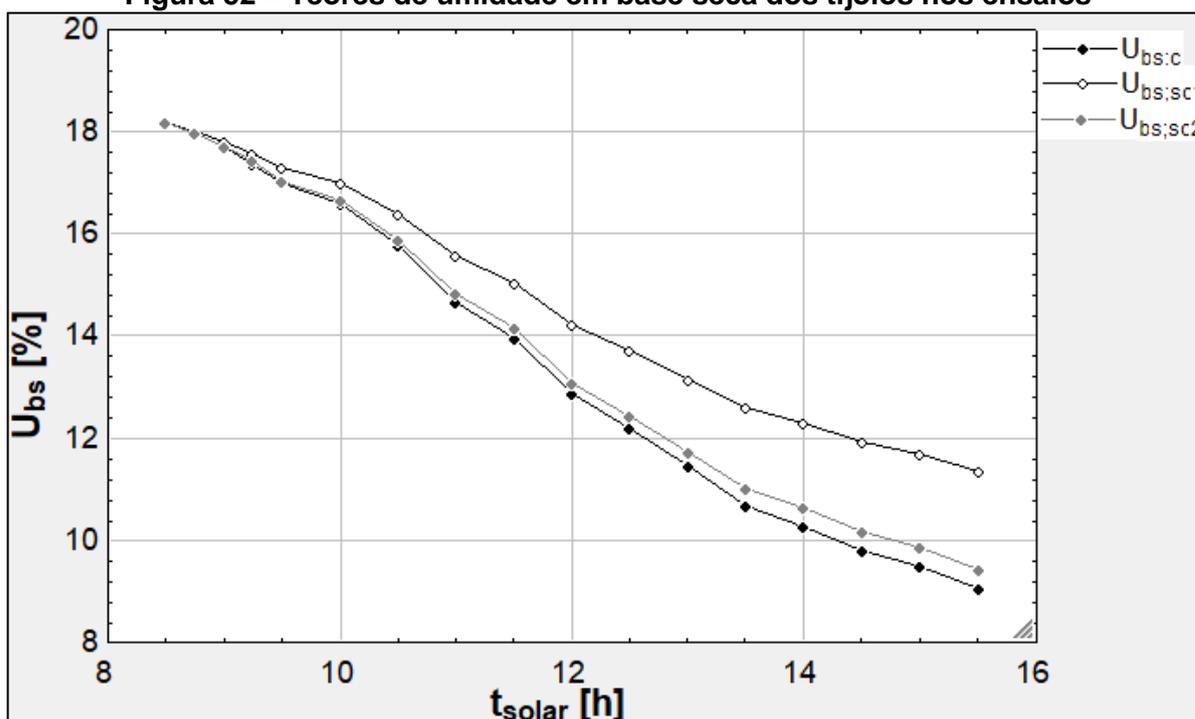
A Figura 51 e a Figura 52 mostram os teores de umidade dos tijolos em base úmida e em base seca, respectivamente, nos ensaios realizados.

Figura 51 – Teores de umidade em base úmida dos tijolos nos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 52 – Teores de umidade em base seca dos tijolos nos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 13, U , U_{bu} e U_{bs} representam teor de umidade, teor de umidade em base úmida e em base seca, respectivamente. Na Figura 51, $U_{bu;c}$, $U_{bu;sc1}$ e $U_{bu;sc2}$ são os teores de umidade em base úmida nos ensaios com chicanas, primeiro ensaio sem chicanas e segundo ensaio com chicanas, nessa ordem. Na Figura 52, $U_{bs;c}$, $U_{bs;sc1}$ e $U_{bs;sc2}$ são os teores de umidade em base seca nos ensaios com chicanas, primeiro ensaio sem chicanas e segundo ensaio com chicanas, respectivamente.

