



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA**



TESE

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PROCESSAMENTO E
ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**DESENVOLVIMENTO DE SECADOR SOLAR AUTÔNOMO:
UTILIZAÇÃO NA SECAGEM DE FEIJÃO-CAUPI**

RONALDO ARAÚJO ALVES

Campina Grande – Paraíba

Mai - 2018

**DESENVOLVIMENTO DE SECADOR SOLAR AUTÔNOMO:
UTILIZAÇÃO NA SECAGEM DE FEIJÃO-CAUPI**

RONALDO ARAÚJO ALVES

**Tese de Doutorado apresentada ao
Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola da Universidade
Federal de Campina Grande, como
parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia Agrícola.**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento e Armazenamento de Produtos
Agrícolas**

ORIENTADORES: Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz

Profa. Dra. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo

Campina Grande - Paraíba

Mai - 2018

A474d

Alves, Ronaldo Araújo.

Desenvolvimento de secador solar autônomo : utilização na secagem de feijão-caupi / Ronaldo Araújo Alves. - Ronaldo Araújo. Campina Grande, 2018.

129 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz, Profa. Dra. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo".

Referências.

1. *Vigna unguiculata*. 2. Fontes de Energia Renováveis. 3. Energia Solar. 4. Coletores a Vácuo. 5. Secagem Noturna. I. Queiroz, Alexandre José de Melo. II. Figueirêdo, Rossana Maria Feitosa de. III. Título.

CDU 633.35(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO BIBLIOTECÁRIO GUSTAVO DINIZ DO NASCIMENTO CRB - 15/515



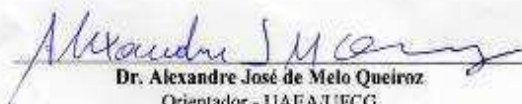
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE

RONALDO ARAÚJO ALVES

**“DESENVOLVIMENTO DE SECADOR SOLAR AUTÔNOMO: UTILIZAÇÃO
NA SECAGEM DE FEIJÃO-CAUPI”**

APROVADO: 29 de maio de 2018


BANCA EXAMINADORA


Dr. Alexandre José de Melo Queiroz
Orientador - UAEA/UFCG


Dra. Rossana Maria Feltosa de Figueirêdo
Orientadora - UAEA/UFCG


Dr. Joelson Nogueira de Carvalho
Examinador - CCAE/UFPB


Dra. Plúvia Oliveira Galdino
Examinadora - UATA/UFCG


Dr. Wilton Pereira da Silva
Examinador - UAF/UFCG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe Maria da Silva Araújo (*in memoriam*) pelo amor, ensinamentos, exemplo de trabalho e luta, dedicação a vida familiar, serenidade, paciência nos momentos mais difíceis e sabedoria que me deu durante a minha trajetória de vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por estar presente em todas as minhas decisões e por me mostrar soluções para os meus problemas.

A minha família, especialmente a minha mãe, por ter deixado um legado de amor e luta, e meu pai, por ensinar sempre o caminho do bem e da fé.

Aos meus orientadores Alexandre José de Melo Queiroz e Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo, pelo empenho, dedicação e paciência, estando sempre dispostos a me ajudar.

Um agradecimento especial a minha esposa Edna Agra Toscano de Araújo e ao meu filho Bruno Agra Araújo, pelo apoio incondicional e o incentivo constante, que me proporcionou o encorajamento necessário para a realização deste trabalho.

Aos professores da graduação e pós-graduação, que contribuíram para minha formação acadêmica.

À Casa Ecoeficiente do SENAI, CITI - Centro de Inovação e Tecnologia Industrial, pelo convênio.

Aos amigos do SENAI Antônio Carlos Monteiro Lucena, Gerson Farias de Barros, José Izaac Leite de Amorim, Lindoval Paiva de Souza, Newmark Heiner da Cunha Carvalho, Sirderley Fernandes Albuquerque, Thiago Lira Souza Santos e ao Gerente do SENAI CITI, Luiz Wagner Cavalcanti Porto, pelo apoio logístico.

À UFCG, pelo apoio durante o desenvolvimento desta pesquisa.

“A imaginação é mais importante que o conhecimento. Conhecimento auxilia por fora, mas só o amor socorre por dentro. Conhecimento vem, mas a sabedoria tarda.”

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xv
NOMENCLATURA	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS	xxi
LISTA DE SIGLAS	xxii
RESUMO	xxiii
ABSTRACT	xxiv
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 - Objetivo geral	2
1.1.1 - Objetivos específicos	2
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 – Secagem	4
2.2 - Estado da arte para sistemas de secagem	6
2.3 - Modelagem matemática da cinética de secagem em camada fina de produtos agrícolas	9
2.4 - Secagem com energia solar	12
2.5 - Secadores solar	14
2.6 - Sistema de aquecimento solar de água	16
2.6.1 - Coletores solares	18
2.6.1.1 - Coletores solares planos para aquecimento de água ..	19
2.6.1.2 - Coletores de tubos a vácuo	20
2.6.2 - Reservatório térmico	21
2.7 - Eficiência do coletor solar	22
2.8 - Sistema solar fotovoltaico autônomo	24
2.8.1- Componentes básicos de um sistema fotovoltaico autônomo ...	24
2.9 - Feijão-caupi	25
3 - MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 - Local da realização dos experimentos	27
3.2 - Projeto e construção de sistemas de secagem solar	27
3.2.1 - Secador solar	27
3.2.2 - Secador acumulador de calor para secagem no período noturno	28

3.2.2.1 - Descrição das partes do secador ACSN	29
3.2.2.1.1 - Coletores solares	29
3.2.2.1.2 - Reservatório térmico	30
3.2.2.1.3 - Câmara de secagem	31
3.2.2.1.4 - Sistema de bombeamento – circulação forçada	32
3.2.2.1.5 - Medição das temperaturas	33
3.2.2.1.6 - Montagem e funcionamento do secador solar ACSN	34
3.3 - Sistema fotovoltaico isolado com armazenamento e ligado à carga em corrente contínua	35
3.3.1 - Dimensionamento do sistema fotovoltaico	36
3.4 - Medição da radiação solar	38
3.5 - Matéria-prima	40
3.5.1 - Processamento dos grãos de feijão-caupi	40
3.6 - Secagem	41
3.6.1 - Secagem artificial (convencional)	41
3.6.2 - Secagem com energia solar	42
3.6.2.1 - Secagem em secador ACSN acompanhada por secagem de amostras colocadas à noite em bancada do laboratório (testemunha)	42
3.6.2.2 - Secagem por exposição direta ao sol	43
3.6.2.3 - Secagem em secador solar no período diurno	43
3.6.2.4 - Secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem no período noturno no secador ACSN e acompanhada com secagem de amostras colocadas à noite em bancada do laboratório (testemunha)	44
3.6.2.5 - Secagem em secador ACSN durante a noite combinada com secagem em secador solar durante o dia e acompanhada com secagem de amostras colocadas à noite em bancada de laboratório (testemunha)	44
3.7 - Determinação da razão do teor de água e taxa de secagem	44
3.8 - Determinação do coeficiente de difusão efetivo	47
3.9 - Propriedades termodinâmicas	48

3.10 - Cálculo da eficiência térmica do coletor solar de tubos a vácuo	48
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 - Dimensionamento do sistema fotovoltaico (Experimento 1).....	51
4.2 - Secagem em estufa (Experimento 2).....	52
4.3 - Secagem solar.....	63
4.3.1 - Secagem em secador ACSN (Experimento 3)	63
4.3.1.1 - Eficiência térmica do coletor solar de tubos a vácuo ...	72
4.3.2 - Secagem por exposição direta ao sol (Experimento 4)	74
4.3.3 - Secagem em secador solar no período diurno (Experimento 5) .	79
4.3.4 - Secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem no período noturno no secador ACSN (Experimento 6)	83
4.3.5 - Secagem em secador ACSN ou abrigo durante a noite combinada com secagem em secador solar durante o dia (Experimento 7)	93
4.4 - Comparações entre as secagens em estufa e solar.....	101
4.4.1 - Comparação da secagem em estufa e em secador ACSN	101
4.4.2 - Comparação da secagem em estufa e em exposição direta ao sol	102
4.4.3 - Comparação da secagem em estufa e em secador solar	103
4.4.4 - Comparação da secagem em estufa com exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN	104
4.4.5 - Comparação da secagem em estufa com secagem em secador ACSN combinada com secagem em secador solar	105
5 – CONCLUSÕES	107
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
APÊNDICE A	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Curva de secagem	6
Figura 2.2	Secador solar de exposição direta com convecção natural (a) e secador solar de exposição indireta com convecção natural (b)	15
Figura 2.3	Sistema de aquecimento solar com circulação forçada	17
Figura 2.4	Sistema de aquecimento solar direto com circulação por termossifão	18
Figura 2.5	Orientação dos coletores solares	18
Figura 2.6	Inclinação do coletor solar: B - Ângulo de inclinação variável com a latitude [graus]; h - Inclinação do coletor [m]	19
Figura 2.7	Coletor solar plano	20
Figura 2.8	Estrutura interna do U-Tube (a) e coletor a vácuo tipo U-tube (b)	21
Figura 2.9	Vista interna e externa do reservatório térmico	22
Figura 2.10	Componentes de um sistema fotovoltaico autônomo	25
Figura 2.11	Vagens e grãos de feijão-caupi	26
Figura 3.1	Secador solar de radiação direta com amostras de feijão-caupi e termopares	28
Figura 3.2	Vista frontal (a) e vista posterior do Secador Acumulador de calor para secagem noturna (ACSN) (b)	29
Figura 3.3	Coletores solares de tubos a vácuo tipo U-tube de vinte e dez tubos	30
Figura 3.4	Camadas seletivas depositada internamente no tubo a vácuo	30
Figura 3.5	Reservatório térmico do secador solar	31
Figura 3.6	Vista externa da câmara de secagem (a) e vista interna da câmara de secagem (b)	32
Figura 3.7	Bombas centrífugas (a) e imagem detalhada da bomba centrífuga (b)	32
Figura 3.8	Localização dos sensores de temperatura no secador ACSN: 1 – Sensor de saída de água quente do coletor a vácuo; 2 – Sensor de entrada de água quente da câmara de secagem; 3 – Sensor de entrada de água fria do coletor a vácuo; 4 – Sensor de saída de água quente da câmara de secagem; e, 5 – Sensor de temperatura no interior da câmara de secagem	33

Figura 3.9	Localização do sensor de temperatura no interior da câmara de secagem	34
Figura 3.10	Painel fotovoltaico (a) e bateria estacionária com controlador de carga (b)	36
Figura 3.11	Variação da radiação solar incidente em função do tempo	39
Figura 3.12	Intensidade média de radiação solar	39
Figura 3.13	Amostras de feijão-caupi	40
Figura 3.14	Fluxograma de processamento dos grãos de feijão-caupi	41
Figura 3.15	Secagem das amostras de feijão-caupi por exposição direta ao sol	43
Figura 4.1	Curvas de cinética de secagem na estufa de feijão-caupi em diferentes temperaturas	52
Figura 4.2	Taxas de secagem em função do tempo de secagem do feijão-caupi nas temperaturas de: 40 °C (a) e 50 °C (b)	54
Figura 4.3	Taxa de secagem artificial das amostras de feijão-caupi em camada fina para a temperatura de: 60 °C (a) e 70 °C (b)	55
Figura 4.4	Valores de razão do teor de água experimentais e estimados pelo modelo de Page em função do tempo de secagem em estufa do feijão-caupi nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C	58
Figura 4.5	Representação da equação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo durante a secagem em camada fina das amostras de feijão-caupi nas diferentes condições de temperatura	60
Figura 4.6	Secagem de feijão-caupi em secador ACSN e da testemunha colocada em abrigo	64
Figura 4.7	Curva do teor de água (% b.u) das amostras em secador ACSN e testemunha	66
Figura 4.8	Taxas de secagem em função do tempo de secagem do feijão-caupi em camada fina no secador ACSN (a) e testemunha (b)	67
Figura 4.9	Cinética de secagem do feijão-caupi no secador ACSN com ajuste pelo modelo de Page	69
Figura 4.10	Temperaturas: na câmara de secagem do secador ACSN e no ambiente do laboratório (a); imagem térmica da serpentina na câmara de secagem durante o processo de secagem (b)	71

Figura 4.11	Intensidade média de irradiação solar em Campina Grande no dia da secagem (26/03/2016)	73
Figura 4.12	Secagem das amostras de feijão-caupi por exposição direta ao sol	75
Figura 4.13	Taxa de secagem em função do tempo de secagem em camada fina de feijão-caupi por exposição direta ao sol	76
Figura 4.14	Cinética de secagem por exposição direta ao sol do feijão-caupi com ajustes pelo modelo de Page	78
Figura 4.15	Cinética de secagem do feijão-caupi em secador solar	79
Figura 4.16	Taxa de secagem da amostra de feijão-caupi em secador solar	80
Figura 4.17	Cinética de secagem em secador solar do feijão-caupi com ajuste pelo modelo de Aproximação da Difusão	83
Figura 4.18	Secagem do feijão-caupi por exposição direta ao sol combinada com secagem noturna em secador ACSN ou em abrigo do laboratório (Testemunha)	85
Figura 4.19	Taxas de secagem das amostras de feijão-caupi por exposição direta ao sol combinada com secagem noturna em secador ACSN (a) e testemunha (b)	87
Figura 4.20	Cinética de secagem por exposição ao sol combinada com secagem noturna em secador ACSN do feijão-caupi com ajuste pelo modelo de Aproximação da Difusão	91
Figura 4.21	Cinética de secagem por exposição ao sol combinada com secagem noturna em abrigo no laboratório do feijão-caupi com ajuste pelo modelo de Aproximação da Difusão	92
Figura 4.22	Secagem do feijão-caupi em secador noturno ACSN ou colocados em abrigo no período noturno (testemunha) combinada com secagem em secador solar	94
Figura 4.23	Taxas de secagem da amostra de feijão-caupi em: secador ASCN combinada com secagem em secador solar (a); testemunha 1 - amostra mantida em abrigo (noite) (b); e testemunha 2 - amostra mantida em abrigo (noite) e seca em secador solar (dia) (c)	96
Figura 4.24	Cinética de secagem noturna em secador ACSN combinada com secagem em secador solar para as amostras de feijão-caupi com ajuste pelo modelo de Midilli	100

Figura 4.25	Curvas de secagem das amostras de feijão-caupi em estufa e em secador ACSN	102
Figura 4.26	Curvas de secagem das amostras de feijão-caupi em estufa e por exposição direta ao sol	103
Figura 4.27	Curvas de secagem das amostras de feijão-caupi em estufa e em secador solar por exposição direta	104
Figura 4.28	Curvas de secagem das amostras de feijão-caupi em estufa e por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN	105
Figura 4.29	Curvas de secagem das amostras de feijão-caupi em estufa e com secagem em secador ACSN combinada com secagem em secador solar de exposição direta	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Alguns dos principais modelos matemáticos empíricos e semi-empíricos utilizados na literatura	10
Tabela 3.1	Características técnicas de tensão e corrente dos componentes do sistema fotovoltaico	36
Tabela 3.2	Modelos matemáticos ajustados às curvas de secagem das sementes de feijão-caupi	45
Tabela 4.1	Valores calculados dos parâmetros de energia para o dimensionamento do sistema fotovoltaico	51
Tabela 4.2	Parâmetros dos modelos matemáticos, coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM) de diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de secagem de feijão-caupi em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C	57
Tabela 4.3	Valores dos coeficientes de difusão efetivo (D_{ef}) e dos coeficientes de determinação (R^2) para o feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp.) em diferentes temperaturas de secagem artificial em estufa	59
Tabela 4.4	Propriedades termodinâmicas do processo de secagem das amostras de feijão-caupi nas diferentes condições de temperatura	61
Tabela 4.5	Teor de água (% b.u.) inicial, final e perda de água (%) das amostras de feijão-caupi desidratadas em secador ACSN e colocadas na bancada do laboratório no período noturno (testemunha)	65
Tabela 4.6	Parâmetros dos diferentes modelos ajustados às curvas de cinética de secagem do feijão-caupi com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM) em secador ACSN e de sua testemunha em bancada de laboratório (abrigo)	68
Tabela 4.7	Valores da difusão efetivo e coeficiente de determinação (R^2) obtidos para amostra de feijão-caupi no secador ACSN e para a testemunha	70

Tabela 4.8	Intensidade média de irradiação em Campina Grande no dia 26/03/2016	73
Tabela 4.9	Teor de água inicial e final e perda de água das amostras de feijão-caupi na secagem por exposição direta ao sol	76
Tabela 4.10	Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados de secagem por exposição direta ao sol do feijão-caupi, coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM)	77
Tabela 4.11	Teor de água inicial e final das amostras de feijão-caupi desidratadas em secador solar	81
Tabela 4.12	Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados as curvas de secagem do feijão-caupi em secador solar, coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM)	82
Tabela 4.13	Teor de água inicial e final das amostras de feijão-caupi secas por exposição direta ao sol combinada com secagem em ACSN e da testemunha, em cinco etapas	87
Tabela 4.14	Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados de secagem do feijão-caupi por exposição direta ao sol combinada com secagem noturna em secador ACSN ou testemunha, colocada em abrigo no laboratório, coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM)	90
Tabela 4.15	Valores do coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) e do coeficiente de determinação (R^2) obtidos para a amostra e testemunha de feijão-caupi para a secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN	93
Tabela 4.16	Teor de água inicial e final das amostras de feijão-caupi secas em secador ACSN combinada com secador solar e testemunha na primeira e segunda etapas de secagem	97
Tabela 4.17	Parâmetros dos modelos ajustados aos dados de secagem do feijão-caupi em secador ACSN combinado com secagem em secador solar, qui-quadrado (χ^2), coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM)	99