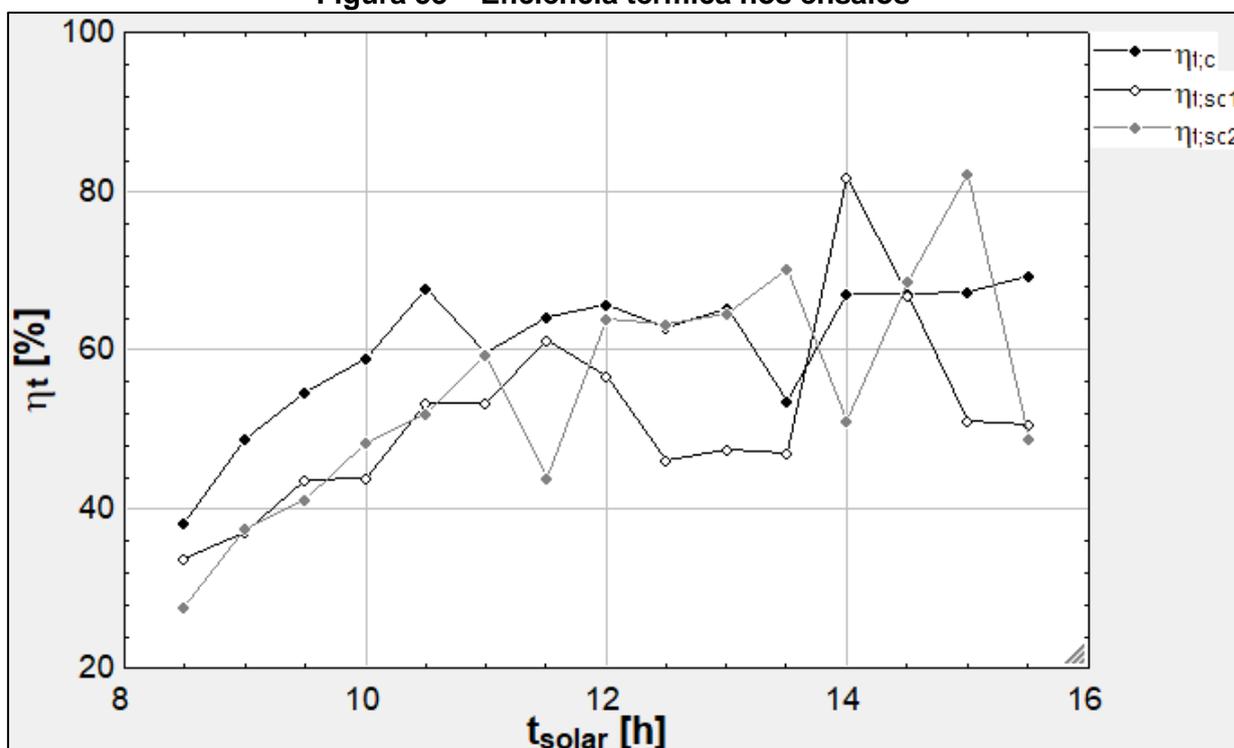
Observou-se que as curvas de secagem sempre decrescem, o que mostra que o teor de umidade ao longo do ensaio sempre diminui. A partir das 9h, os valores do ensaio com chicanas são menores, seguidos do segundo ensaio sem chicanas. Isso mostra que, no ensaio com chicanas, as amostras perderam uma maior quantidade de água do que nos outros, além de que a irradiação solar incidente teve muita influência no processo, pois há maior remoção da umidade no segundo ensaio sem as chicanas que no primeiro. Apesar de a diferença entre os teores ter aumentado no decorrer do ensaio, ela manteve-se pequena entre os ensaios com chicanas e segundo sem chicanas. Já os teores de umidade do primeiro ensaio sem chicanas foram maiores e possuíram uma diferença mais significativa em relação aos outros.

A Tabela 14 e a Figura 53 apresentam valores de eficiência térmica nos ensaios realizados.

Tabela 14 – Eficiência térmica nos ensaios

η_t (%)	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	69,3±5,6	81,8±8,3	82,3±7,4
Média	60,7±2,0	51,6±2,1	54,9±2,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 53 – Eficiência térmica nos ensaios

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 14, η_t representa a eficiência térmica, e na Figura 53, $\eta_{t,c}$, $\eta_{t,sc1}$ e $\eta_{t,sc2}$ são as eficiências térmicas nos ensaios com chicanas, primeiro sem chicanas e segundo sem chicanas, nessa ordem.

Verificou-se que, no ensaio com chicanas, os percentuais de eficiência térmica foram superiores aos do segundo ensaio sem chicanas até as 12h, e em três horários após. Às 13h30, no ensaio com chicanas, houve uma queda considerável da eficiência térmica, seguida de acréscimo na próxima medição, devido à nebulosidade próxima desse horário. Isso também aconteceu no segundo ensaio sem chicanas, às 14h.

No segundo ensaio sem chicanas, às 15h houve um pouco de nebulosidade exatamente no momento da medição, o que fez com que o valor de irradiação solar incidente caísse bruscamente. Devido à inércia térmica do secador, ou seja, pelo fato de o secador absorver calor e variar pouco a temperatura, mesmo com baixa incidência de irradiação solar, a

eficiência térmica cresceu significativamente nesse horário, chegando ao maior valor máximo de todos os ensaios. Essa situação também aconteceu no primeiro ensaio sem chicanas às 14h, atingindo a segunda maior eficiência térmica máxima, porque nesse momento o céu e o sol ficaram coberto por nuvens, e se mantiveram assim por quase todo restante do ensaio. Esse horário foi o único em que a eficiência térmica desse ensaio foi maior que a do com chicanas.

Ao analisar os experimentos sem chicanas, até as 12h, verificou-se que cada ensaio teve quatro percentuais de eficiência térmica maiores em relação ao outro. Em seguida, os resultados do primeiro ensaio sem chicanas superaram o do segundo em apenas dois momentos.

O maior valor médio da eficiência térmica foi no ensaio com chicanas, seguido do segundo ensaio sem chicanas. Como essa eficiência considera toda energia responsável por elevar a temperatura, o crescimento de seus valores instantâneos pode ser justificado, principalmente no começo do ensaio, pelo aumento da diferença entre as temperaturas na saída e na entrada do secador.