Tabela 4.18	Valores do coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) e coeficiente (R^2) obtidos para secagem em secador ACSN combinada com secagem em secador solar da amostra de feijão-caupi e testemunha	101
Tabela A.1	Valor médio da temperatura e umidade relativa no ambiente externo e interno do secador ACSN de uso noturno, durante as secagens das amostras de feijão-caupi	127
Tabela A.2	Valor médio da temperatura, umidade relativa e radiação solar no ambiente interno e externo durante as secagens das amostras de feijão-caupi por exposição direta ao sol	127
Tabela A.3	Valor médio da temperatura, umidade relativa e radiação solar no ambiente interno e externo durante as secagens das amostras de feijão-caupi em secador solar	127
Tabela A.4	Valor médio da temperatura, umidade relativa e radiação solar do ambiente externo durante as secagens das amostras de feijão-caupi e testemunha por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador solar ACSN	128
Tabela A.5	Valores médio da temperatura e umidade relativa no interior do secador durante as secagens das amostras de feijão-caupi por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador solar ACSN	128
Tabela A.6	Valor médio da temperatura, umidade relativa e radiação solar do ambiente externo durante as secagens das amostras de feijão-caupi e testemunha em secador solar ACSN combinada com secagem em secador solar	129
Tabela A.7	Valor médio da temperatura, umidade relativa e radiação solar no interior do secador durante as secagens das amostras de feijão-caupi e testemunha em secador solar ACSN combinada com secagem em secador solar	129

NOMENCLATURA

A_c	Área do coletor	[m ²]
a	Coefficiente dos modelos	[adimensional]
a	Maior eixo do grão	[mm]
B	Ângulo de inclinação	[grau]
b	Coefficiente dos modelos	[adimensional]
b	Eixo médio do grão	[mm]
C_{BANCO}	Capacidade de carga do banco de baterias	[Ah]
C_p	Coefficiente térmico da água	[Wh(kg °C)]
c	Coefficiente dos modelos	[adimensional]
c	Menor eixo do grão	[mm]
D	Diâmetro do tubo interno	[m]
D_i	Coefficiente de difusão efetivo	[m ² s ⁻¹]
D_o	Constante pré-exponencial	[m ² s ⁻¹]
DQM	Desvio quadrático médio	[adimensional]
E_A	Energia armazenada no banco de baterias	[Wh]
E_a	Energia de ativação	[kJ mol ⁻¹]
E_C	Energia consumida	[Wh]
E_P	Energia produzida pelo módulo diariamente	[Wh]
F	Fator de segurança	[adimensional]
F_R	Fator de remoção de calor do coletor	[adimensional]
GLR	Grau de liberdade do modelo	[adimensional]
G_T	Radiação solar absorvida por unidade área	[W/m ²]
H_s	Horas diárias de isolamento	[h]
h	Inclinação do coletor	[m]
I_{MAX}	Corrente elétrica máxima do painel fotovoltaico	[A]
I_{SC}	Corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico	[A]
K_B	Constante de Boltzmann	[JK ⁻¹]
K_p	Constante de Planck	[J s ⁻¹]
k	Constante de secagem	[min ⁻¹]
k_0	Constante de secagem	[s ⁻¹]
k_I	Constante de secagem	[s ⁻¹]
L	Comprimento da superfície absorvedora do tubo interno	[m]

m	Massa de água do reservatório térmico	[kg]
m	Massa instantânea total	[kg]
m_s	Massa de sólidos secos	[kg]
N	Número de tubos do coletor	[adimensional]
N_p	Número de painéis fotovoltaicos em paralelo	[adimensional]
n	Coefficiente dos modelos	[adimensional]
n	Número de verificações	[adimensional]
n_t	Número de termos	[adimensional]
Q_u	Energia útil	[Wh]
P	Potência	[Watt]
P_D	Profundidade de descarga permitida	[%]
P_M	Potência do painel	[W]
Q	Energia Térmica	[Wh]
R	Constante universal dos gases	[kJmol ⁻¹ K ⁻¹]
R^2	Coefficiente de determinação	[%]
R_{ad}	Radiação solar verificada	[W/m ²]
\overline{Rad}	Radiação solar média	[W/m ²]
R_b	Fator de inclinação do coletor	[adimensional]
R_e	Raio equivalente	[m]
R_X	Razão do teor de água	[adimensional]
R_X	Razão do teor de água	[adimensional]
$R_{X_{exp}}$	Razão do teor de água experimental	[adimensional]
$R_{X_{Pred}}$	Razão do teor de água predito	[adimensional]
T	Tempo de uso em horas	[h]
T_a	Temperatura absoluta	[K]
T_{maior}	Temperatura máxima do reservatório no final do período	[°C]
T_{menor}	Temperatura mínima do reservatório no início do período	[°C]
T_i	Temperatura da água na entrada do secador	[°C]
T_o	Temperatura da água na saída do secador	[°C]
t	Tempo de secagem	[s]
t_n	Tempo de secagem inicial	[min]
t_{n+1}	Tempo de secagem final	[min]
U_L	Coefficiente global de calor	[W/m ² . K]

V	Volume do grão	$[\text{mm}^3]$
V_{BANCO}	Tensão do banco de baterias	$[\text{V}]$
V_{BAT}	Tensão da bateria ou do banco de baterias	$[\text{V}]$
X	Teor de água em base seca	[adimensional]
X_i	Teor de água inicial	[adimensional]
X_n	Teor de água inicial	[adimensional]
X_{n+1}	Teor de água final	[adimensional]
X_e	Teor de água de equilíbrio	[adimensional]
X_o	Teor de água inicial	[adimensional]
X_t	Teor de água no tempo t	[adimensional]

LISTA DE SÍMBOLOS

η	Eficiência do coletor solar	[%]
η_i	Eficiência instantânea	[%]
χ^2	Qui-quadrado	[adimensional]
Δh	Entalpia específica	[J mol ⁻¹]
Δs	Entropia específica	[J mol ⁻¹ K ⁻¹]
ΔG	Energia livre de Gibbs	[J mol ⁻¹]
ΣS	Somatório da radiação solar	[W/m ²]
θ	Ângulo de incidência	[°]
θ_z	Ângulo zenital	[°]
τ	Transmitância	
α	Absortividade	

LISTA DE SIGLAS

ACSN	Acumulador de Calor para Secagem Noturna
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CITI	Centro de Inovação e Tecnologia Industrial
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DQM	Desvio Quadrático Médio
EXP	Experimento
PCMs	Phase Change Materials
PPR	Polipropileno Copolímero Random
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

ALVES, Ronaldo Araújo. Desenvolvimento de secador solar autônomo: utilização na secagem de feijão-caupi. Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

RESUMO

Como a radiação solar é abundante no Brasil durante quase todo o ano, e por ser essa fonte de energia renovável e não poluente, a secagem solar dos produtos agrícolas se torna uma alternativa promissora. O uso da radiação solar em secagem apresenta uma dificuldade básica, que é a natureza periódica da radiação e a consequente interrupção da secagem à noite, o levando à ideia de armazenar parte da energia térmica para uso noturno ou em dias nublados. Diante do exposto, objetivou-se neste trabalho desenvolver um secador solar que armazena calor (secador ACSN), utilizando coletores a vácuo com circulação forçada para uso noturno, alimentado com um sistema autônomo de energia elétrica baseado em painéis fotovoltaicos no qual foi usado na secagem de amostras de feijão-caupi. Para análise comparativa, foram realizadas diversas secagens: secagem convencional (estufa) em diversas temperaturas; secagem solar direta ao sol com convecção natural; secagem por exposição direta ao sol; e, secagem combinada, utilizando o secador ACSN com secador solar e com secagem por exposição direta ao sol. A secagem de feijão-caupi no ACSN mostrou-se eficiente, atingindo altos níveis de redução de teor de água mesmo no período noturno, maiores taxas de secagem e altos valores de temperaturas médias verificadas dentro do secador acumulador de calor (ACSN). Alguns dos principais modelos matemáticos usados na literatura foram aplicados e todos apresentaram ajustes satisfatórios às curvas de cinética de secagem do feijão-caupi, em que o modelo de Page apresentou os melhores ajustes. Os valores do coeficiente de difusão efetivo obtidos corroboraram os valores da literatura para outros grãos.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*, fontes de energia renováveis, energia solar, coletores a vácuo, secagem noturna

ALVES, Ronaldo Araújo. Development of autonomous solar dryer: use in the drying of cowpea. Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

ABSTRACT

Because solar radiation is abundant in Brazil for most of the year, and as it is a source of renewable and non-polluting energy, solar drying of agricultural products becomes a promising alternative. The use solar radiation for drying presents a basic difficulty, which is the periodic nature of the radiation and the consequent interruption of drying process at night, which leads to the idea of storing some of the thermal energy for night or cloudy days use. Taking this into consideration, the objective of this work was to develop a solar dryer that stores heat (ACSN dryer), using vacuum collectors with forced circulation for night use, fed with an autonomous system of electric energy generation based on photovoltaic panels; this system was used in the drying of cowpea samples. For comparative analysis, several dryings were performed: conventional drying (drying (oven) at various temperatures; direct solar drying by natural convection; drying by direct exposure to the sun; and a combined drying using the ACSN drier both with solar drier and with direct exposure to the sun. The drying of cowpea in the ACSN was efficient, reaching high levels of reduction of water contents, even at night; higher drying rates and high values of average temperatures within the heat accumulator drier (ACSN) were observed. Some of the main mathematical models used in the literature were applied and all presented satisfactory adjustments to the drying kinetic curves of cowpea, where the Page model presented the best fittings. The values of the effective diffusion coefficient obtained corroborate the values of the literature for other grains.

Keywords: *Vigna unguiculata*, renewable energy sources, solar energy, vacuum collectors, night drying.

1 - INTRODUÇÃO

Países tropicais como o Brasil dispõem de um grande potencial para uso de energia solar, com períodos do ano com pouca nebulosidade, baixa umidade relativa do ar e elevada incidência de radiação solar. O Brasil recebe níveis médios de radiação solar superiores aos observados na maioria dos países europeus e com variabilidade sazonal baixa, devido a grande parte do país está situada na zona tropical (MARTINS e PEREIRA, 2011). Os recursos de irradiação solar no Brasil, um dos maiores do mundo, variam de 1500 kWh/m²/ano, na região Sul, a 2.100 kWh/m²/ano, na região Nordeste (PEREIRA et al., 2006).

Recentemente, os preços altos e a escassez de combustíveis fósseis têm aumentado a necessidade de utilização da energia solar como fonte de energia alternativa para a secagem de produtos agrícolas, especialmente nos países em desenvolvimento (TRIPATHY; KUMAR, 2009). Alguns agricultores brasileiros já realizam as secagens de seus grãos por exposição ao sol, no entanto, Tunde-Akintunde (2011) relatou que este tipo de secagem apresenta alguns problemas devido à riscos de contaminação e ataque de insetos, além de longos tempos de secagem requeridos. Para superação dessas desvantagens, o processo de secagem por exposição ao sol pode ser substituído pela secagem com utilização de secadores solares. Segundo Chowdhury et al. (2011), a secagem com secador solar pode ser considerada como uma evolução da secagem por exposição ao sol, constituindo um sistema mais eficaz para o aproveitamento da energia solar. Akpınar (2008) reportou que a utilização de um secador solar permitiu redução do tempo de secagem em cerca de 65%, em relação a secagem por exposição direta ao sol.

Para diminuir o tempo e o custo de secagem de grãos, existe a necessidade de desenvolver secadores solares de uso contínuo, de tal forma que o processo não seja interrompido durante à noite. De acordo com Queiroz et al. (2011), estudos para superar esse inconveniente devem considerar a acumulação de energia solar durante o dia, a fim de manter a secagem durante a noite, mesmo que a uma menor taxa. Nesse sentido, a utilização de água com a finalidade de acumular energia solar tem a vantagem de poder ser realizada em um volume de líquido relativamente pequeno e com a utilização de coletores solares simples. Como uma aplicação na secagem para armazenamento e comercialização do feijão-caupi, pode-se utilizar esta tecnologia do secador de uso contínuo.

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) é conhecido popularmente como feijão-de-corda, feijão-miúdo, feijão-macassar e feijão-fradinho (grãos brancos) (BORÉM; CARNEIRO, 2006). É uma cultura tradicionalmente cultivada no Nordeste brasileiro e vem se expandindo para outras regiões do Brasil em razão de sua ampla adaptabilidade às condições tropicais e ao baixo custo de produção. Fatores como produção de alta qualidade, valor nutritivo e regularidade da oferta em termos de quantidade e padronização do produto têm despertado o interesse de comerciantes, da agroindústria e de distribuidores por essa cultura, colaborando para a abertura de importantes mercados, inclusive no exterior (FREIRE FILHO et al., 2011).

A comercialização de feijão-caupi exige conhecimento sobre o armazenamento e cuidados na secagem visto que, no desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos e sementes, é de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água (BERBET et al., 1995). Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem, são utilizados modelos matemáticos que representam satisfatoriamente a perda de água do produto durante o período de secagem (GONELI et al., 2014; SANTOS et al., 2013).

Neste contexto, considerando a necessidade de reduzir o teor de água dos grãos para o armazenamento e a comercialização, ressalta-se a importância de se estudar a secagem do feijão-caupi através de uma energia sustentável, não poluente (solar), da qual o Nordeste recebe alta incidência, utilizando-se para isto de secadores providos com sistemas acumuladores de calor.

1.1 - Objetivo geral

Desenvolver um secador solar para uso diurno e noturno, avaliando seu desempenho, combinado com secagem artificial e secagem solar convencional, na secagem de feijão-caupi.

1.1.1 - Objetivos específicos

- Dimensionar um sistema de energia solar fotovoltaica para alimentação de bombas de circulação de água;
- Determinar a cinética de secagem de feijão-caupi pelo método artificial (secagem em estufa) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, a taxa de secagem, o coeficiente de difusividade e as propriedades termodinâmicas;

- Determinar a cinética de secagem de feijão-caupi em secador acumulador de calor para secagem noturna (ACSN), a taxa de secagem e o coeficiente de difusividade;
- Calcular a eficiência térmica do coletor solar de tubos a vácuo;
- Determinar a cinética de secagem de feijão-caupi sob exposição direta ao sol e em secador solar com convecção natural, a taxa de secagem e o coeficiente de difusividade;
- Combinar as secagens de feijão-caupi por exposição direta ao sol com a secagem noturna em secador ACSN;
- Combinar as secagens de feijão-caupi em secador ACSN com a secagem em secador solar com convecção natural; e,
- Comparar as secagens de feijão-caupi em estufa com as secagens utilizando energia solar.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A globalização é um processo que se acentuou a partir da segunda metade do século XX, tendo como características marcantes a instantaneidade das informações, comunicações, padronização dos meios técnicos e a interconexão das economias de diferentes países. Embora a globalização econômica seja responsável pelo desenvolvimento das relações internacionais, por agir sob a égide de forças livres, acaba, muitas vezes, comprometendo os recursos naturais e o meio ambiente como um todo.

O reconhecimento da importância da questão ambiental tem determinado uma discussão cada vez maior sobre os padrões de desenvolvimento sustentável. Longe de serem incompatíveis, como já se cogitou antigamente, os interesses econômicos e a preservação ambiental são fundamentais para a sociedade e devem conviver em harmonia para que haja um maior equilíbrio e justiça social entre os povos (PISKE, 2016).

Neste contexto, busca-se desenvolver pesquisas que possam contribuir para um desenvolvimento sustentável, que promovam o desenvolvimento de tecnologias de baixo custo, diminuindo o custo de produção, que seja viável economicamente e agregue valor aos processos produtivos. A rentabilidade de um processo de secagem de um produto, seja ele agrícola ou não, deve ser levado em consideração, dentre outros parâmetros, a qualidade final do produto seco, a quantidade de energia gasta e o tempo utilizado neste processo (NUNES, 2016).

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos mais relevantes dos processos de secagem, o estado da arte, modelos matemáticos, o produto utilizado na pesquisa (feijão-caupi), as fontes de energias utilizadas e os sistemas de secagem.

2.1 – Secagem

A secagem é uma técnica antiga de conservação de alimentos que consiste na remoção de água ou qualquer outro líquido do alimento na forma de vapor para o ar não saturado. Esta técnica vem sendo constantemente estudada e aperfeiçoada para obtenção de produtos com maior qualidade e menor tempo de processamento (FIOREZE, 2004). A secagem de produtos como grãos, sementes e frutos, é um processo simultâneo de transferência de calor e massa utilizados para evitar o desenvolvimento de fungos,

micro-organismos e insetos que, normalmente, são as causas da deterioração desses produtos (SILVA, 2008).

De acordo com Brooker et al. (1992), quando as condições de secagem são ideais, ou seja, temperatura, umidade relativa e teor de água controlado, os produtos apresentam aparência adequada e qualidade nutritivas dentro dos padrões. Mas, quando estas condições não são respeitadas, como por exemplo, a temperatura utilizada é muito elevada, ocorre um percentual bastante elevado de grãos trincados, que dificulta a estocagem e compromete a qualidade do produto.