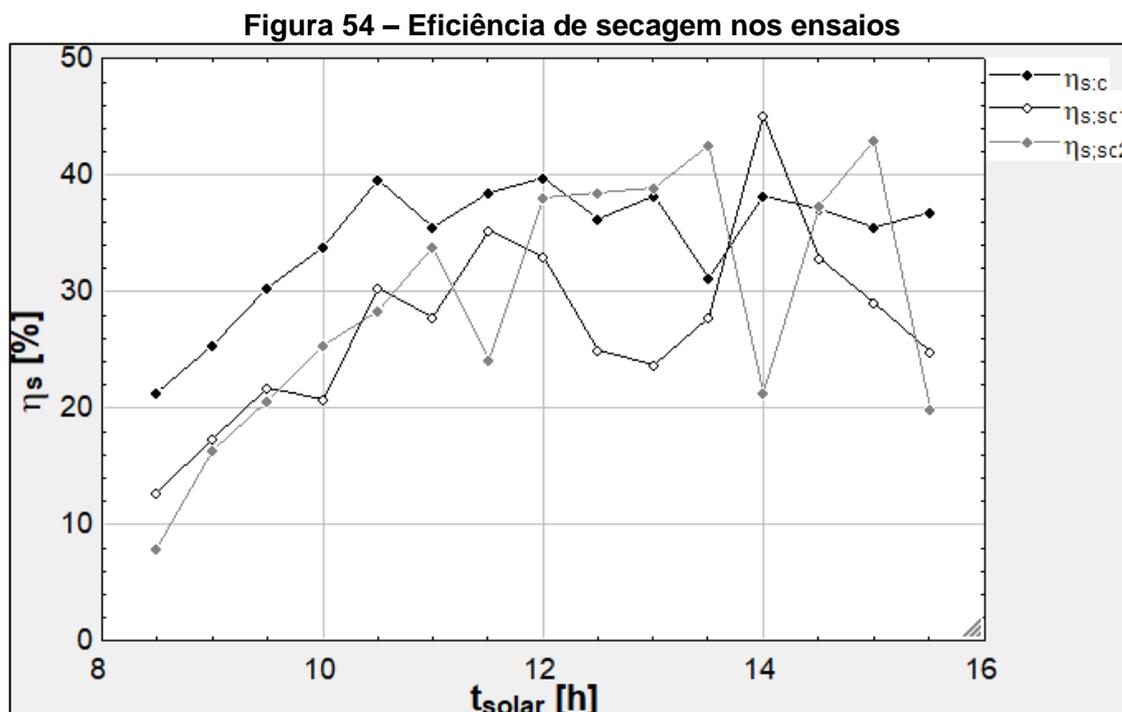
Alguns valores de eficiência térmica média já foram calculados para o secador em estudo. Nos ensaios realizados por Gonçalves (2012), o valor encontrado foi 20,8% para o secador sem carga e 16,7% carregado de resíduos sólidos. Nos experimentos de Oliveira (2014), o maior valor de eficiência térmica média calculado foi 29,6% para o secador sem carga e 26,9% na secagem de bananas. Já os estudos de Vasconcelos (2017) resultaram em uma eficiência térmica média de 44,3% para o secador vazio e 16% carregado de café. Portanto, todos os ensaios realizados com os tijolos possuíram valores médios de eficiência térmica mais altos do que nos outros experimentos, sendo o de maior valor o ensaio com chicanas, com $(60,7 \pm 2,0)\%$. Essas diferenças podem ser explicadas pelas diferentes condições ambientais, alterações na configuração do secador e distinção de produtos.

A Tabela 15 e a Figura 54 apresentam os percentuais de eficiência secagem nos ensaios realizados.

Tabela 15 – Eficiência de secagem nos ensaios

η_s (%)	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	39,7 \pm 2,9	45,1 \pm 6,1	43,0 \pm 3,9
Média	34,5 \pm 1,3	27,1 \pm 1,4	29,1 \pm 1,3

Fonte: Elaborada pelo autor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 15 e na Figura 54, η_s representa a eficiência de secagem, e na Figura 54, $\eta_{s:c}$, $\eta_{s:sc1}$ e $\eta_{s:sc2}$ são as eficiências de secagem nos ensaios com chicanas, primeiro sem chicanas e segundo sem chicanas, respectivamente.

A Figura 54 mostra que as eficiências de secagem, apesar de apresentarem valores inferiores, seguem um padrão de acréscimo e/ou decréscimo nos mesmos horários que a eficiência térmica. Em quase todos os horários em que a eficiência térmica do ensaio com chicanas foi maior que a do segundo sem chicanas, aconteceu o mesmo com a eficiência de secagem, exceto às 13h, quando os valores nos dois ensaios são muito próximos. Comparando o ensaio com chicanas com o primeiro ensaio sem chicanas, em todos os momentos que a eficiência térmica foi maior, a eficiência de secagem também foi. Em relação aos dois ensaios sem chicanas, o único horário em que houve diferença sobre os maiores valores de eficiência de secagem, comparando à eficiência térmica, foi às 8h30.

O maior valor máximo de eficiência de secagem foi no primeiro ensaio sem chicanas às 14h, devido à queda da irradiação solar incidente, seguida do segundo ensaio com chicanas às 15h, pelo mesmo motivo. O maior valor médio foi no ensaio com chicanas, seguido do segundo ensaio sem chicanas.

Os valores de eficiência de secagem são bem inferiores aos de eficiência térmica, pois, ao calculá-los, considera-se apenas a energia latente, responsável por remover a umidade do

produto. Já a eficiência térmica considera, além da latente, a sensível, que aumenta a temperatura, e apesar de poder contribuir para a remoção parcial da umidade do produto, não necessariamente e diretamente retira a umidade dele.

Nos ensaios realizados por Gonçalves (2012), o maior valor de eficiência de secagem para o secador em estudo alcançado foi 3,5% para o secador carregado de resíduos sólidos. Nos experimentos de Oliveira (2014), o melhor resultado dessa eficiência foi 18,8% na secagem de bananas. Vasconcelos (2017) obteve 8,8% de eficiência de secagem em um ensaio com café. Assim, os valores médios de eficiência de secagem nos ensaios com tijolos foram mais altos que essas eficiências nos experimentos anteriores, sendo o maior valor o de $(34,5\pm 1,3)\%$, o que, como na eficiência térmica, justifica-se pelas mudanças na configuração do secador, distinção dos produtos e diferentes condições ambientais.

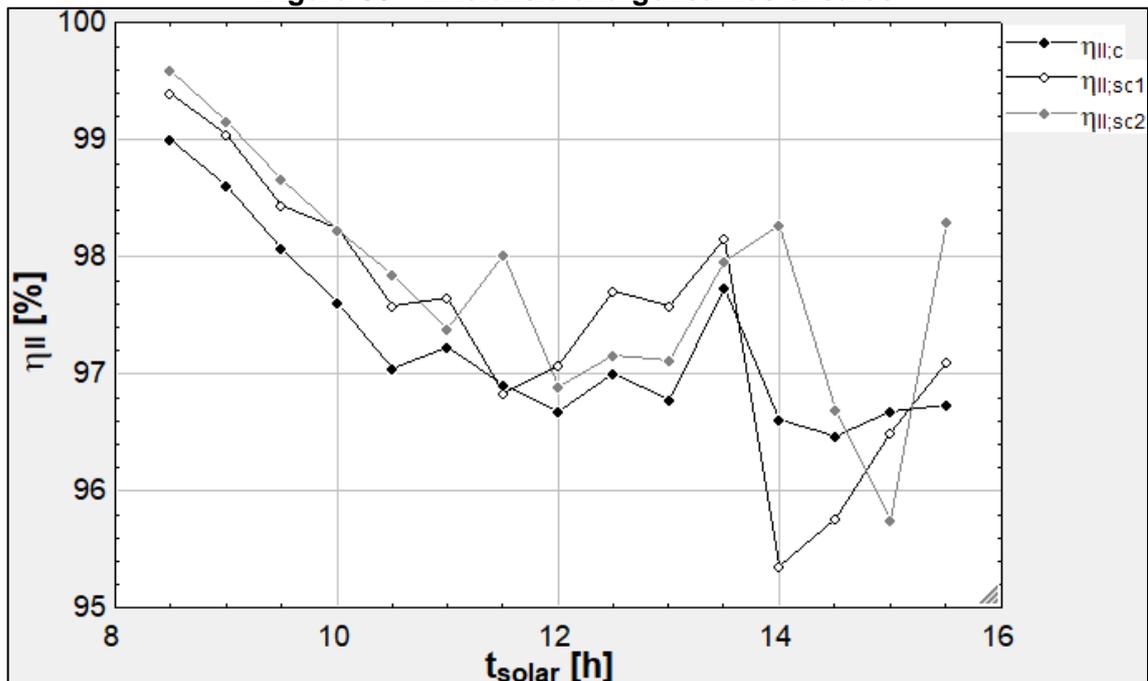
A Tabela 16 e a Figura 55 mostram os percentuais de eficiência exergética nos ensaios realizados.

Tabela 16 – Eficiência exergética nos ensaios

η_{II} (%)	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	$99,00\pm 0,21$	$99,39\pm 0,25$	$99,60\pm 0,28$
Média	$97,28\pm 0,10$	$97,49\pm 0,12$	$97,800\pm 0,092$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 55 – Eficiência exergética nos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 16 e na Figura 55, η_{II} representa a eficiência exergética, e na Figura 55, $\eta_{II;c}$, $\eta_{II;sc1}$ e $\eta_{II;sc2}$ são as eficiências exergéticas nos ensaios com chicanas, primeiro sem chicanas e segundo sem chicanas, nessa ordem.

O aumento e a diminuição do percentual dessa eficiência ocorreram de forma contrária às das eficiências térmica e de secagem. Assim, quanto mais as eficiências relacionadas a primeira lei da termodinâmica crescem em cada ensaio, mais exergia é perdida e menor é a eficiência exergética, pois mais trabalho que poderia ser utilizado para melhorar o desempenho foi desperdiçado.

Os valores de eficiência exergética dos ensaios foram muito altos e próximos uns dos outros e dos 100%, devido à baixa quantidade de exergia destruída, se comparada à exergia fornecida. O ensaio com chicanas teve valores dessa eficiência superiores aos do primeiro ensaio sem chicanas em um momento antes das 12h e em três depois, e apenas às 15h30 foram superiores aos do segundo. Comparando os dois ensaios sem chicanas, o segundo ensaio teve cinco valores maiores antes das 12h e três após. Os maiores valores máximo e médio foram no segundo ensaio sem chicanas, seguido do primeiro ensaio sem chicanas. O ensaio com chicanas, portanto, apesar de ter apresentado maiores médias de eficiências de secagem e térmica, teve a menor média de eficiência exergética, apesar das médias dos três experimentos terem sido muito próximas nesse quesito.

No trabalho de Vasconcelos (2017), o valor médio de eficiência exergética foi 97% na secagem de café para o secador em estudo, valor muito próximo a todos os valores médios calculados nos ensaios com tijolos, que foram de $(97,28 \pm 0,10)\%$ no ensaio com chicanas, $(97,49 \pm 0,12)\%$ no primeiro ensaio sem chicanas e $(97,800 \pm 0,092)\%$ no segundo ensaio sem chicanas. Assim, observou-se que o secador estudado tem um grande aproveitamento exergético.