A secagem de produtos é um fenômeno complexo, que envolve processos simultâneos de transferência de calor e massa. A velocidade de remoção da água na superfície do material a secar, não pode exceder em muito a velocidade de difusão da água no interior do produto. Um estudo detalhado do problema, para fins de dimensionamento e projeto de equipamentos de secagem de alimentos, requer o desenvolvimento e solução de um modelo matemático representativo do material a secar acoplado ao modelo matemático da câmara de secagem no secador (SANTOS et al., 2010).

Durante muito tempo, o tradicional método de secagem agrícola era deixar o produto no campo, sob a ação do sol e do vento, para perder parte de sua umidade. Atualmente ainda se aplica, visto que a secagem artificial é uma operação relativamente cara. Entretanto, a secagem mecânica apresenta uma série de vantagens em relação à secagem natural, como não depender das condições climáticas, possibilidade de se estabelecer uma programação de secagem com mais facilidade, diminuição dos riscos de deterioração e contaminação dos alimentos em função do tempo menor de secagem e exposição dos alimentos (LIMA et al., 2000).

Baini e Langrish (2007) compararam em um estudo experimental de secagem contínua e intermitente de bananas, usando secadores solares, os dados experimentais obtidos com modelos empíricos e difusivos. Eles concluíram que os modelos empíricos testados eram aplicáveis na descrição da cinética de secagem contínua, mas não da secagem intermitente. Nos dois casos, o modelo difusivo descreve melhor a cinética da secagem de bananas. Particularmente, os autores consideram que o modelo difusivo é adequado para prever o período de relaxação que ocorre na secagem intermitente.

Marinos-Kouris e Maroulis (2015) e Saleh e Badran (2009) afirmam que vários modelos teóricos complexos para descrever o fenômeno de transferência de massa e de calor durante o processo de secagem estão disponíveis na literatura, mas, a grande

questão que ainda permanece é a medição ou determinação dos parâmetros utilizados nos modelos.

Segundo Alonso (2001) as transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que estas sejam divididas esquematicamente em três períodos, mostrados na Figura 2.1, onde são apresentadas as curvas de evolução do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T) e da velocidade de secagem (dX/dt), também chamada de Taxa de secagem, ao longo do tempo, para um experimento utilizando ar de propriedades constantes.

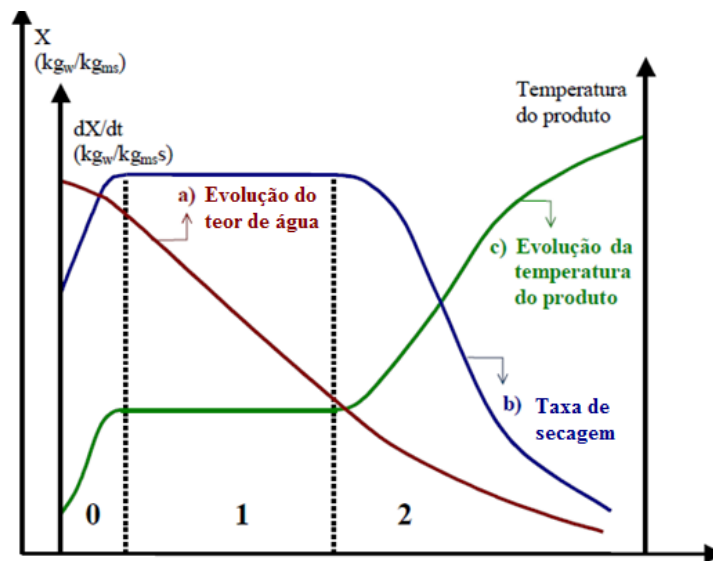


Figura 2.1 - Curva de secagem

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (teor de água do produto, X , em base seca, em relação à evolução do tempo de secagem, t). É a curva obtida pesando o produto a cada intervalo de tempo pré-fixado durante a secagem sob determinadas condições. A curva (b) representa a taxa de secagem do produto, dX/dt , obtida diferenciando a curva (a). A curva (c) representa a temperatura do produto durante a secagem.

2.2 – Estado da arte para sistemas de secagem

O estado da arte em teses acadêmicas se destina a documentar o que está sendo feito atualmente no campo em estudo específico. Este item é fundamental para apresentar as inovações em desenvolvimento, permitindo observar e comparar as inovações propostas com as de outras pesquisas.

Nunes et al. (2015) desenvolveram um secador solar para desidratação de frutas. O protótipo projetado e construído trata-se de um secador solar de exposição indireta com câmara de secagem. Os testes experimentais foram realizados em março de 2015, na desidratação de banana. As temperaturas do ar de secagem na entrada, na saída e no interior do coletor solar e da câmara de secagem foram medidas por 10 termopares distribuídos de forma a obter uma melhor distribuição desta variável durante o processo de secagem. Os experimentos apresentaram significância estatística e os modelos empíricos utilizados se mostraram confiáveis e representativos, dado os valores elevados dos coeficientes de determinação que se aproxima de 0,99.

Fudholi et al. (2014) testaram experimentalmente e analisaram o desempenho de um secador solar usado na secagem de pimentão vermelho durante 33 h. Neste estudo a primeira lei da termodinâmica foi usada para estimar a energia útil obtida pelos coletores. As eficiências do coletor solar e do secador solar foram de 28 e 13%, respectivamente, para uma irradiação solar média de 420 W/m² e uma taxa de fluxo de massa de ar de 0,07 kg/s.

Hubackova et al. (2014), construíram um secador solar para investigar a secagem de peixe no Camboja. A secagem solar foi comparada com a secagem convencional em forno elétrico. Foram selecionadas cinco espécies típicas de peixes do Camboja para este estudo. As médias de temperatura do ar de secagem e da umidade relativa do ar foram de 55,6 °C e 19,9%, respectivamente. A eficiência global do secador foi de 12,37%, o que é típico para secadores de convecção natural.

Stiling et al. (2012), fizeram uma comparação de desempenho entre dois secadores de modo misto na secagem do tomate Roma. Os secadores foram identicamente construídos, sendo um dos secadores com superfície plana móvel e facilmente ajustável concentrando painéis solares fotovoltaicos para maximizar a energia solar incidente sobre o secador. Observaram que as temperaturas no interior do secador que utilizaram os painéis solares fotovoltaico de concentração foram aproximadamente 10 °C mais elevada do que no secador normal, durante a maior parte dos testes em dia ensolarado. Este aumento da temperatura levou a menores tempos de secagem do tomate Roma no secador com concentração de painéis solares. Também observaram um aumento considerável da velocidade de secagem em dias de sol, com uma diminuição de 27% do tempo total de secagem, em comparação com o normal, para o tomate atingir o teor de umidade em torno de 20% em base úmida.

Parikh e Agrawal (2011) projetaram, construíram e testaram um secador solar de exposição indireta usado na secagem de pimentões verdes e batatas fritas e, em seguida, analisaram seu processo de secagem, o design, temperatura de secagem, eficiência, utilização de materiais simples e de baixo custo e período de retorno. Concluíram que a maior temperatura do ar e uma pequena melhora na eficiência foi observada no secador solar com a cobertura de vidro, em comparação com o secador solar com cobertura de policarbonato.

Fudholi et al. (2010), estudando os secadores solares, classificaram-no basicamente em quatro tipos: (1) secadores solares diretos, (2) secadores solares indiretos, (3) secadores de modo misto e (4) secadores solares híbridos e mostraram que os secadores 1 e 2 têm a vantagem de serem simples e de baixo custo, sendo a desvantagem sua total dependência do sol. Já os secadores 3 e 4 têm as vantagens de operarem com e sem sol e a secagem ser realizada de forma mais rápida, porém a desvantagem é que depende de outra fonte de energia que, em geral, tem custo elevado. Também construíram e testaram experimentalmente um secador solar de túnel, composto de um coletor de secagem em formato de túnel, uma placa plana coberta de plástico e três ventiladores alimentados por um módulo de células fotovoltaicas de 53 W para secar bananas (cerca de 300 kg), a fim de investigar o seu desempenho. Verificaram eficiência média diária do processo de secagem de 44%, com um fluxo de ar de 0,16 kg/s e irradiação solar média de aproximadamente, 800 W/m². Para esta irradiação a temperatura média do ar de secagem que entra na câmara foi de 46 °C. Constataram também, que a temperatura do ar de secagem aumenta com o aumento da intensidade de irradiação solar. Mas quando funciona com convecção natural, a eficiência instantânea diminui mesmo com o aumento da irradiação solar. Neste caso, a eficiência instantânea foi de 35 e 27%, respectivamente, para 570 W/m² de irradiação solar.

Juamilly et al. (2007) construíram e testaram um secador solar (coletor solar com cobertura de vidro, câmara de secagem solar, e um soprador de ar), para dois tipos de frutas (uva e damasco) e um tipo de vegetal (feijão) e observaram que o fator mais eficaz na taxa de secagem é a temperatura do ar no interior da câmara de secagem e concluíram que esta característica pode ser desprezada, quando a umidade relativa do ar de saída da câmara estiver entre 25 e 30%, não havendo necessidade de ar a alta velocidade no interior da câmara de secagem. Perceberam ainda que a câmara de secagem opera com uma eficiência de 20% durante a secagem de 10 kg de uvas a 65 °C

e 30% de umidade relativa do ar de secagem no interior da câmara de secagem, e opera com uma eficiência de 33% para a secagem de 10 kg de damasco a 60 °C e 25% de umidade relativa do ar de secagem no interior da câmara, ambos em camada fina.

Madhlopa e Ngwalo (2007) construíram um secador solar de exposição indireta com materiais simples e testaram em três modos de operação (solar, híbrido e fóssil) na secagem de 20 kg abacaxi fresco (*Ananas comosus*). Os valores médios da eficiência foram 15 e 13% nos modos de operação, solar híbrido e fóssil, respectivamente, concluindo que o secador solar é adequado para a preservação dos abacaxis e outros alimentos frescos.

2.3 – Modelagem matemática da cinética de secagem em camada fina de produtos agrícolas

Como a secagem de produtos é um processo que envolve simultaneamente os mecanismos de transferência de calor e massa, deve-se partir desses princípios para se obter um modelo matemático que represente bem os dados experimentais. Entretanto, isso às vezes torna-se difícil devido à complexa estrutura do alimento e às mudanças químicas e físicas que ocorrem durante a sua secagem, provocando muitas vezes uma redução na qualidade organoléptica e valor nutritivo.

A variação da umidade durante o processo de secagem influencia fortemente a velocidade das reações que ocorrem no interior do produto. Com isso, inúmeros estudos têm sido realizados para representar o período à taxa decrescente de secagem através de modelos matemáticos. Uma das formas é construir a curva de secagem do produto e ajustar os modelos já existentes a essa curva.

A teoria que tem apresentado mais aceitação é a teoria da migração de água por difusão, que se apoia exclusivamente na 2ª lei de Fick, expressa em termos de gradiente de umidade.

Lewis (1921) e Sherwood (1929) foram os primeiros que fizeram referência a esta lei, interpretando a secagem como um fenômeno da difusão de água líquida. A relação fundamental é apresentada na forma geral na Equação (2.1):

$$\frac{dX}{dt} = - \nabla \cdot (D \nabla X) \quad (2.1)$$

onde:

X - teor de água no tempo t, base seca;

t - tempo de secagem, s; e,

D - coeficiente de difusão, m²/s.

Diversas soluções analíticas da equação de difusão para diferentes condições iniciais e de contorno, considerando a difusividade constante ou variando com a concentração de água, foram obtidas por Crank (1975). Ele utilizou a difusividade aparente que engloba os diversos efeitos que possam intervir no mecanismo de migração.

Modelos matemáticos de processo de secagem são usados para projetar novos sistemas de secagem ou melhorar os existentes, ou mesmo para o controle do processo. Os modelos de secagem em camadas finas são os mais amplamente utilizados para descrever o comportamento de produtos durante a secagem. Podem ser categorizados em teóricos, semi-teóricos e empíricos (DOYMAZ, 2011; YUN et al., 2013). Alguns desses modelos estão listados na tabela 2.1, onde as equações descrevem RX (razão de teor de água, adimensional) em função do tempo t. Nos modelos, *a*, *b*, *c*, *d*, *f*, *n* são coeficientes, e *k*, *k₀*, *k₁* são constantes (s⁻¹) (GÓMEZ-DE LA CRUZ et al., 2015).

Tabela 2.1 – Alguns dos principais modelos matemáticos empíricos e semi-empíricos utilizados na literatura

Modelo	Tipo	Equação
Lewis ou exponencial	Empírico	$RX = \exp(-Kt)$
Page	Empírico	$RX = \exp(-kt^n)$
Henderson e Pabis	Empírico	$RX = a.\exp(-kt)$
Logarítmico	Empírico	$RX = a.\exp(-kt) + c$
Wang e Singh	Empírico	$RX = 1+a.t+b.t^2$
Dois termos	Semi-empírico	$RX = a.\exp(-k_0t) + c.\exp(-k_1t)$
Exponencial de dois termos	Semi-empírico	$RX = a.\exp(-kt) + (1- a) \exp(-kt)$
Midilli et al.	Empírico	$RX = a. \exp (-kt^n)+bt$
Yun et al.	Empírico	$RX = a+bt+ct^2/1+dt +ft^2$

Fonte: Gómez-de la Cruz et al. (2015)

A razão do teor de água é definida pela Equação (2.2):

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} \quad (2.2)$$

sendo:

X_t - teor de água no tempo t , g;

X_0 - teor de água inicial, g; e

X_e - teor de água de equilíbrio, g.

O teor de água instantâneo X_t é definido como a razão entre a quantidade de água no produto num dado momento e a quantidade de sólidos secos (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; SALEH; BADRAN, 2009) expresso pela Equação (2.3):

$$X_t = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (2.3)$$

sendo:

m - massa instantânea total da amostra, g;

m_s - massa de sólidos secos, g; e

X_t - expresso como massa instantânea de água/massa de sólidos secos.

O teor de água instantâneo X_e pode ser determinado a partir de dados de isotermas de dessorção (YUN et al., 2013).

No caso da modelagem da secagem solar, vários autores simplificaram a razão de teor de água para X_t/X_0 ao invés de $(X_t - X_e)/(X_0 - X_e)$. O motivo para tal é que nessas condições a umidade relativa do ar de secagem oscila continuamente, na melhor das hipóteses, apenas uma média de X_e seria possível estimar. Além disso, para valores baixos de X_e o erro envolvido na simplificação é muito pequeno (DIAMANTE; MUNRO, 1993; DOYMAZ, 2011).

Corrêa et al. (2007), estudando a modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão em camadas delgadas, verificaram que os modelos Aproximação da Difusão, Page, Midilli, Henderson e Pabis modificado e Dois Termos foram os que melhor representam o fenômeno de secagem do feijão, Resende et al (2009).

Corrêa et al. (2007) utilizaram alguns modelos matemáticos para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas, e concluíram que o modelo de Dois Termos representou satisfatoriamente o fenômeno de secagem, com valores de R^2 superiores a 0,99.

Afonso Júnior e Corrêa (1999), comparando modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão, concluíram que a equação proposta por Page foi a que melhor representou os dados experimentais.

Tratando-se ainda de modelos de secagem em camada fina ajustados em condições de temperatura variável, El-Sebaei e Shalaby (2013) utilizaram um secador do mesmo tipo, porém com coletor solar plano, para modelagem da secagem de tomilho e hortelã. A temperatura de entrada da cabine de secagem variou entre 30 e 54 °C aproximadamente, com média de 48 °C, entre 8 e 18 h.

2.4 – Secagem com energia solar

O Brasil é uma potência energética. A natureza forneceu fartos territórios com elevada incidência do recurso solar, terras agricultáveis para produção de biomassa energética, recursos hídricos com elevado potencial energético e agora, com as recentes descobertas do pré-sal, colocou o Brasil definitivamente como líder mundial na área dos recursos energéticos. Precisamos estar atentos e preparados para fazer as escolhas corretas e desenvolver as tecnologias mais eficientes para consolidar nossa liderança e ser exemplo para o mundo. A grande importância da energia solar vem despertando o interesse de muitos pesquisadores (GRILO, 2007; PRAKASH e KUMAR, 2013; SAVICKI, 2007).

Segundo Silva (1995), desde 1974, quando da primeira crise do petróleo, tem havido grande interesse na possibilidade de ser usada a energia solar para substituir as fontes convencionais de energia (sobretudo os derivados do petróleo) na secagem de produtos agrícolas ou em outras aplicações.

O Brasil dispõe de um grande potencial de uso solar em quase todo o território nacional, notadamente na região Nordeste. Esta energia se constitui em uma opção vantajosa na viabilidade de muitos projetos que poderiam promover o desenvolvimento da região em vários setores, como na secagem de grãos, aproveitamento da energia solar para aquecimento de água domiciliar e também na transformação de energia solar em elétrica (COSTA, 2008).

A energia solar em si não custa nada e é imune as flutuações nos preços das outras formas de energia. Com o avanço da tecnologia, ela pode ser convertida e usada de várias formas diferentes: fornecimento de eletricidade, calefação, resfriamento, transporte, iluminação e potência mecânica, sem contar que a maioria dos métodos usados gera poucos problemas ambientais. A desvantagem da energia solar está no fato

de não ser de fluxo contínuo, embora seja possível coletar e armazenar. Trata-se de uma energia intermitente, com fluxo interrompido pelas noites e pelos dias nevoentos (PENNEREIRO et al., 2010).

A utilização da radiação solar como fonte de energia é, sem dúvida, a forma que requer menor custo de operação. Por sua vez, em alguns casos, torna-se um processo não muito interessante do ponto de vista industrial, devido às variações climáticas e, em contrapartida, ao longo tempo necessário para atingir o ponto desejado de teor de água no alimento. Este tempo pode ser determinado a partir das curvas de secagem dos diversos produtos, que varia em função do tipo de processo, do equipamento utilizado e das condições de secagem (VILELA e ARTUR, 2008).

Segundo Garcia et al. (2004), os métodos de secagem são classificados quanto ao uso de equipamentos (natural e artificial), à periodicidade no fornecimento de calor (contínuo e intermitente) e a movimentação da massa de sementes (estacionário ou contínuo).

A secagem natural tem, como principal vantagem, o baixo custo, tanto das instalações como no requerimento de energia, mas requer maior tempo de secagem sendo altamente dependente das condições climáticas favoráveis para que a secagem ocorra com sucesso (DALBELLO, 1995).

Na secagem natural as sementes são secadas essencialmente pela ação do calor e do vento, sem uso de equipamento mecânico e/ou eletroeletrônico sendo mais barata e mais lenta que a artificial, no entanto está sujeita as modificações climáticas, razão pela qual é utilizada principalmente nas pequenas propriedades (CARVALHO, 1994).

Araújo et al. (1984), pesquisando a influência da secagem das vagens na germinação e no vigor de sementes de feijão, as submeteram à secagem natural e à secagem artificial, com ar aquecido a 40, 50, e 60 °C e verificaram que a secagem das vagens, com ar aquecido a 50 e 60 °C, causou redução na germinação e no vigor das sementes, logo após a secagem e que houve acentuado efeito da secagem a 60 °C sobre a qualidade das sementes, quando armazenadas, por um ano, em câmara seca.

O que caracteriza um método como artificial é o fato de que o processo é executado com o auxílio de alternativas mecânicas, elétricas ou eletrônicas, e o ar, que atravessa a massa de sementes, é forçado (CAVARIANI, 1996).

O processo de secagem realizado de maneira artificial é apontado por vários pesquisadores como uma das principais maneiras de conservação de sementes e alimentos. Este processo é um dos principais pontos de estrangulamento do sistema de

pós-colheita e requer grande quantidade de energia para sua realização. As características do ar de secagem e as dimensões dos secadores influenciam diretamente o seu desempenho e a qualidade do produto por ele secado (SOUZA et al., 2007). Isto se configura em secadores que apresenta diferentes acessórios, como: sistema de aquecimento do ar - contínua ou intermitente (por fornalhas a lenha ou queimadores de gás); sistema de ventilação do ar - ventiladores ou sistemas de movimentação dos grãos – estacionário ou contínuo (elevadores de caçamba, transportadores helicoidais ou fitas transportadoras).

2.5 – Secadores solar

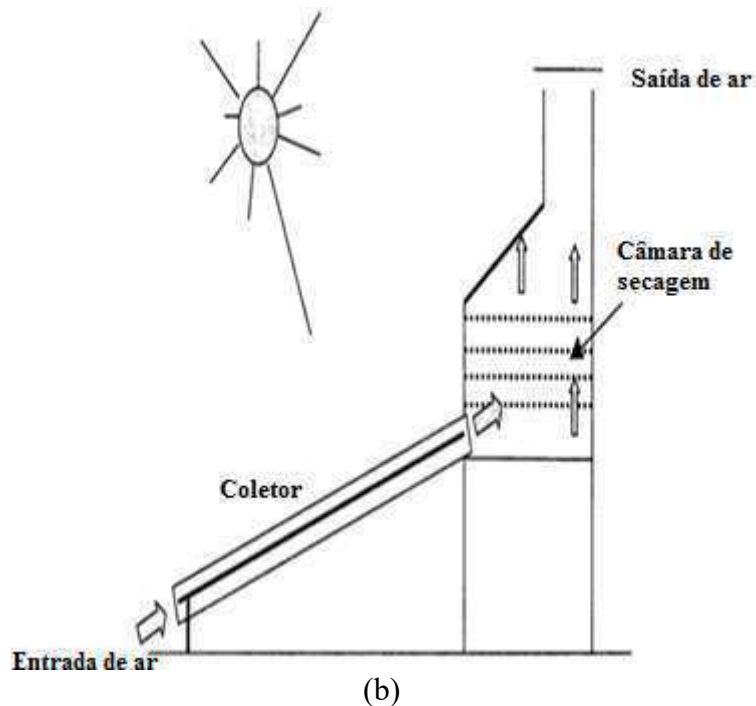
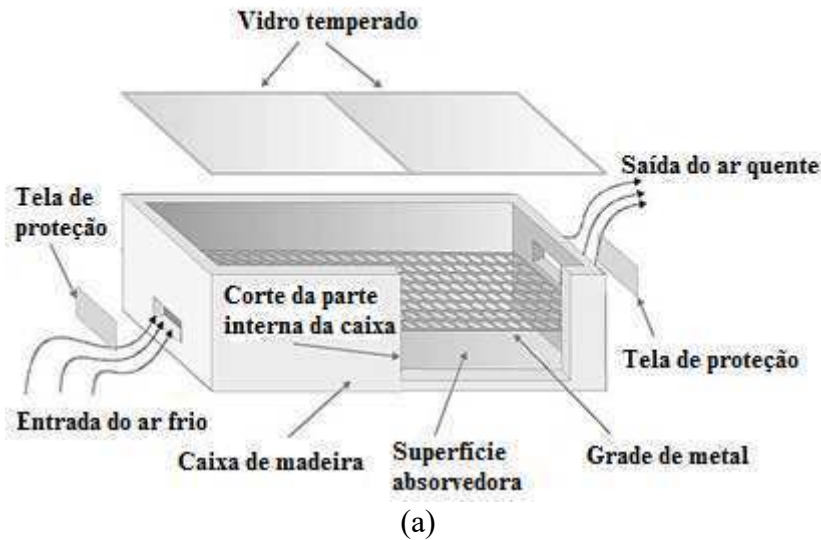
O desenvolvimento de equipamentos que convertem, com eficiência e baixo custo, a radiação solar em eletricidade é extremamente importante na atualidade. Devido aos altos custos de aquisição e operação de equipamentos convencionais para secagem de alimentos, e também por não ser economicamente viável para os pequenos produtores, os centros de pesquisa procuram solução com os sistemas de secagem solar.

O objetivo de um secador solar é fornecer ao produto uma quantidade de energia térmica maior do que a encontrada em condições ambientais, elevando de forma suficiente a pressão de vapor da água contida no produto, além de reduzir significativamente a umidade relativa do ar de secagem. Dessa forma, este passa a ter maior capacidade de transporte de água (EKECHUKWU; NORTON, 1999).

De acordo com Imre (2015), os secadores solares apresentam as seguintes partes principais:

- Espaço de secagem, onde o material a ser secado é colocado e a secagem tem lugar;
- Coletor para converter a radiação solar em energia térmica;
- Fonte de energia auxiliar (opcional);
- Equipamento de transferência de energia térmica, para transferir energia térmica ao ar de secagem ou ao material;
- Meios para manter o ar de secagem em movimento;
- Unidade de armazenagem de energia térmica (opcional);
- Equipamentos para controle e aquisição de dados (opcional); e,
- Dutos, tubos e outros aparatos.

Os secadores solares podem ser de dois tipos: secador de exposição ou radiação direta e indireta sob convecção natural ou forçada, Figura 2.2.



Fonte: Extraído de <https://sitiocurupira.wordpress.com>

Figura 2.2 – Secador solar de exposição direta com convecção natural (a) e secador solar de exposição indireta com convecção natural (b)

O secador de exposição direta é assim chamado em virtude do produto receber diretamente a radiação solar e o secador de exposição indireta é, normalmente, um coletor solar plano adicionado a uma câmara de secagem, com bandejas onde o produto

será distribuído, e ainda se pode ter uma chaminé para que haja uma melhor circulação na câmara e conseqüentemente no produto (KHALIL, 2007).

O secador solar pode ser construído de diversos materiais como: chapas metálicas, madeira, alvenaria, perfis de alumínio e muitos outros materiais reciclados. A placa ou chapa para absorção da radiação incidente pode, simplesmente, ser uma folha metálica de zinco pintada de preto fosco ou usar um material mais seletivo para aumentar a temperatura da placa. O sistema é isolado termicamente por um material de baixa condutividade térmica para evitar perdas de calor e na cobertura se pode usar tanto vidro quanto plástico transparente com espessura definida no projeto (BEZERRA, 2005; POTTTLER, 2006).

A radiação solar é do tipo eletromagnético e a terra recebe essa radiação em pequeno comprimento de onda e emite em grande comprimento de onda. Quando a radiação solar incidente atinge a cobertura do secador de exposição direta, parte é absorvida e causa uma elevação da temperatura no interior do secador, com conseqüente elevação da energia térmica, resultando em uma radiação com grandes comprimentos de onda e pequenas frequências. Essa radiação é então retirada no interior do secador, ocasionando assim, o efeito estufa (SILVA, 2008). Quando a superfície absorvedora do secador solar é pintada de preto fosco, favorece o efeito estufa, onde parte da radiação incidente é refletida no interior do coletor (GOMES, 2007). Construtivamente tem-se: a caixa na qual o produto a ser processado é colocado, em cima dessa estrutura vem o vidro transparente e, ao longo do caminho da caixa, a entrada do ar frio e a saída na outra extremidade para expulsar o ar quente úmido.

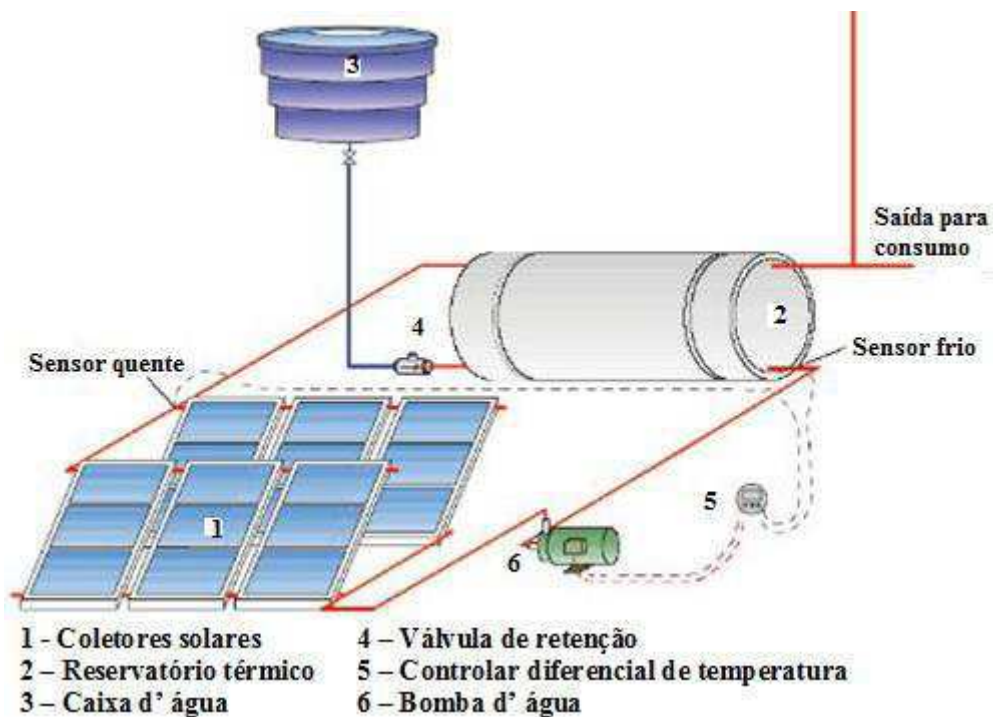
2.6 – Sistemas de aquecimento solar de água

Três circunstâncias justificam a armazenagem de energia num sistema de secagem solar: a secagem pode ser estendida pela energia armazenada; a energia excedente nos picos de radiação pode ser armazenada; e, a temperatura do ar de secagem pode ser controlada para evitar danos ao material.

Para armazenagem de energia podem ser empregados materiais naturais ou artificiais. Geralmente materiais naturais (água, camada de seixo rolado, e camada de brita) são mais baratos do que os sintéticos, além de materiais com mudança de fase (PCMs) (IMRE, 2015; MORRISON; ABDEL-KHALIK, 1978).

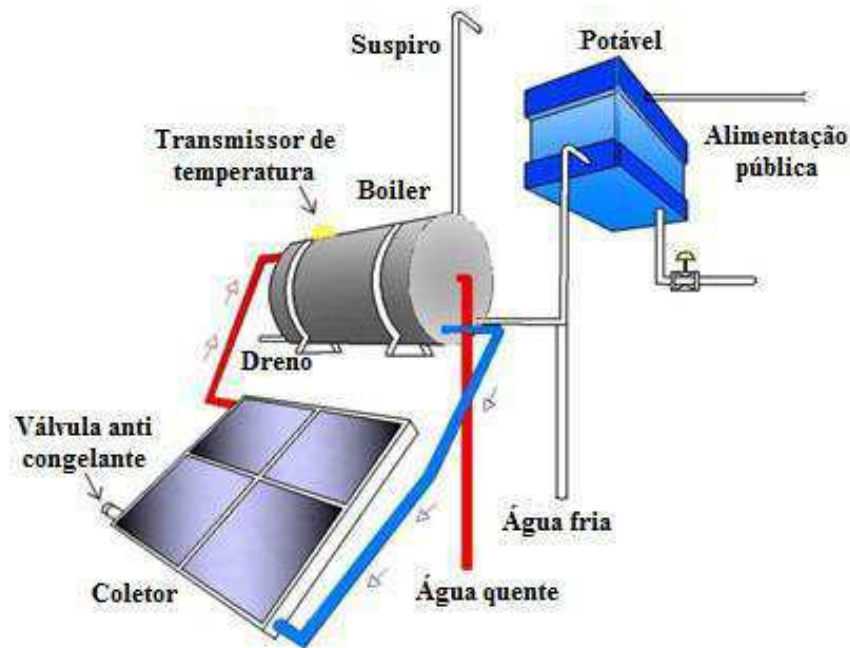
Existem dois tipos de circulação nos sistemas para aquecimento de água utilizando a energia solar: o ativo e o passivo. O sistema ativo utiliza uma bomba para

circulação do fluido entre o coletor e o reservatório térmico, necessitando de sensores e um sistema de controle para seu funcionamento (Figura 2.3). No outro sistema, chamado passivo ou de circulação natural, a bomba é eliminada, sendo o coletor instalado num nível mais baixo do que o tanque (Figura 2.4). A circulação se dá por termosifão, iniciando quando a água do coletor começa a ser aquecida e se torna menos densa do que a água fria do fundo do reservatório, que flui para a entrada do coletor. A água aquecida no coletor se desloca para a sua parte superior e daí para o topo do reservatório térmico (PENNEREIRO, 2010).



Fonte: Extraído de www.ebah.com.br

Figura 2.3 - Sistema de aquecimento solar com circulação forçada



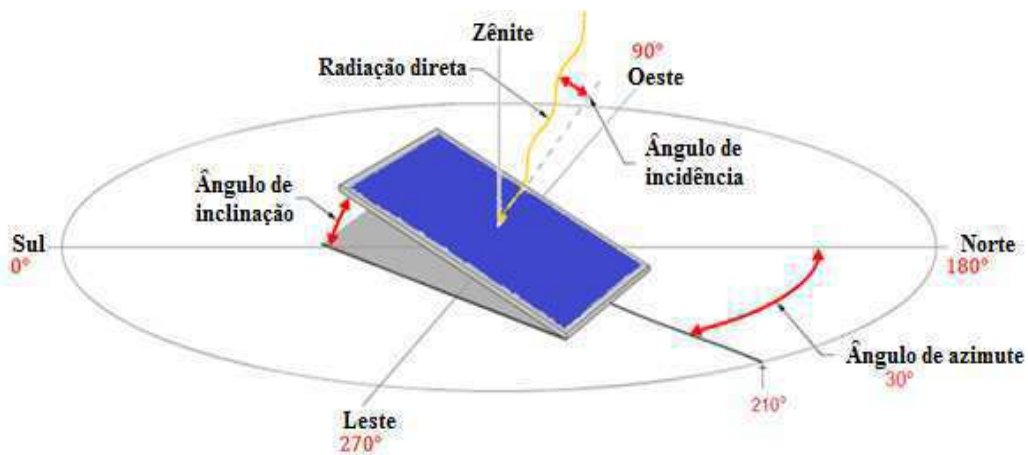
Fonte: Extraído de www.ebah.com.br

Figura 2.4 – Sistema de aquecimento solar direto com circulação por termossifão

2.6.1 – Coletores solares

Um coletor solar é o principal componente de um sistema de aquecimento solar. Ele promove a conversão da radiação solar, transferindo o fluxo energético proveniente da radiação incidente para o fluido que circula no interior do mesmo, segundo Siqueira (2009).

A orientação dos coletores solares devem estar voltados para o norte. Uma variação de 30° para Leste ou Oeste não traz uma perda muito grande de eficiência, mas, desvios superiores devem ser evitados (Figura 2.5).



Fonte: Extraído de American Publishers, Inc (2010)

Figura 2.5 – Orientação dos coletores solares

A inclinação ideal dos coletores deve estar em função da latitude da região e da variação solar nas quatro estações do ano (Figura 2.6). Adota-se como inclinação mínima o ângulo referente à latitude e como inclinação recomendável à latitude da região acrescida de 10° . Em regiões onde a latitude seja inferior a 10° , o ângulo de inclinação mínimo não deve ser inferior a 10° .