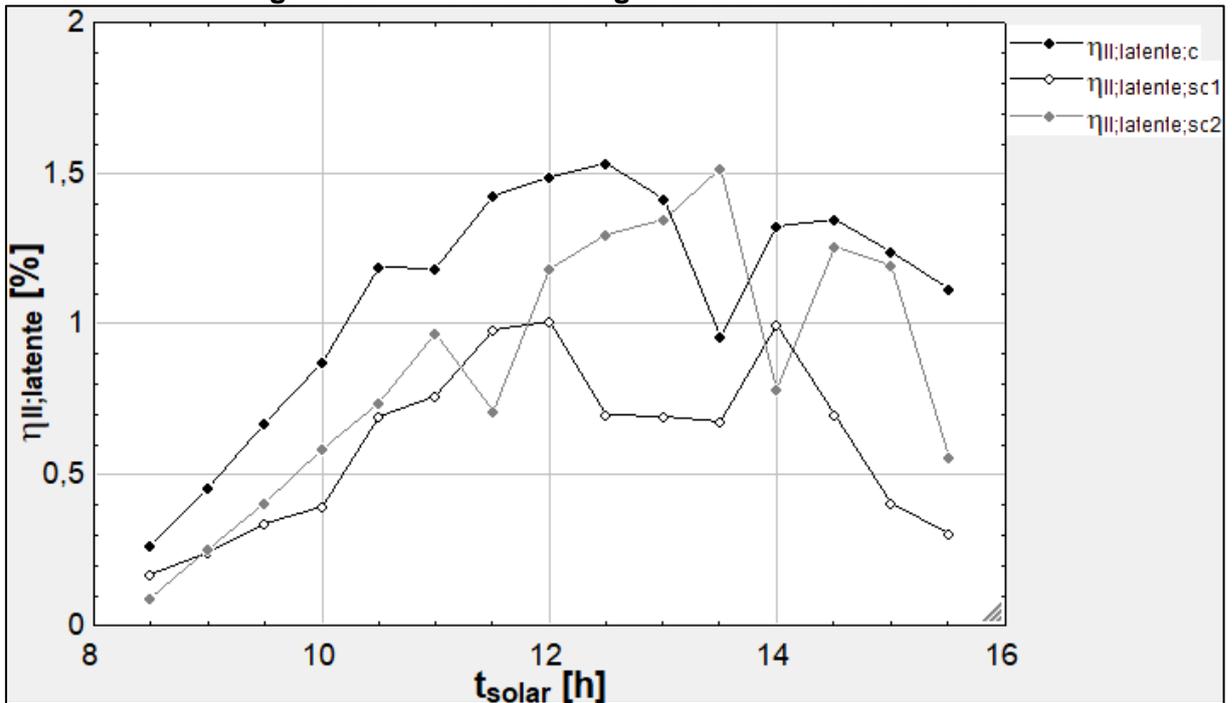
A Tabela 17 e a Figura 56 apresentam os percentuais de eficiência exergética latente nos ensaios realizados.

Tabela 17 – Eficiência exergética latente nos ensaios

$\eta_{II;latente}$ (%)	Ensaio 10/01: Com chicanas	Ensaio 11/01	Ensaio 14/01
Máxima	1,53±0,16	1,01±0,11	1,51±0,17
Média	1,099±0,046	0,604±0,034	0,859±0,041

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 56 – Eficiência exergética latente nos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 17, $\eta_{II;latente}$ representa a eficiência exergética latente, e na Figura 56, $\eta_{II;latente;c}$, $\eta_{II;latente;sc1}$ e $\eta_{II;latente;sc2}$ são as eficiências exergéticas latentes nos ensaios com chicanas, primeiro sem chicanas e segundo sem chicanas, respectivamente.

O crescimento e o decréscimo dos percentuais de eficiência exergética latente foram similares aos das eficiências térmica e de secagem, e opostos aos da eficiência exergética. Os valores de eficiência exergética latente foram extremamente baixos se comparados aos da eficiência exergética. Assim, percebeu-se que, apesar da grande quantidade de exergia aproveitada e da pequena de exergia perdida, uma parcela muito pequena foi utilizada para remover a umidade do produto, ou seja, quase toda exergia é aproveitada para elevar a temperatura do ar de secagem.

Os valores de eficiência exergética latente do experimento com chicanas foram maiores em todos os horários que no primeiro ensaio sem chicanas, e só foi menor que no segundo às 13h30, horário próximo à ocorrência de nebulosidade no dia 10/11. Comparando os ensaios sem chicanas, o segundo teve seis valores maiores até as 12h, e seis após.

O ensaio com chicanas obteve os maiores valores máximo e médio de eficiência exergética latente, seguido do segundo ensaio sem chicanas.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram realizados três ensaios de secagem em um secador solar ativo misto com o intuito de comparar o desempenho energético e exerético, além de analisar as curvas de secagem com e sem a presença de chicanas.

No ensaio com chicanas, mais umidade foi removida dos tijolos que nos outros experimentos realizados, o que mostra que a presença de obstáculos teve uma influência positiva nesse quesito.

Na análise energética, verificou-se que o secador com a presença de chicanas apresentou maiores valores médios de eficiência, tanto térmica como de secagem. Esses valores foram $(5,8 \pm 1,9)\%$ e $(5,4 \pm 1,4)\%$, respectivamente, maiores em relação ao ensaio sem chicanas de melhor resultado, e $(9,1 \pm 2,0)\%$ e $(7,3 \pm 1,5)\%$ ao outro, nessa ordem. Assim, percebeu-se que tanto no processo de aquecimento do ar de secagem como no de remoção de umidade do produto, o secador com chicanas alcançou melhores resultados.

Na avaliação exerética, o secador com chicanas obteve o menor valor médio de eficiência exerética. Esse valor foi $(0,52 \pm 0,10)\%$ e $(0,22 \pm 0,12)\%$ menor que nos ensaios sem chicanas de melhor resultado e pior resultado, nessa ordem. Apesar da proximidade dos percentuais e das altíssimas médias de eficiência exerética, pois o menor percentual mínimo foi de $(95,36 \pm 0,58)\%$, a inserção de chicanas no secador fez com que ele desperdiçasse mais exergia.

Já analisando apenas a exergia responsável por remover umidade do produto, a eficiência exerética latente média do secador com chicanas foi a mais alta, sendo $(0,240 \pm 0,050)\%$ e $(0,495 \pm 0,048)\%$ maior que a dos experimentos sem chicanas de melhor resultado e pior resultado, respectivamente. Esses percentuais, apesar de baixos, são mais significativos devido às baixíssimas eficiências exeréticas latentes dos ensaios, visto que o maior percentual máximo foi de $(1,53 \pm 0,16)\%$, e mostram que, apesar do maior desperdício de exergia no ensaio com chicanas, uma maior parte da exergia fornecida, se comparada aos outros ensaios, foi utilizada na retirada de umidade do material. Mas, em todos os experimentos, quase toda exergia foi empregada no aumento da temperatura do ar, e não na remoção da umidade do produto.

Como o secador solar é alimentado por energia solar, que é abundante e gratuita, as perdas de exergia não devem ser consideradas como um problema grave, ao contrário do caso de outras fontes, como a energia elétrica.

Portanto, as análises e ensaios realizados permitiram alcançar os objetivos da dissertação, evidenciando que a inserção de chicanas, que apresentam um baixo custo de fabricação, melhoraram o desempenho do secador.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se um estudo comparativo do secador com e sem chicanas, com produtos com maior teor de umidade inicial, visando verificar se serão alcançadas maiores diferenças entre os teores finais de umidade e entre a eficiência exergética nos ensaios.

Como houve oscilação entre os valores de velocidade do ar, sugere-se experimentos com a possibilidade de controlar essa velocidade, a fim de melhores comparações.

Testes com uma modelagem que considere a energia absorvida pelo secador e sua inércia seriam interessantes, principalmente para verificar melhor as eficiências nos momentos em que há nebulosidade.

Uma análise que considere o processo com escoamento em regime transiente poderia ser realizada para a obtenção de resultados mais próximos da realidade.

Sugere-se ensaios com as chicanas feitas com um material transparente, a fim de reduzir o sombreamento sobre a placa plana do coletor, visando melhorar a eficiência.

Ensaio com outras configurações de chicanas poderiam ser realizados para verificar diferenças nas eficiências.

REFERÊNCIAS

ABDULMALEK, S. H. *et al.* A comparative analysis on the uniformity enhancement methods of solar thermal drying. **Energy**, v. 148, p. 1103-1115, abr. 2018.

AKPINAR, E. K. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: modelling, performance analyses. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 12, p. 2407-2418, dez. 2010.

AKPINAR, E. K.; KOÇYIĞIT, F. Energy and exergy analysis of a new flat-plate solar air heater having different obstacles on absorber plates. **Applied Energy**, v. 87, n. 11, p. 3438-3450, nov. 2010.

ALI, E. B.; MABROUK, S. B.; SASSI, M. Modeling convective and intermittent drying of agricultural products. **Revue des Energies Renouvelables**, v. 13, n. 1, p. 123-132, mar. 2010.

ALONGE, A. F.; UDUAK, U. S. Development of a direct active solar dryer and its use in drying chester leaves (*Heinsia crinita*). **Journal of Agricultural Engineering and Technology**, v. 22, n. 4, p. 110-120, dez. 2014.

ALONSO, L. F. T. **Algoritmos de seleção e dimensionamento de secadores**. 2001. 241 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2001.

AREPALLY, D.; RAVULA, S. R.; KAMIDI, V. R. Mathematical modelling of mixed mode natural convection solar drying of tomato slices. **International Journal of Chemical Studies**, v. 5, n. 4, p. 1274-1279, jun. 2017.

ATMACA, A.; YUMRUTAŞ, R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry. **Applied Thermal Engineering**, v. 66, n. 1-2, p. 435-444, mai. 2014.

AZEVEDO, J. C. **Avaliação microestrutural de cerâmicas vermelhas**. 2004. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2004.

BALASUADHAKAR, A. *et al.* A review on passive solar dryers for agricultural products. **International Journal for Innovative Research in Science & Technology**, v. 3, n. 1, p. 64-70, jun. 2016.

BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. Solar drying. **Solar Energy**, v. 85, n. 8, p. 1665-1691, ago, 2011.

BORTOLAIA, L. A. **Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo**. 2011. 148 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.

CADÉ, M. A.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. Secagem de tijolos cerâmicos vazados: uma aproximação por volumes finitos. **Revista Matéria**, v. 10, n. 3, p. 443-453, 2005.