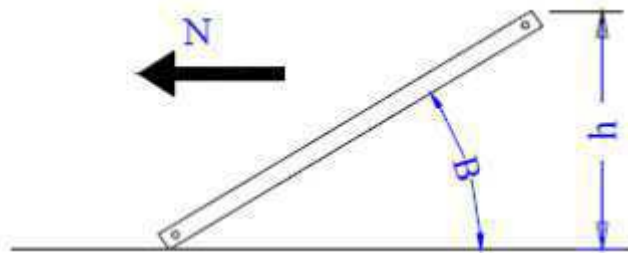


Figura 2.6 – Inclinação do coletor solar: B - ângulo de inclinação variável com a latitude [graus]; h - Inclinação do coletor [m] Fonte: Extraído de www.soletrolmais.com.br (2016)

2.6.1.1 – Coletores solares planos para aquecimento de água

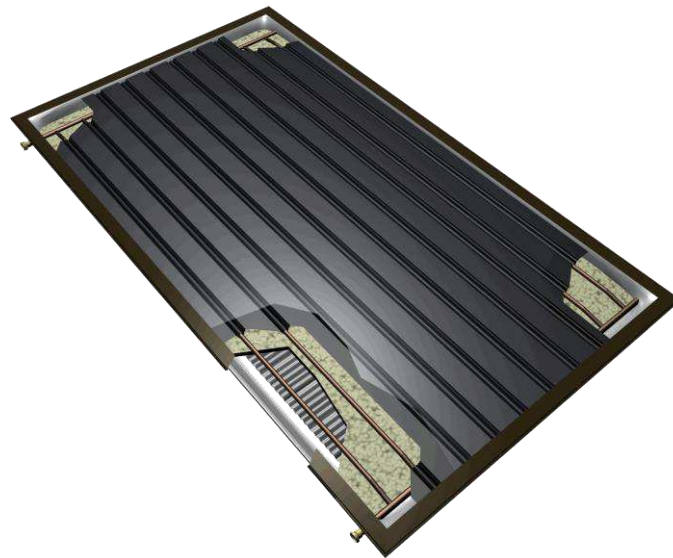
Os coletores solares planos fechados são utilizados para aquecer a água até uma temperatura de 60°C e proporcionar o condicionamento ambiental a partir da energia solar, com aplicação em residências, edifícios, hotéis, indústrias e hospitais (BAPTISTA, 2006).

Este tipo de coletor (Figura 2.7) é constituído por uma caixa de forma geométrica retangular, hermeticamente fechada e termicamente isolada por revestimento de poliuretano expandido ou lã de vidro e contém no seu interior uma chapa plana ou plástico transparente. Internamente, a água circula por uma tubulação de cobre que, por ser um ótimo condutor de calor, transmite o calor absorvido do sol para a água.

A cobertura de vidro além de impedir a entrada de água de chuva, materiais sólidos, poeira, entre outros. No coletor, tem como finalidade principal provocar o efeito estufa.

A radiação solar é o responsável por aquecer a água utilizando a energia do sol. Neste contexto esta radiação solar atravessa o vidro, incide sobre a placa de cobre ou alumínio pintadas de preto e a aquece. Esta placa por sua vez, está em contato com a serpentina de cobre por onde flui água vinda do reservatório térmico. Esta serpentina

recebe o calor da placa e o transmite para a água. A água volta para o reservatório e o ciclo se repete, elevando a temperatura da água armazenada até ser consumida ou deixar de ter radiação solar disponível. Durante o período de operação sem radiação (à noite), a água quente do tanque, pré aquece o ar de secagem na câmara de secagem (IMRE, 2015).



Fonte: Extraído de Gud Energy (2015)

Figura 2.7 – Coletor solar plano

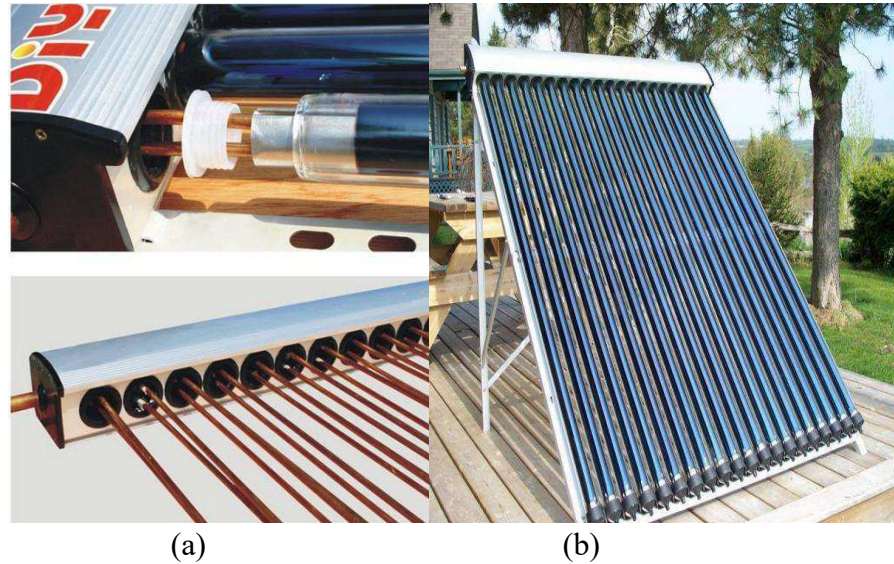
2.6.1.2 – Coletores de tubos a vácuo

Os aquecedores com coletores de tubos a vácuo são ainda pouco conhecidos no Brasil, porém são muito usados na China e Europa, por sua maior capacidade de permitir o aquecimento mesmo em dias nublados (radiação difusa), quando comparados com os coletores planos (GOERCK, 2008).

Nos coletores solares com tubos a vácuo tipo *fluid-in-metal*, o fluido a ser aquecido pela radiação solar circula em um tubo metálico inserido em um tubo de vidro, viabilizando a sua utilização em altas pressões e temperaturas. Entre eles, estão os tipos heat pipes e U-tube (LIANG, 2011).

O coletor com tubo a vácuo tipo U-tube (Figura 2.8) surgiu como uma alternativa com capacidade de suportar altas pressões, mantendo uma estrutura mais simples, quando comparado com os tipos all-glass e heat pipe. O U-tube é um tubo em forma de U onde circula o fluido de trabalho. Este tubo é soldado a uma fina lâmina de cobre de formato cilíndrico, a qual é encaixada dentro do tubo absorvedor interno. Assim, o calor vindo de todas as direções para o tubo absorvedor é conduzido para o U-

tube. Atualmente este tipo de coletor é muito mais utilizado que o tipo heat tube. Porém o gap de ar existente entre a lâmina de cobre e a parede do tubo absorvedor cria uma resistência térmica a ser considerada neste ponto, reduzindo a eficiência deste tipo coletor (LIANGDONG, 2010).



Fonte: <https://portuguese.alibaba.com>

Figura 2.8 – Estrutura interna do U-tube (a) e coletor a vácuo tipo U-tube (b)

Para reduzir esta perda, desenvolveu-se uma variante deste tipo de coletor, o filled type evacuated tube solar com tubo U. Nele a lâmina de cobre é eliminada, sendo a condução térmica entre o tubo absorvedor e o U-tube feita por um material de boa condutividade, como algum tipo de grafite, que preenche o espaço interno do tubo absorvedor.

2.6.2 – Reservatório térmico

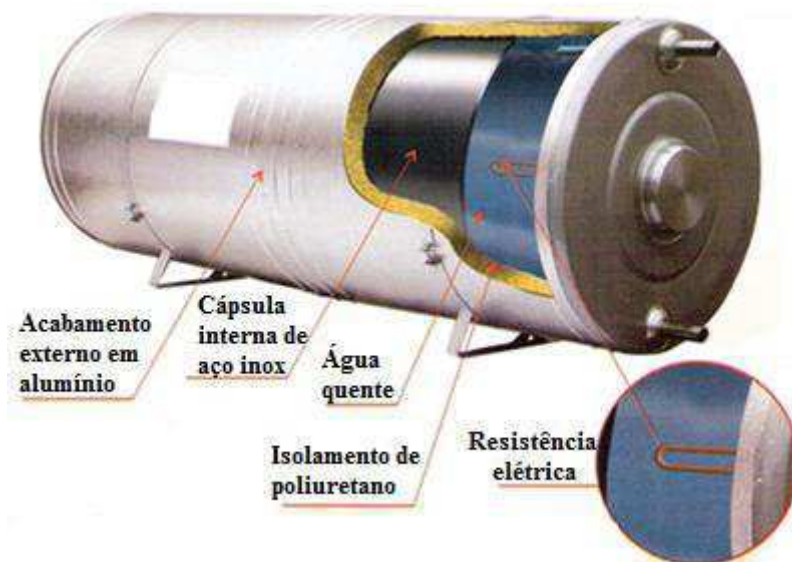
O reservatório térmico tem como função armazenar a água aquecida nos coletores evitando ao máximo a perda de calor para o meio externo. É constituído de um corpo interno em aço inoxidável que possui conexões também em aço inoxidável para entrada e saída de água. Um suporte do termostato de contato e fixação da resistência elétrica que permite uma manutenção facilitada, quando houver necessidade. É isolado termicamente com poliuretano expandido e possui uma capa externa de proteção em alumínio (Figura 2.9).

O reservatório térmico é feito para trabalhar em conjunto com o coletor solar. Portanto, o reservatório térmico não deverá ser utilizado sem estar acoplado aos

coletores devidamente dimensionados. A ação de uso do reservatório sem coletor solar acoplado acarreta não produção devida de água quente.

Os reservatórios térmicos para sistemas de aquecimento solar distinguem-se pela temperatura elevada que a água pode alcançar no seu interior, sendo fabricados preferencialmente de aço inoxidável, dotados de isolamento térmico visando a minimizar as perdas de calor para o meio ambiente (PRADO, 2007).

Budiharddjo (2009) avaliou as perdas num reservatório acoplado a um coletor de tubos a vácuo do tipo water-in-glass, obtendo um coeficiente de $1,6-1,8 \text{ W.K}^{-1}$. Segundo Duffie e Bachmann (2013), há um processo de estratificação da água dentro do reservatório, isto é, o seu topo é mais aquecido que a sua parte inferior.



Fonte: www.ourofino.com.br (2010)

Figura 2.9 – Vista interna e externa do reservatório térmico

2.7 – Eficiência do coletor solar

A demanda de energia do secador pode ser entendida como o aumento necessário da entalpia da água no coletor. Num sistema direto, a temperatura da água que entra no secador (T_i) é igual à temperatura da água que deixa o coletor ($T_o = T_i$) (IMRE, 2015). Dessa forma, o aumento necessário da entalpia da água no coletor, isto é, seu ganho de energia útil (Q_u), é dado pela Equação (2.4) conforme Kalogirou (2014):

$$Q_u = m C_p (T_o - T_i) \quad (2.4)$$

onde:

m - fluxo de massa de fluido (Kg/s) no coletor, que no caso é a água;

C_p - coeficiente térmico da água; e,

T_i - temperatura da água que entra no secador.

Uma medida de desempenho do coletor é a eficiência, e pode ser definida pela Equação (2.5) e (2.6) de acordo com Duffie e Breckman (2013):

$$\eta = \frac{\text{energia útil fornecida pelo coletor ao longo do tempo } t}{\text{energia solar incidente no coletor ao longo do tempo } t} \quad (2.5)$$

ou

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G_T dt} \quad (2.6)$$

onde:

A_c - área do coletor; e,

G_T - radiação solar absorvida por unidade de área.

Se as condições são constantes ao longo de um período de tempo, a eficiência é reduzida para a Equação (2.7):

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c} \quad (2.7)$$

A eficiência instantânea pode ser definida pela Equação (2.8) e (2.9) segundo Duffie e Breckman (2013):

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} = F_R (\tau \alpha) - \frac{F_R U_L (T_i - T_0)}{G_T} \quad (2.8)$$

$$\eta_i = \frac{m C_p (T_0 - T_i)}{A_c G_T} \quad (2.9)$$

onde:

F_R - fator de remoção de calor do coletor;

τ - transmitância;

α - absorvância; e,

U_L - coeficiente global de calor.

É comum a eficiência ser representada em diagramas (IMRE, 2015), como uma função, geralmente dada por: $\eta(T_0 - T_i)$.

2.8 – Sistema solar fotovoltaicos autônomo

Atualmente a energia solar fotovoltaica no Brasil é empregada principalmente em pequenos sistemas isolados ou autônomos instalados em locais não atendidos pela rede elétrica, em regiões de difícil acesso ou onde a instalação de linhas de distribuição de energia elétrica não é economicamente viável.

Sistemas fotovoltaicos autônomos são tradicionalmente usados na eletrificação de propriedades rurais, comunidades, bombeamento de água, centrais remotas de telecomunicações e sistemas de sinalização (VILLALVA, 2013)

Embora os sistemas autônomos de energia solar fotovoltaicos sejam uma importante alternativa para a geração de eletricidade em locais que não possuem rede elétrica, o uso de energia solar fotovoltaica em breve estará concentrado nos sistemas conectados à rede elétrica. O número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede vem aumentando no Brasil e sua utilização deverá ter um salto extraordinário nos próximos anos, principalmente com a recente aprovação pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

2.8.1 – Componentes básicos de um sistema fotovoltaico autônomo

Um sistema fotovoltaico é constituído por um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e, opcionalmente, um bloco de armazenamento (Figura 2.10). O bloco gerador contém os arranjos fotovoltaicos, constituídos por módulos fotovoltaicos em diferentes associações, o cabeamento elétrico que os interliga e a estrutura de suporte. O bloco de condicionamento de potência pode ter conversores c.c c.a, seguidor de ponto de potência máxima, inversores, controladores de carga e outros dispositivos de proteção, supervisão e controle. O bloco de armazenamento é constituído por acumuladores elétricos (baterias) e ou outras formas de armazenamento (VILLALVA, 2013).

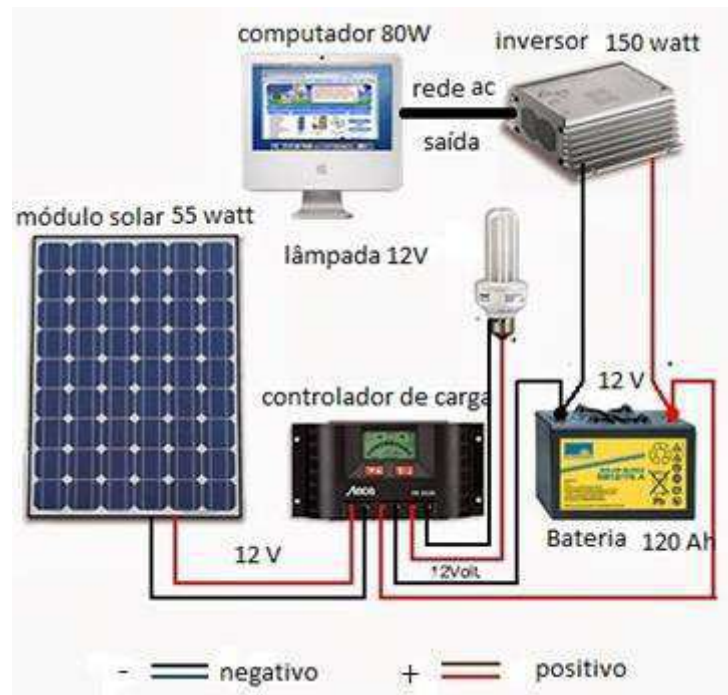


Figura 2.10 – Componentes de um sistema fotovoltaico autônomo

2.9 – Feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)

O feijão-caupi é uma planta dicotiledônea, pertencente à espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp (Figura 2.11), também conhecido como feijão de corda, feijão da colônia, massacar, manteiguinha dentre outros. Esta espécie possui uma grande variedade genética (FREIRE FILHO et al., 2011) e é originária do Oeste da África, mais precisamente Nigéria (STELLE; MEHRA, 1980). A introdução no Brasil se deu durante o tráfico de escravos, pelo estado da Bahia e posteriormente levado para outras áreas das regiões Norte e Nordeste (FREIRE FILHO, 1988).

Trata-se de uma leguminosa de ciclo curto que se adapta a diferentes condições de clima e solo apresentando baixa exigência hídrica e rusticidade para se desenvolver em solos de pouca fertilidade. Segundo Araújo e Watt (1988) o cultivo pode ser feito entre temperaturas de 18 a 34 °C, e com níveis de precipitação de 300 a 2000 mm/ano, sofrendo perdas em relação ao desenvolvimento e produtividade à medida que se afasta desses limites. Devido estas características o cultivo se dá tanto no clima seco do Nordeste como no clima úmido do Norte, sendo estas regiões as maiores produtoras do Brasil.



Figura 2.11 – Vagens e grãos de feijão-caupi

Segundo os dados da CONAB (2017) a safra 2016/17 no estado do Mato Grosso terá um balanço positivo para o feijão-caupi, cuja área plantada registrou aumento de 60%. A produtividade também aumentará, com rendimento médio em torno de 1200 kg/ha, desempenho 66,7% superior aos 720 kg/ha obtidos na safra anterior, que foi afetada pelos baixos índices pluviométricos que influenciaram significativamente o rendimento da lavoura. Assim, a estimativa da produção dessa leguminosa será 165,5% superior ao período 2015/16, passando de 2,9 mil toneladas para 7,7 mil toneladas.

O Brasil destaca-se como um dos principais países produtores de feijão-caupi. Contudo, sua participação no mercado mundial de feijão-caupi teve início em 2012 quando o país exportou 5644 toneladas de feijão-caupi como grãos (destinado ao consumo humano) para Índia e Egito e 30 toneladas de sementes (feijão destinado à semeadura) para a Bolívia (MIDIC, 2013; WANDER, 2013). Atualmente todo feijão exportado pelo Brasil é produzido no Mato Grosso.

O fato do Nordeste do Brasil ser um grande produtor de feijão-caupi, cuja elevada perecibilidade é responsável por perdas superiores a 25% na época de safra, tem levado os produtores a buscarem novos processos de conservação com vista a aumentar seu tempo de vida útil.

Como a maioria dos grãos e cereais, o feijão-caupi, após colhido necessita ser pré-processado, visando condicionar o produto para o armazenamento e para a comercialização. Neste sentido, Corrêa et al. (2007) salientam que o processo de secagem é o mais utilizado para garantir qualidade e estabilidade de grãos e sementes.

O estudo da cinética de secagem do feijão-caupi pode ser bastante útil para a otimização do processo. Do ponto de vista de processamento e engenharia, é interessante conhecer quão rápida é a perda de água e avaliar a adequação de diferentes equações para a descrição da cinética do processo (SANTOS; PRADO, 2010).

3 - MATERIAL E MÉTODOS

Nesta parte são apresentados os resultados dos testes experimentais das secagens realizadas pelos processos artificial e solar, tendo como objetivo avaliar a eficiência de cada processo. Foram realizados sete experimentos, nomeados como: Experimento 1 - Dimensionamento do sistema fotovoltaico; Experimento 2 - Secagem artificial; Experimento 3 - Secagem em secador ACSN; Experimento 4 - Secagem solar por exposição direta ao sol; Experimento 5 - Secagem em secador solar; Experimento 6 - Secagem solar por exposição ao sol/secador ACSN; e, Experimento 7 - Secagem ACSN/secador solar.

3.1 – Local da realização dos experimentos

Os ensaios foram realizados no Laboratório da Casa Ecoeficiente do SENAI, do Centro de Inovação e Tecnologia Industrial (CITI), no dia 22 de fevereiro à 26 de março de 2016, em Campina Grande, PB, com Coordenadas Geográficas 7° 13” Sul, 35° 53” Leste e altitude de 547,5 m.

3.2 – Projeto e construção de sistemas de secagem solar

3.2.1 – Secador solar

O secador solar de radiação direta foi construído no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

O secador solar de radiação direta (Figura 3.1) foi confeccionado em chapa zincada, revestido internamente com poliestireno expandido pintado na cor preta, tendo por cobertura um vidro plano com 4,0 mm de espessura, construído segundo DANTAS (2007). O secador tem formato quadrado, mede 71,0 cm de largura e 9,0 cm de profundidade. A coloração preta no interior do secador para uso diurno facilita a absorção da radiação solar (TUNDE-AKINTUNDE, 2011). O eixo longitudinal do coletor é posicionado para o norte de aproximadamente 17° sendo o valor recomendado referente à latitude local 7° somados mais 10°, para fornecer a inclinação que favorece maior incidência da radiação solar.

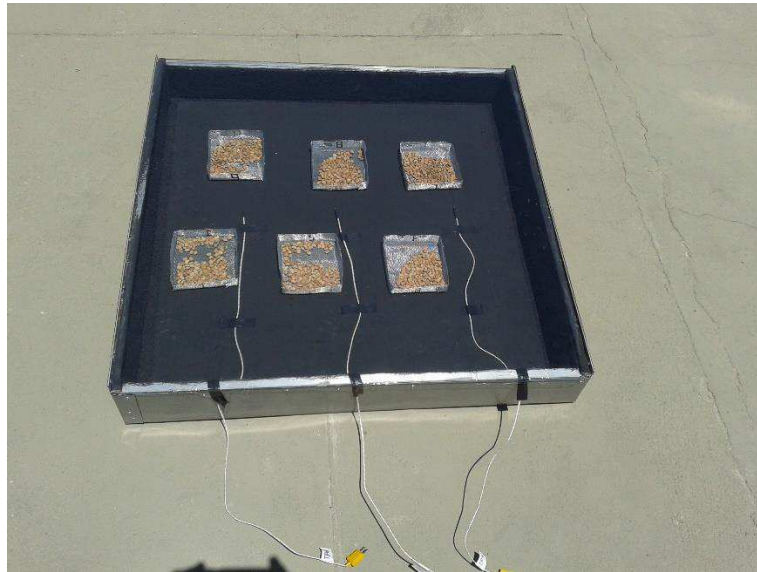


Figura 3.1 – Secador solar de radiação direta com amostras de feijão-caupi e termopares

3.2.2 - Secador acumulador de calor para secagem no período noturno (ACSN)

Para a secagem durante a noite das amostras de feijão-caupi, foi montado um equipamento, denominado neste trabalho como, Secador Acumulador de Calor para Secagem no Período Noturno (ACSN) mostrado na Figura 3.2. Este equipamento foi construído inicialmente por DANTAS (2007) e modificado no presente trabalho, acrescentando novos dispositivos como: Sistema fotovoltaico, coletores a vácuo, boiler, tubulações de água e bombas centrífugas tendo como objetivo aproveitar a energia solar para aquecer água durante o dia, utilizando coletores solares. O secador possui um reservatório termicamente isolado para armazenar a água aquecida durante o dia, e esta é utilizada à noite como fonte de calor para aquecer uma câmara de secagem. A água quente circula dentro da tubulação, passando pelo trocador de calor construído em tubo de cobre em formato de serpentina, localizado abaixo da bandeja contendo as amostras, na câmara de secagem. Para acelerar a circulação de água foi instalado um sistema de circulação forçada de água, usando uma bomba movida a energia fotovoltaica.



Figura 3.2 – Vista frontal (a) e vista posterior do Secador Acumulador de calor para secagem noturna (ACSN) (b)

3.2.2.1 – Descrição das partes do secador ACSN

3.2.2.1.1 – Coletores solares

Utilizaram-se dois coletores solares de tubos a vácuo de fluxo direto da marca EXXA SOLAR (20 tubos) e SOLTERM PU260 (10 tubos) (Figura 3.3). Em cada tubo a vácuo QB-AL-N/AL -58X1800 há um tubo U de cobre de 8 mm com fluxo direto sendo conectado no manifold de aço inoxidável SUS304 – 1805 mm. Este tubo U é envolvido por uma lâmina de alumínio dentro do tubo de vácuo de 58 mm que transmite o calor do interior do tubo de vácuo para o tubo U. A radiação solar penetra o tubo de vidro exterior e é capturada no lado interno do tubo de vidro interno por uma camada seletiva feita de uma liga de cobre metálico, aço inoxidável e nitreto de alumínio (Figura 3.4). A radiação solar capturada é transmitida por contato direto com uma lâmina de alumínio, na qual é transmitida para o tubo U de cobre. A lâmina de alumínio ao redor do tubo de vidro transfere toda energia mais rapidamente. Estes coletores trabalham com pressão de fluido de 0,6 MPa, temperatura máxima de trabalho de 95 °C e inclinação de 10 a 45°. Estes coletores a vácuo apresentam dimensões de (1,37 x 1,5 m) e (0,68 x 1,5 m), respectivamente.



Figura 3.3 – Coletores solares de tubos a vácuo tipo U-tube de vinte e dez tubos



Fonte: Extraído de <http://www.newhome.com.br>

Figura 3.4 – Camadas seletivas depositada internamente no tubo a vácuo

3.2.2.1.2 - Reservatório térmico

O reservatório térmico (boiler) mostrado na Figura 3.5, utilizado para armazenamento da água aquecida nos coletores é constituído de tanque interno de aço inox com capacidade de 200 L, tubos em latão com bitola de 1 polegada, resistente a pressão, isolamento térmico em poliuretano expandido e resistência elétrica no seu interior.

A alimentação de água fria do sistema é feita diretamente da rede de distribuição local, através de tubulação de polipropileno copolímero random (PPR).

Por ser o coletor não acoplado ao reservatório térmico, são utilizadas tubulações para a circulação de água quente. A entrada é feita por um tanque de reposição, dotado de boia de nível, que está montado sobre o reservatório térmico. A água deste tanque é conduzida por um tubo que desce até a parte inferior do boiler. A água quente aquecida nos tubos a vácuo do coletor é forçada a circular nos tubos de PPR dirigindo-se até a parte mais alta do boiler, por meio de uma bomba hidráulica.



Figura 3.5 – Reservatório térmico do secador solar

3.2.2.1.3 – Câmara de secagem

A câmara de secagem utilizada foi elaborada com chapa de zinco moldada em forma de chaminé. A câmara tem forma de coluna com seção quadrada, com isolamento térmico interno em poliestireno expandido com 30 mm de espessura. A coluna central possui dimensões de 0,5 m de altura, topo em tronco de pirâmide com 0,33 m de base e 0,26 m de altura. O interior da câmara tem lado de 0,33 m e suporte para bandeja (local onde as amostras são distribuídas), em tela de alumínio. Possui ainda 0,13 m de elevação em relação ao solo, tronco de pirâmide no topo provido de abertura de 0,3 m de lado para a saída do ar de secagem e trocador de calor elaborado em serpentina de tubo de cobre com diâmetro interno de $\frac{3}{4}$ de polegada, logo abaixo do local para instalação da bandeja, em que a água quente circula e fornece calor para o processo de secagem (Figura 3.6). A secagem foi realizada pelo aquecimento do ar por convecção natural.

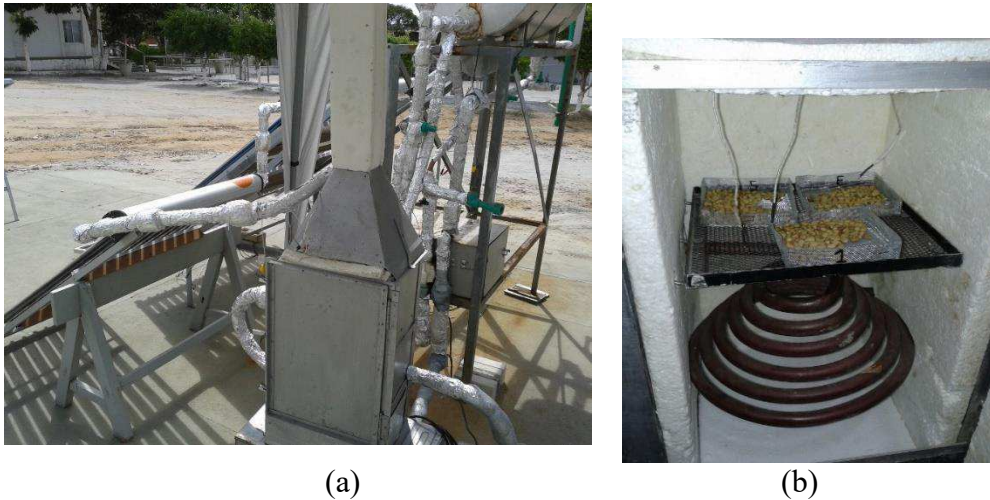


Figura 3.6 – Vista externa da câmara de secagem (a) e vista interna da câmara de secagem (b)

3.2.2.1.4 – Sistema de bombeamento – circulação forçada

O secador solar utilizou-se de duas bombas centrífugas idênticas, alimentadas com tensão contínua, gerada pelos painéis fotovoltaicos. Uma bomba (1) com válvula de retenção foi colocada no sistema entre a saída inferior de água fria do boiler e a entrada do coletor de tubos a vácuo com o objetivo de forçar a circulação da água durante o dia para aquecê-la. A outra bomba (2) centrífuga com válvula de retenção foi utilizada durante a noite com o objetivo de forçar a circulação de água quente da saída superior do reservatório térmico para a câmara de secagem (Figura 3.7). Estas bombas apresentam as seguintes características: temperatura de operação de até 100 °C, baixo ruído, tensão nominal de 12/24V, capacidade de 10 L/min, vida útil de 20.000 h e dimensões de (9 x 5 x 7 cm)



Figura 3.7 – Bombas centrífugas (a) e imagem detalhada da bomba centrífuga (b)

3.2.2.1.5 – Medição das temperaturas

As temperaturas foram medidas no secador ACSN utilizando-se seis termopares tipo k e um medidor de temperatura digital (HM – 2030).

As temperaturas de água e ar no sistema foram monitoradas em 6 pontos: na entrada de água fria do coletor a vácuo, na saída de água quente do coletor a vácuo, na entrada de água quente da câmara de secagem, na saída de água quente da câmara de secagem, no interior da câmara de secagem e no meio externo (temperatura ambiente).

As Figuras 3.8 e 3.9 mostram a localização dos sensores de temperatura no secador solar ACSN.



Figura 3.8 – Localização dos sensores de temperatura no secador ACSN: 1 – Sensor de saída de água quente do coletor a vácuo; 2 – Sensor de entrada de água quente da câmara de secagem; 3 – Sensor de entrada de água fria do coletor a vácuo; 4 – Sensor de saída de água quente da câmara de secagem; e, 5 - Sensor de temperatura no interior da câmara de secagem

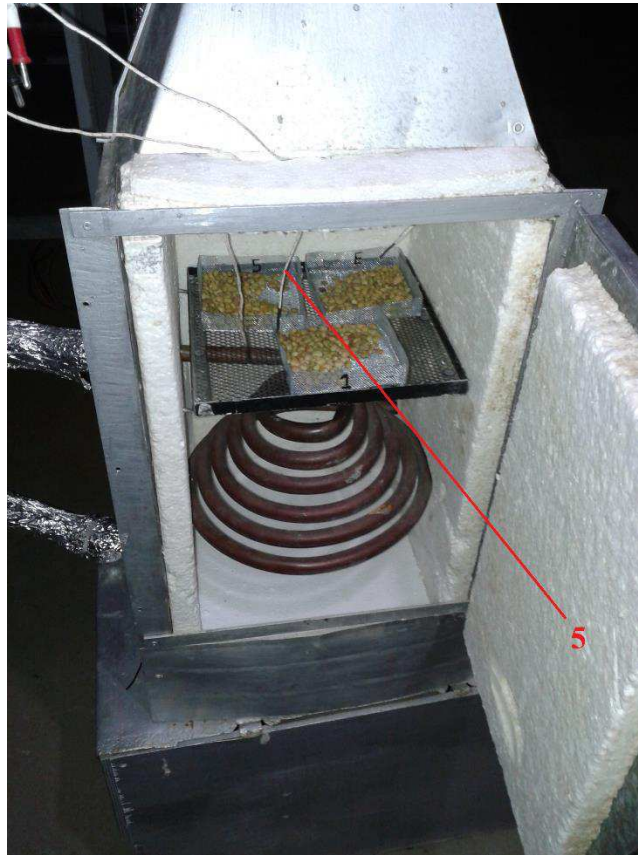


Figura 3.9 – Localização do sensor de temperatura no interior da câmara de secagem

Os valores de temperatura do ar e da água podem ser plotados em gráficos que permitem observar a variação da temperatura medida por cada termopar, ao longo de um dia de experimento.

A aferição da medição da umidade relativa do ar ambiente e na câmara de secagem foi realizada com uso de um termo-higrômetro (ICEL, modelo HT7050).

3.2.2.1.6 – Montagem e funcionamento do secador solar ACSN

O secador ACSN foi montado com os componentes descritos nos itens 3.2.2.1.1 ao 3.2.2.1.5 de maneira que a água circulasse em dois circuitos independentes.

Os coletores solares tiveram uma orientação voltada para o norte com uma variação de 30° para leste e um ângulo de inclinação de 17°.

Durante o dia a água teve circulação restrita ao circuito coletores/reservatório térmico. Para prosseguimento com as secagens durante a noite, a circulação neste circuito foi interrompida, sendo então liberada a circulação no circuito reservatório/câmara de secagem.

Na circulação diurna, a circulação da água entre os coletores e o reservatório foi realizada utilizando uma bomba centrífuga alimentada por painéis fotovoltaicos, onde a água aquecida nos coletores percorre a tubulação PPR desde a saída superior do coletor até a entrada do reservatório, localizada na posição mais alta de todo o circuito. A água dentro do reservatório, com o passar do tempo, fica com temperatura uniforme devido a circulação forçada promovida pela bomba d'água.

Durante a noite este circuito hidráulico é fechado e a segunda bomba centrífuga é acionada, conduzindo a água do reservatório térmico até a câmara de secagem.

Esta bomba é movida por bateria estacionária alimentada pelos painéis fotovoltaicos durante o dia.

3.3 – Sistema fotovoltaico isolado com armazenamento e ligado à carga em corrente contínua.

Este sistema contém os painéis fotovoltaicos, Wurth Elektronik, WSB31042, tamanho de 31 x 114 cm e potência máxima de 50 W, um controlador de carga; Epsolar Landstar, LS0512, uma unidade de armazenamento (bateria estacionária), Heliar, modelo DF 500 e uma carga em corrente contínua (bomba centrífuga), Javtop, modelo JT 800 (Figura 3.10).

O sistema fotovoltaico foi projetado para energizar duas bombas centrífugas, uma de uso diurno e a outra de uso noturno. A alimentação da bomba centrífuga de uso diurno fez-se diretamente dos painéis fotovoltaicos das 6:00 até às 16:30 h, enquanto a alimentação da bomba de uso noturno fez-se usando uma bateria estacionária das 16:30 até 8 h do dia seguinte. Este sistema fotovoltaico teve como objetivo tornar o secador solar totalmente autônomo quanto ao suprimento da energia elétrica.