CAVICHIOLO, J. R. **Secagem do bagaço de laranja em secador tipo flash**. 2010. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2010.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos**. 1. ed. Planaltina, DF: Embrapa - CPAC, 2010.

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

CHOWDHURY, M. M. I.; BALA, B. K.; HAQUE, M. A. Energy and exergy analysis of the solar drying of jackfruit leather. **Biosystems Engineering**, v. 110, n. 2, p. 222-229, out. 2011.

CORNEJO, F. E. P; NOGUEIRA, R. I; WILBERG, V. C. **Secagem como método de conservação de frutas**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa - CTAA, 2003.

CORREIA, M. M. S. **Aprofundamento do estudo do comportamento mecânico de paredes divisórias em alvenaria sujeitas a deformação dos suportes**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.

COSTA, J. B. S. **Obtenção e caracterização de farinha de frutas e vegetais através do uso de um sistema de secagem solar de baixo custo**. 2010. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2010.

COSTA, V. Estudo comparativo entre cerâmica e concreto: tijolos e telhas. **Revista Anicer**, v. 82, p. 1-12, out. 2014.

COUTO, S. C. C. **Utilização de hidrófugos de superfície em materiais cerâmicos. Influência na secagem**. 2010. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2010.

DISSA, A. O. *et al.* Experimental characterization and modelling of thin layer direct solar drying of *Amelie* and *Brooks* mangoes. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 2517-2527, mai. 2011.

FERREIRA, A.; CANDEIAS, M. Secagem solar de frutos e plantas aromáticas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 28, p. 363-370, jan. 2005.

FLORENZANO, L. S. **Conservação de tijolo cerâmico em alvenarias históricas: subsídios para restauração do sítio histórico de Santa Leopoldina-ES**. 2016. 211 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2016.

FREITAS NETO, F. R. **Estudo de um secador híbrido (solar-elétrico) para desidratação de frutas**. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2015.

FUMAGALLI, F. **Secagem de pera em secador a micro-ondas**. 2003. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2003.

GALBIATTI, D. A. **A interação entre os alunos em atividades de demonstração experimental aberta num curso de licenciatura em física: um estudo do desenvolvimento conceitual sob a perspectiva histórico-cultural**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, SP, 2014.

GATEA, A. A. Design and construction of a solar drying system, a cylindrical section and analysis of the performance of the thermal drying system. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 2, p. 343-351, jan. 2011.

GAVA, A. J. **Princípios de tecnologia de alimentos**. 1. ed. São Paulo, SP: Nobel, 1977.

GONÇALVES, L. M. **Análise experimental da secagem de um resíduo sólido industrial em um secador solar**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2012.

GRIGOLETTI, G. C. **Caracterização de impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha do estado do Rio Grande do Sul**. 2001. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

GRUN, E. **Caracterização de argilas provenientes de Canelinha/SC e estudo de formulações de massas cerâmicas**. 2007. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, 2007.

HAGE, H. E. *et al.* An investigation on solar drying: a review with economic and environmental assessment. **Energy**, v. 157, p. 815-829, ago. 2018.

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

ISLAM, M. K. *et al.* Fabrication and performance study of a direct type solar dryer. **International Journal of Scientific & Engineering Research** v. 9, n. 2, p. 565-569, fev. 2018.

JAIN, D.; TEWARI, P. Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage. **Renewable Energy**, v. 80, p. 244-250, ago. 2015.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collector and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, p. 231-295, fev. 2004.

KAPADIYA, S.; DESAI, M. A. Solar drying of natural and food products: a review. **International Journal of Agriculture and Food Science Technology**, v. 5, n. 6, p. 565-576, set. 2014.

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

LAKSHMI, D. V. N. *et al.* Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. **Renewable Energy**, v. 120, p. 23-34, mai. 2018.

LANNES, S. C. S.; MEDEIROS, M. L. Processamento de achocolatado de cupuaçu por *spray-dryer*. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, São Paulo, SP, v. 39, n. 1, p. 115-123, jan./mar. 2003.

LAWRENCE, D.; FOLAYAN, C. O; PAM, G. Y. Design, construction and performance evaluation of a mixed mode solar dryer. **The International Journal of Engineering and Science**, v. 2, n. 8, p. 8-16, ago. 2013.

LÓPEZ-VIDAÑA, E. C.; MÉNDEZ-LAGUNAS, L. L.; RODRÍGUEZ-RAMÍREZ, J. Efficiency of a hybrid solar-gas dryer. **Solar Energy**, v. 93, p. 23-31, jul. 2013.

LUZ, G. B. Processo de extração das proteínas de soro de leite para produção de concentrado proteico. **Tecnologias para Competitividade Industrial**, Florianópolis, SC, v. 9, n. 2, p. 137-150, dez. 2016.

MAIA, C. B. *et al.* Energy and exergy analysis of the airflow inside a solar chimney. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 350-361, nov. 2013.

MARTINS, I. O. **Modelagem da secagem convectiva em contracorrente de cerâmicas vermelhas**: aspectos fenomenológicos e de consumo de energia. 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

MASSON, A. C. *et al.* Absorção de água em tijolos. **Revista Maiêutica**, Indaial, SC, v. 2, n. 1, p. 7-24, ago. 2016.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. A review on solar energy use in industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 4, p. 1777-1790, mai. 2011.

MELO, K. S. *et al.* Secagem em camada de espuma da polpa do fruto do mandacaru: experimentação e ajustes de modelos matemáticos. **Revista Caatinga**, Mossoró, RN, v. 26, n. 2, p. 10-17, abr./jun. 2013.

MORAN, M. J. *et al.* **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2013.

MUSTAYEN, A. G. M. B.; MEKHILEF, S.; SAIDUR, R. Performance study of different solar dryers: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 463-470, jun. 2014.

NWAKUBA, N. R.; ASOEGWU, S.N.; NWAIGWE, K.N. Energy consumption of agricultural dryers: an overview. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 18, n. 4, p. 119-132, dez. 2016.

OI, R. K. **Secagem da biomassa de banana verde em spray dryer**. 2011. 68 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2011.

OLIVEIRA, A. M. **Estudo experimental da secagem de banana utilizando secador solar**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2014.

PAIVA, R. S. **Estudo da secagem por micro-ondas e eólica-solar térmica**. 2003. 155 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2003.

PARDHI, C. B.; BHAGORIA, J. L. Development and performance evaluation of mixed-mode solar dryer with forced convection. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 4, n. 23, p. 1-8, dez. 2013.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pera bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, SP, v. 21, n. 3, p. 288-292, set./dez. 2001.

PEREIRA, M. R. **Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves**. 2008. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2008.

POSSES, I. P. **Caracterização tecnológica de blocos cerâmicos de alvenaria de vedação produzidos por empresas cerâmicas do estado do Espírito Santo**. 2013. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2013.

PRAKASH, O.; KUMAR, A. Historical review and recent trends in solar drying systems. **International Journal of Green Energy**, v. 10, n. 7, p. 690-738, set. 2013.

SAKURAI, Y. C. N. **Desenvolvimento de massa alimentícia seca, sem glúten com fécula de mandioca (*Manihot esculenta cranz*), farinha de pupunha (*Bactris gasipaes kunth*) e linhaça (*Linum usitatissimum l.*)**. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2017.

SANTOS, M. C. R. **Qualidade de vida e sintomas musculoesqueléticos de trabalhadores de indústrias de cerâmica**. 2015. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Saúde, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, GO, 2015.

SANTOS, R. M. **Estudo da secagem e do consumo de gás natural em uma rama têxtil de aquecimento direto**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.

SANTOS FILHO, J. **Estudo da gaseificação da torta do coco macaúba, lenha de eucalipto, lenha de café e do carvão vegetal e seu potencial energético para desidratação de frutas**. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, BA, 2009.

SANTOS JÚNIOR, J. J. S. **Análise do processo de secagem industrial de espaguete em secadora de fluxo contínuo e a influência da matéria-prima sobre a qualidade do produto final**. 2014. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2014.

SHALABY, S. M.; BEK, M. A. Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium. **Energy Conversion and Management**, v. 83, p. 1-8, jul. 2014.

SILVA, A. S. *et al.* Desidratação da polpa de tamarindo pelo método camada de espuma. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 32, n. 6, p. 189-05, nov./dez. 2008.

SILVA, D. H. *et al.* Tijolos, normas técnicas e aplicação em alvenaria. **Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, Maceió, AL, v. 4, n. 2, p. 207-216, nov. 2017.

SILVA, F. **Avaliação do teor e da composição química do óleo essencial de plantas medicinais submetidas a processos de secagem e armazenamento**. 2005. 152 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.

SILVA, I. G. **Viabilidade técnica e econômica de secadores solar e elétrico na desidratação de bananas no estado do Acre**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Acre, Rio Brando, AC, 2010.

SILVA, J. M. **Viabilidade do uso de secadores solares de convecção natural e forçada para secagem do coco licuri**. 2012. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2012.

SILVA, M. B. L. **Novos materiais à base de resíduos de construção e demolição (RCD) e resíduos de produção de cal (RPC) para uso na construção civil**. 2014. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2014.

SILVA, M. C. **Reciclagem de pó de aciaria elétrica como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos: controle das emissões atmosféricas de zinco**. 2006. 126 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006.

SONTAKKE, M. S.; SALVE, S. P. Solar drying technologies: a review. **International Refereed Journal of Engineering and Science**, v. 4, n. 4, p. 29-35, abr. 2015.

SOUSA, V. R. **Extração e caracterização de óleo de sementes de frutos**. 2012. 52 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Alimentar, Universidade do Algarve, Faro, Portugal, 2012.

TANAKA, D. L. **Influência da desidratação por *spray drying* sobre o teor ácido ascórbico no suco de acerola (*Malpighia spp*)**. 2007. 56 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Alimentos e Nutrição, Universidade Estadual Paulista "Professor Júlio de Mesquita Filho", Araraquara, SP, 2007.

TORRE, P. Y. G.; ALVES, J. C. M.; CORRÊA, S. F. Análise de eficiência energética para indústria têxtil: um Estudo de caso em uma empresa de Minas Gerais. **Revisa Produção Online**, v. 18, n. 1, p. 238-264, jan./mar. 2018.

TUNES, L. V. M. **Atributos fisiológicos de qualidade de sementes de cevada sobre diferentes épocas de colheita e durante o armazenamento**. 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2009.

ULLAH, F. *et al.* Experimentally investigated the asparagus (*Asparagus officinalis* L.) drying with flat-plate collector under the natural convection indirect solar dryer. **Food Science & Nutrition**, v. 0, p. 1-10, fev. 2018.

VASCONCELOS, A. C. B. B. **Análise da eficiência energética e exergética em secadores solar e elétrico na secagem de café**. 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2017.