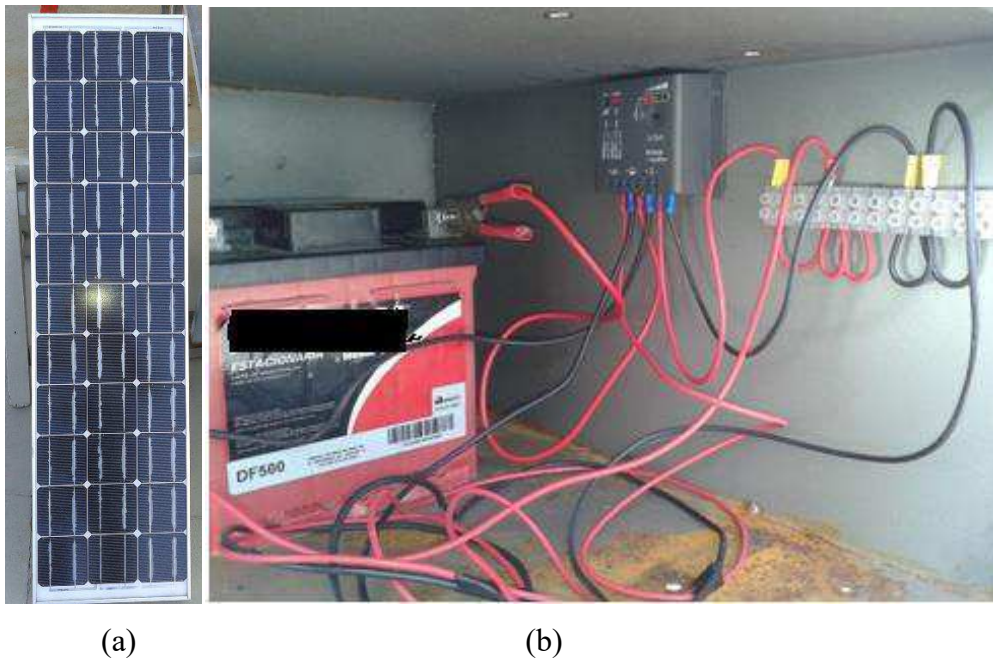


Figura 3.10 – Painel fotovoltaico (a) e bateria estacionária com controlador de carga (b)

Na Tabela 3.1, mostra-se os valores de tensão e corrente dos componentes deste sistema.

Tabela 3.1 – Características técnicas de tensão e corrente dos componentes do sistema fotovoltaico

	Painel fotovoltaico	Controlador de carga	Bateria estacionária	Bomba de água
Tensão (V)	16,1	12,0	12,0	12,0
Corrente (A)	3,1	5,0	40,0	1,0

Fonte: Dados dos fabricantes

3.3.1 – Dimensionamento do sistema fotovoltaico

O primeiro passo para o dimensionamento do sistema fotovoltaico foi o levantamento do consumo de energia elétrica. O cálculo da energia necessária para a alimentação da bomba centrífuga foi calculado pela potência da bomba e pelo número de horas em que ela é utilizada (VILLALVA, 2013).

A energia elétrica consumida pela bomba é calculada pela Equação (3.1):

$$E_c = P \times T \tag{3.1}$$

sendo:

E_c - Energia consumida em watts-hora, Wh;

P - Potência em watts, W; e,

T - Tempo de uso, h.

O cálculo da energia produzida pelos painéis fotovoltaicos diariamente foram obtidos pela Equação (3.2):

$$E_p = P_M \times H_s \quad (3.2)$$

sendo:

E_p - Energia produzida pelo módulo diariamente, Wh;

P_M - Potência do painel, W; e,

H_s - Horas diárias de radiação, h.

A potência do painel é calculada pela Equação (3.3):

$$P_M = I_{SC} \times V_{BAT} \quad (3.3)$$

sendo:

P_M - Potência do painel, W;

I_{SC} - Corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico, A; e,

V_{BAT} - Tensão da bateria ou do banco de baterias, V.

O dimensionamento do banco de baterias empregado no sistema fotovoltaico levou em consideração os seguintes aspectos:

- Quantidade de energia necessária para o consumo diário;
- Período durante o qual o banco de baterias deve ser capaz de alimentar o consumo; e,
- Profundidade de descarga permitida para as baterias.

A capacidade do banco de baterias foi determinada pela Equação (3.4):

$$C_{BANCO} = E_A / V_{BANCO} \quad (3.4)$$

sendo:

C_{BANCO} - Capacidade de carga do banco de baterias em ampère-hora, Ah;

E_A - Energia armazenada no banco de baterias, Wh; e,

V_{BANCO} - Tensão do banco de baterias, V.

A energia armazenada foi calculada pela Equação (3.5):

$$E_A = E_C / P_D \quad (3.5)$$

sendo:

E_A - Energia armazenada no banco de baterias, Wh;

E_C - Energia consumida, Wh; e,

P_D - Profundidade de descarga permitida (20, 50, 80%, entre outros).

A especificação do controlador de carga levou em conta dois parâmetros, sendo estes a tensão de operação e a corrente elétrica máxima fornecida pelos painéis fotovoltaicos. A corrente máxima fornecida por cada painel foi a corrente de curto-circuito. O conjunto de dois painéis em paralelo resultou numa corrente elétrica máxima do controlador de carga que foi calculada pela Equação (3.6):

$$I_{MAX} = N_p \times I_{SC} \times F \quad (3.6)$$

sendo:

I_{MAX} - Corrente elétrica máxima do painel fotovoltaico, A;

N_p - Número de painéis fotovoltaicos em paralelo, adimensional;

I_{SC} - Corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico, A; e,

F - Fator de segurança de 30%, adimensional.

3.4 – Medição da radiação solar

A medição da radiação solar incidente, e consequentemente da potência solar por unidade de área (W/m^2), no local da pesquisa, foi feita pela estação meteorológica DATALOGGER HOBO U30 GSM da Casa Ecoeficiente do SENAI, do Centro de Inovação e Tecnologia Industrial (CITI), em Campina Grande, PB.

Tendo os dados da radiação solar incidente para cada instante obtidos na estação solarimétrica é possível plotar gráficos, como se mostra na Figura 3.11, no qual observa-se variação dessa irradiação instantânea em função do tempo.

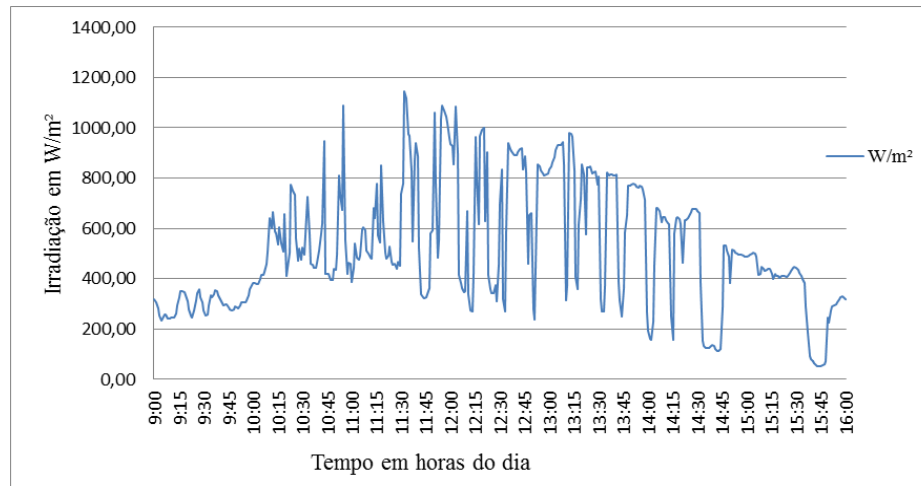


Figura 3.11 – Variação da radiação solar incidente instantânea em função do tempo

Para obtenção da radiação solar média, calculada como determina a Equação (3.7), observou-se os dados plotados na Figura 3.12. A vantagem desse tipo de gráfico foi que ele permitiu observar a variação, a cada hora, ao longo do dia mostrando claramente a interferência de nuvens e de outros fenômenos climáticos que acabam se refletindo na variação de temperatura do ar de secagem.

$$\overline{Rad} = \frac{\sum Rad}{n} \quad (3.7)$$

sendo:

\overline{Rad} - radiação solar média, W/m²;

Rad - radiação solar verificada, W/m²; e,

n - número de verificações, adimensional.

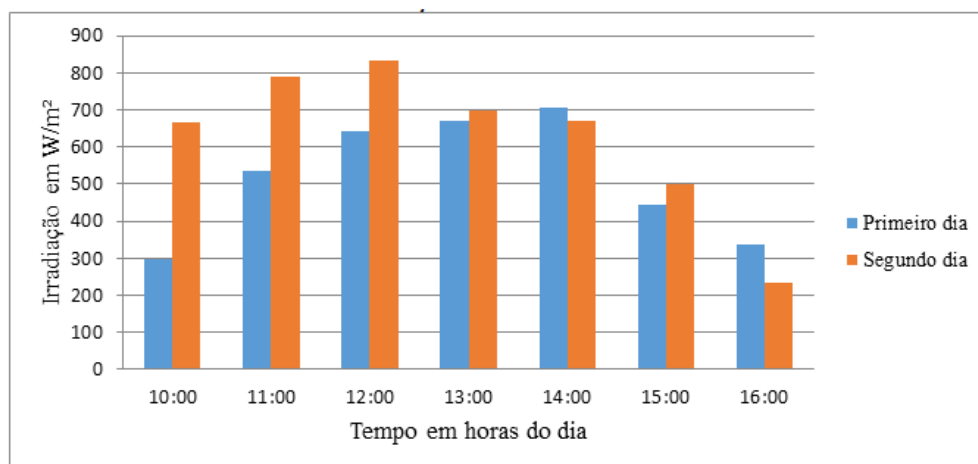


Figura 3.12 - Intensidade média de radiação solar

3.5 – Matéria-prima

Para realização desta pesquisa, foram utilizados grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) mostrados na Figura 3.13, cultivados no município de Campina Grande, PB, safra do ano de 2016.



Figura 3.13 – Amostras de feijão-caupi

3.5.1 – Processamento dos grãos de feijão-caupi

Os grãos de feijão-caupi foram processados conforme o fluxograma da Figura 3.14 e com as etapas descritas a seguir:

- **Recepção:** Os grãos de feijão-caupi, foram comprados em feira livre e levados ao Laboratório da Casa Ecoeficiente do SENAI;
- **Seleção:** Foram removidas manualmente sujidades como talos, pedaços de casca e folhas;
- **Pesagem:** Os grãos foram pesados em balança com precisão de 0,01g;
- **Fracionamento:** Os grãos foram fracionados em sacos de polietileno, em quantidades de aproximadamente 100g e em seguida retirado o ar das embalagens com o auxílio de uma bomba de vácuo; e,
- **Armazenamento:** A matéria-prima foi armazenada em freezer horizontal a temperatura de -18 °C onde permaneceram até o momento da realização dos ensaios, visando à preservação de suas características para realização do estudo.

Na realização dos ensaios, o teor de água inicial foi determinado em triplicata, com estufa à temperatura de 105 ± 3 °C por 24 h (IAL, 2008).

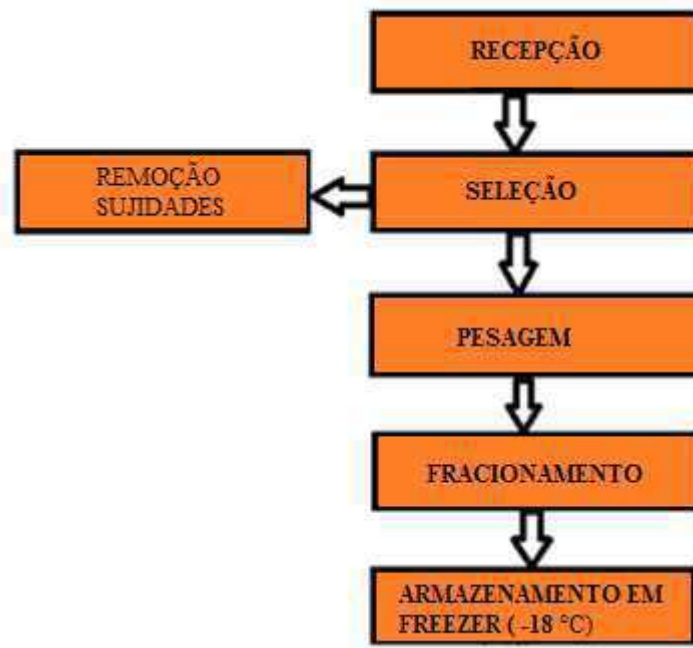


Figura 3.14 – Fluxograma do processamento dos grãos de feijão-caupi

3.6 – Secagem

As amostras de feijão-caupi foram submetidas a diferentes processos de secagem, utilizando-se estufa convencional, marca Nova Técnica, modelo NT 513, com circulação de ar por convecção natural e secagem por energia solar utilizando 5 técnicas distintas.

3.6.1 – Secagem artificial (convencional)

As amostras de feijão-caupi foram secas em camada fina, em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.

As amostras foram pesadas em balança, marca LARK, modelo LP 502B, com precisão de 0,01 g. Os experimentos foram realizados com 3 repetições, de forma que cada reiteração foi constituída de aproximadamente 50 g de amostra, fracionadas em cestas montadas com tela de arame (11 x 11 x 2 cm).

Para determinação das cinéticas de secagem, as amostras de feijão-caupi foram pesadas e conduzidas à secagem artificial, onde as perdas de água dos grãos foram acompanhadas até os resultados da pesagem dos grãos se repetissem, com pesagens das amostras em tempos regulares de 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240 e 360 min. Quando as

amostras atingiram massas constantes, verificados através da diferença entre pesagens sucessivas, foi determinado o teor de água final em estufa.

3.6.2 – Secagem com energia solar

Os procedimentos antes do início das secagens por meio de energia solar foram os mesmos para as secagens convencionais.

Para determinação das cinéticas de secagem, as amostras de feijão-caupi foram pesadas e conduzidas a secagem solar por diferentes métodos, nas quais as perdas de água dos grãos foram acompanhadas até a massa dos grãos se repetir entre determinações sucessivas, com pesagens em intervalos de 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 240 e 360 min. Quando as amostras atingiram massas constantes, foi determinado o teor de água das mesmas, a fim de calcular o teor de água final.

As amostras de feijão-caupi foram secas em camada fina, utilizando-se energia solar de cinco formas:

- Secagem em secador ACSN no período noturno sempre acompanhada de uma testemunha deixada à noite em bancada do laboratório;
- Secagem por exposição direta ao sol;
- Secagem em secador solar durante o dia;
- Secagem por exposição direta ao sol durante o dia, combinada com secagem no período noturno no secador ACSN mais testemunha; e,
- Secagem em secador ACSN durante a noite combinada com secagem em secador solar durante o dia mais a testemunha.

3.6.2.1 - Secagem em secador ACSN acompanhada por secagem de amostras colocadas à noite em bancada do laboratório (testemunha)

A secagem das amostras de feijão-caupi era iniciada aproximadamente às 16:30 h, em secador ACSN com três amostras dispostas em bandejas no interior da câmara de secagem. Durante o processo de secagem no secador ACSN, foram monitoradas as temperaturas e umidades relativas no interior da câmara de secagem e no ambiente externo com uso de termopares e higrômetro. Este processo era realizado até às 08:00 h do dia seguinte.

Outras três amostras foram transferidas para a bancada do laboratório, onde permanecia durante a noite exposta às condições de temperatura e umidade relativa do ambiente, a fim de servir de testemunha em relação as três primeiras amostras, que foi

colocada no secador ACSN. Estas amostras foram pesadas das 16:30 até às 08:00 h do dia seguinte, no intervalo de meia em meia hora.

3.6.2.2 – Secagem por exposição direta ao sol

A secagem das amostras de feijão-caupi iniciou-se aproximadamente às 08:00 até às 16:30 h e foram secas até as amostras atingirem pesos constantes ou o equilíbrio, pesadas através de balança de precisão em intervalos de tempos regulares. As amostras dispostas em bandejas foram cobertas por uma tela de tecido para proteção contra contaminações e colocadas em base de concreto recoberta com lona plástica (polietileno) preta exposta ao sol. Durante o processo de secagem as temperaturas foram monitoradas no interior da lona plástica e do ambiente com uso de termopares. Também foi medida a umidade relativa do ambiente com uso de higrômetro (Figura 3.15).



Figura 3.15 – Secagem das amostras de feijão-caupi por exposição direta ao sol

3.6.2.3 - Secagem em secador solar no período diurno

A secagem das amostras de feijão-caupi tiveram início aproximadamente às 08:00 h, em secador solar, sendo as amostras dispostas em bandejas no interior do secador. Durante o processo de secagem as temperaturas foram monitoradas no interior do secador e do ambiente com uso de termopares. Foi medida também a umidade relativa do ambiente e do interior do secador com uso de higrômetro. O processo terminava às 16:30 h.

3.6.2.4 – Secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem no período noturno no secador ACSN e acompanhada com secagem de amostras colocadas à noite em bancada do laboratório (testemunha)

A secagem das três amostras de feijão-caupi foi realizada de acordo com o item 3.6.2.2. A partir das 16:30 h, as amostras eram colocadas no secador ACSN, com acompanhamento da perda de água, até as 08:00 h do dia seguinte, quando as amostras voltaram para exposição direta ao sol até as 16:30 h, retornando posteriormente ao secador ACSN. Este ciclo foi repetido até as amostras atingirem peso constante. Durante o processo de secagem no secador ACSN, foram monitoradas as temperaturas e umidades relativas no interior da câmara de secagem e ambiente com uso de termopares e higrômetro (SANTOS, 2012). As testemunhas do secador ACSN foram constituídas de três amostras de feijão-caupi, transferidas para a bancada do laboratório, monitoradas e permanecendo durante a noite expostas às condições de temperatura e umidade relativa do ambiente, permanecendo até às 08:00 h do dia seguinte, retornando a partir desse horário para exposição direta ao sol até aproximadamente às 16:30 h.

3.6.2.5 – Secagem em secador ACSN durante a noite combinada com secagem em secador solar durante o dia e acompanhada com secagem de amostras colocadas à noite em bancada de laboratório (testemunha)

A secagem das três amostras de feijão-caupi iniciou-se aproximadamente às 16:30 h, em secador ACSN com amostras dispostas em bandejas no interior da câmara de secagem. A partir de aproximadamente 08:00 h do dia seguinte às amostras foram colocadas no secador solar e efetuado o acompanhamento da perda de água até os pesos das amostras se apresentarem constantes.

Outras três amostras de feijão-caupi foram postas na bancada do laboratório às 16:30 h, onde permaneciam durante a noite expostas às condições de temperatura e umidade relativa do ambiente, a fim de servir de testemunha em relação as amostras, e colocadas no secador ACSN, permanecendo até as 08:00 h do dia seguinte, sendo direcionadas a partir desse horário para secagem em secador solar.

3.7 – Determinação da razão do teor de água e taxa de secagem

As razões do teor de água e as curvas de razão do teor de água em função do tempo de secagem foram calculadas e construídas a partir dos dados de perda de massa

das amostras durante as secagens e dos teores de água determinados no final das mesmas. No cálculo da razão do teor de água foi utilizada a Equação (3.8).

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (3.8)$$

onde:

RX - razão do teor de água do produto (adimensional);

X - teor de água do produto;

X_i - teor de água inicial do produto; e,

X_e - teor de água de equilíbrio do produto.

A avaliação do processo de secagem obtido experimentalmente foi realizada ajustando-se os valores experimentais com os modelos matemáticos apresentados na Tabela 3.2, descritos na literatura, utilizando-se o programa computacional Statistica 7.0 por meio de análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, para as amostras secas em estufa e com energia solar (SANTOS, 2012).

Tabela 3.2 – Modelos matemáticos ajustados às curvas de secagem dos grãos de feijão-caupi

Designação do modelo	Equação
Aproximação da difusão	$RX = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k b t)$
Page	$RX = \exp(-k t^n)$
Verna	$RX = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k_1 t)$
Logarítmico	$RX = a \exp(-k t) + c$
Dois termos	$RX = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-k t)$
Lewis	$RX = \exp(-k t)$
Thompson	$RX = \exp(-a (a^2 + 4 b t)^{0,5} / 2 b)$
Exponencial de dois termos	$RX = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k a t)$
Midilli	$RX = a \exp(-k t^n) + b t$

t - Tempo de secagem, min; k, k₀ e k₁ - Coeficientes dos modelos, min⁻¹; e a, b, c e n - Coeficientes dos modelos, adimensionais

Na avaliação da qualidade do ajuste dos modelos aos dados experimentais foram utilizados como critério a análise do coeficiente de determinação (R^2), o teste do qui-quadrado (χ^2) e o desvio quadrático médio (DQM), de acordo com as Equações (3.9) e (3.10).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (RX_{Pred} - RX_{exp})^2}{GLR} \quad (3.9)$$

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum (RX_{Pred} - RX_{exp})^2}{n}} \quad (3.10)$$

em que:

χ^2 - qui-quadrado;

RX_{pred} - razão do teor de água predito pelo modelo;

RX_{exp} - razão do teor de água experimental;

n - número de observações experimentais;

GLR - graus de liberdade do modelo (número de observações experimentais menos o número de coeficientes do modelo); e,

DQM - desvio quadrático médio.

A taxa de secagem de água do produto foi determinada pela Equação (3.11), a qual, segundo Corrêa et al. (2001), refere-se a quantidade de água que determinado produto perde por unidade de matéria seca por unidade de tempo.

$$\text{Taxa de secagem} = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X_{n+1} - X_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (3.11)$$

sendo,

Taxa de secagem - g de água/g de massa seca. min;

X_{n+1} - teor de água final, (g de água/g de matéria seca);

X_n - teor de água inicial, (g de água/g de matéria seca);

t_{n+1} - tempo de secagem final, min; e,

t_n - tempo de secagem inicial, min.

Com a coleta dos dados realizada, os parâmetros necessários à determinação das curvas e taxas de secagem (razão do teor de água e tempo) foram calculados por meio do *software Microsoft Excel* versão 2010.

3.8 – Determinação do coeficiente de difusão efetivo

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, descrito pela Equação (3.12) aos dados experimentais das secagens das amostras de feijão-caupi, com aproximação de oito termos, a partir do qual se observou que o valor de D_{ef} não variava. Essa equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica do produto como esférica, desconsiderando a contração volumétrica dos grãos e considerando a condição de contorno de teor de água conhecida na superfície do grão, com a premissa de que o mecanismo de transporte da água no interior do produto ocorre por meio da difusão de água líquida vaporizada (MORAIS et al., 2013; CAMICIA et al., 2015).

$$R_x = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n_t=1}^8 \frac{1}{n_t^2} \exp\left[-\frac{n_t^2 \cdot \pi^2 \cdot D_i \cdot t}{R_e^2}\right] \quad (3.12)$$

em que:

D_i - coeficiente de difusão efetivo, m^2/s ;

R_e - raio equivalente, m ;

n_t - número de termos; e,

t - tempo, s .

O raio equivalente (R_e), utilizado no modelo da difusão efetivo, é definido como o raio de uma esfera cujo volume é igual ao do grão, sendo determinado por meio da medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura) com auxílio de um paquímetro digital (precisão de 0,01 mm). O volume de cada grão (V), descrito pela Equação (3.13), considerado como um esferoide triaxial, foi obtido utilizando-se a seguinte expressão (REIS, 2011; COSTA et al., 2011):

$$V = \pi (a \cdot b \cdot c) / 6 = 4\pi r^3 / 3 \quad (3.13)$$

em que:

V - volume do grão, mm^3 ;

a - maior eixo do grão (comprimento), mm ;

b - eixo médio do grão (largura), mm ; e,

c - menor eixo do grão (espessura), mm .

A variação do coeficiente de difusão, de acordo com a temperatura de secagem, foi analisado utilizando a relação de Arrhenius, Equação (3.14).

$$D_i = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT_a}\right) \quad (3.14)$$

em que:

D_0 – constante pré-exponencial, m^2/s ;

E_a - energia de ativação, $kJ mol^{-1}$;

R - constante universal dos gases, $8,314 Jmol^{-1} K^{-1}$; e,

T_a - temperatura absoluta, K.

Para o cálculo de difusão efetivo utilizou-se o programa computacional Prescribed Adsorption-Desorption 2.2 para a lei de Fick com o raio equivalente do grão de feijão-caupi de 0,0036 m.

3.9 – Propriedades termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas relacionadas ao processo de secagem das sementes de feijão-caupi, representadas pela entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, foram determinadas pelo método proposto por Jideani e Mpotokwana (2009), conforme as Equações (3.15), (3.16) e (3.17), respectivamente.

$$\Delta h = E_a - R \cdot T_a \quad (3.15)$$

$$\Delta s = R \left(\ln D_0 - \ln \frac{k_B}{k_p} - \ln T_a \right) \quad (3.16)$$

$$\Delta G = \Delta h - T_a \cdot \Delta s \quad (3.17)$$

em que:

Δh - entalpia específica, $J mol^{-1}$;

Δs - entropia específica, $J mol^{-1} K^{-1}$;

ΔG - energia livre de Gibbs, $J mol^{-1}$;

k_B - constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} JK^{-1}$; e

k_p - constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} J s^{-1}$.

3.10 – Cálculo da eficiência térmica do coletor solar de tubos a vácuo

A eficiência do coletor solar com o reservatório térmico (boiler) interligado foi calculada a partir de valores obtidos entre às 08:00 e 16:30 h do dia.

Os valores de temperatura na entrada de água fria e dentro do reservatório térmico em conjunto com a massa de água do reservatório térmico, foram utilizados para determinar a energia térmica necessária à água para a alteração da sua temperatura, com a Equação (3.18), (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$Q = m.C_p (T_{\text{maior}} - T_{\text{menor}}) \quad (3.18)$$

onde:

Q - energia térmica, Wh;

m - massa de água do reservatório térmico, kg;

C_p - coeficiente térmico da água, 1,628 Wh/kg °C;

T_{maior} - temperatura máxima do reservatório no final do período, °C; e,

T_{menor} - temperatura mínima do reservatório no início do período, °C.

Os valores da radiação solar incidente no coletor foram totalizados hora a hora, para serem convertidos no total de energia fornecida ao coletor. Assim, a eficiência do coletor foi calculada pela Equação (3.19).

$$\eta = \frac{Q}{A_c \cdot \Sigma S \cdot R_b} \times 100 \quad (3.19)$$

onde:

η - eficiência do coletor, %;

A_c - área do coletor solar, m²;

ΣS - somatório da radiação solar incidente, W/m²; e,

R_b - fator de inclinação do coletor indicado pelo fabricante, 0,96; adimensional.

Como a superfície do coletor solar tem inclinação de 17 °, os valores de radiação foram corrigidos pelo fator R_b, calculados pela Equação (3.20) (PRADO, 2007).

$$R_b = (\cos\theta)/(\cos\theta_z) \quad (3.20)$$

onde:

R_b - fator de inclinação;

θ - ângulo de incidência, igual ao ângulo de inclinação do coletor; e,

θ_z - ângulo zenital, entre direção da radiação direta medida e o zênite, igual a 0°.

A área do coletor foi calculada conforme a Equação (3.21):

$$A_c = N \times D \times L \quad (3.21)$$

em que:

A_c - área do coletor, m²;

N - número de tubos do coletor, 30;

D - diâmetro do tubo interno, 0,008 m; e,

L - comprimento da superfície absorvedora do tubo interno, 1,5 m.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e a discussão dos testes experimentais: dimensionamento do sistema fotovoltaico (Experimento 1); secagem convencional (Experimento 2); secagem em secador ACSN (Experimento 3); secagem solar por exposição direta (Experimento 4); secagem em secador solar (Experimento 5); secagem solar por exposição direta /Secador ACSN (Experimento 6); e secagem em secador ACSN/Secador solar (Experimento 7).

Para cada experimento realizado, foram apresentados os valores obtidos da variação de massa do produto, variação da temperatura, umidade do ar de secagem, medidos a cada meia hora. A partir desses valores obtidos, são calculados e apresentados os demais parâmetros necessários à construção das respectivas curvas de secagem.

4.1 – Dimensionamento do sistema fotovoltaico (Experimento 1)

Na Tabela 4.1, observam-se os valores calculados da energia elétrica consumida pelas bombas centrífugas, energia produzida pelos painéis fotovoltaicos, potência do painel fotovoltaico, capacidade do banco de baterias, energia armazenada no banco de baterias e corrente elétrica máxima do painel fotovoltaico. Com estes parâmetros calculados, dimensionou-se o sistema autônomo fotovoltaico com dois painéis fotovoltaicos de 50 W, 1 bateria estacionária de 40 Ah e um controlador de carga de 5 A, suprimindo as necessidades para o funcionamento autônomo do sistema fotovoltaico.

Tabela 4.1 – Valores calculados dos parâmetros de energia para o dimensionamento do sistema fotovoltaico

E_c (Wh)	E_p (Wh)	P_M (W)	C_{BANCO} (Ah)	E_A (Wh)	I_{MAX} (A)
288	518,4	43,2	48	576	2,16

E_c - Energia consumida; E_p - Energia produzida pelo módulo; P_M - Potência do painel; C_{BANCO} - Capacidade do banco de baterias; E_A - Energia armazenada no banco de baterias; I_{MAX} - Corrente elétrica máxima do painel

4.2 – Secagem em estufa (Experimento 2)

Na Figura 4.1 apresenta-se os dados experimentais da cinética de secagem do feijão-caupi nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, expressos através da razão do teor de água em função do tempo de secagem.

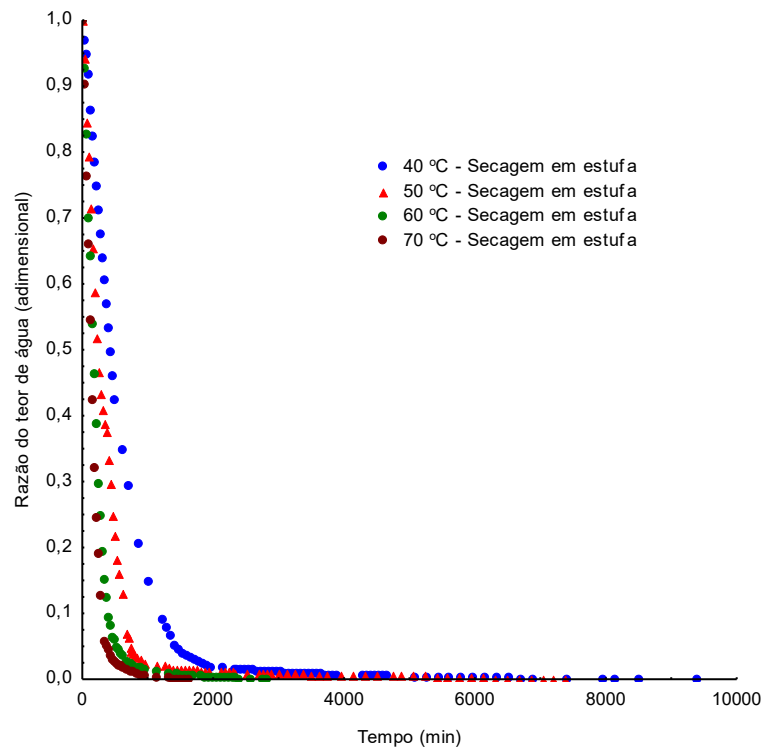


Figura 4.1 – Curvas de cinética de secagem na estufa de feijão-caupi em diferentes temperaturas

Verificou-se que o tempo de secagem diminuiu com o aumento da temperatura, evidenciando aumento na taxa de remoção de água do grão. Os tempos necessários para que as amostras de feijão-caupi atingissem as massas constantes desejadas, verificados através da diferença entre pesagens sucessivas foram de 156,5 h (9390 min) na temperatura de 40 °C, 123,00 h (7380 min) na temperatura de 50 °C, 47 h (2820 min) na temperatura de 60 °C e 27 h (1620 min) na temperatura de 70 °C. O teor de água médio inicial foi de 64,22 % b.u. (1,7948 b.s.).

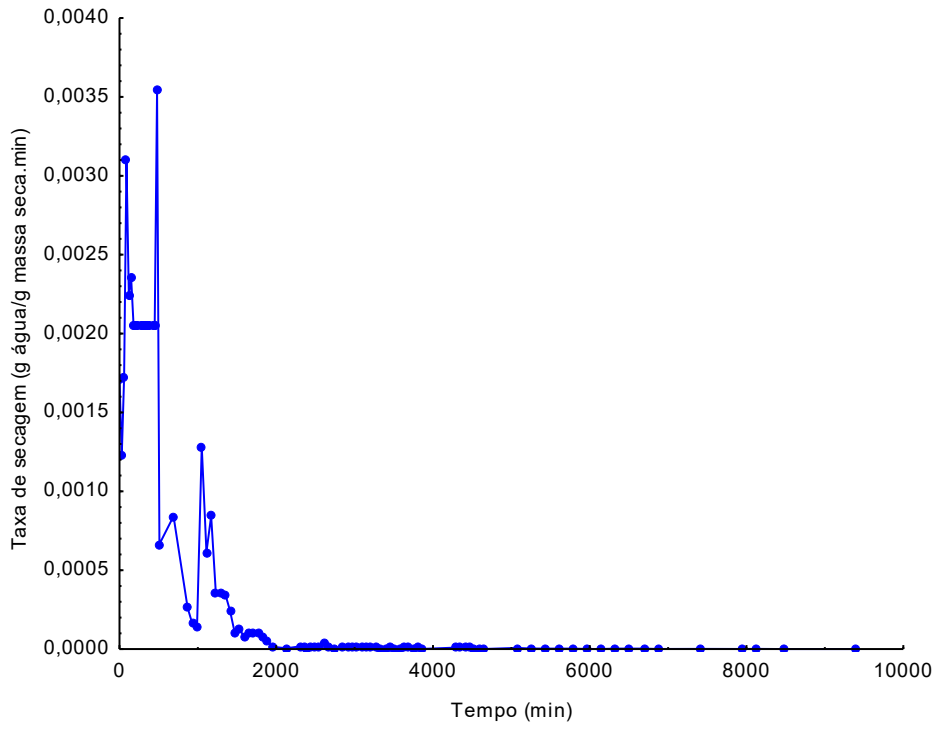
Esses resultados corroboram os dados de pesquisas de vários autores que, ao trabalharem com produtos agrícolas, também verificaram a influência da temperatura na velocidade de secagem (SACILIK, 2007; HACIHAFIZOGLU et al., 2008; ALMEIDA et al., 2009; ULLMANN et al., 2010; BORGES et al., 2011; BOTELHO et al., 2011; REIS et al., 2011; TAVAKOLIPOUR, 2011).

De acordo com Sousa et al. (2011), o aumento da temperatura do ar de secagem faz com que haja maior taxa de remoção de água do grão devido a um maior gradiente de umidade entre a semente e o ar, decrescendo o tempo necessário para reduzir o teor de água até o valor desejado.

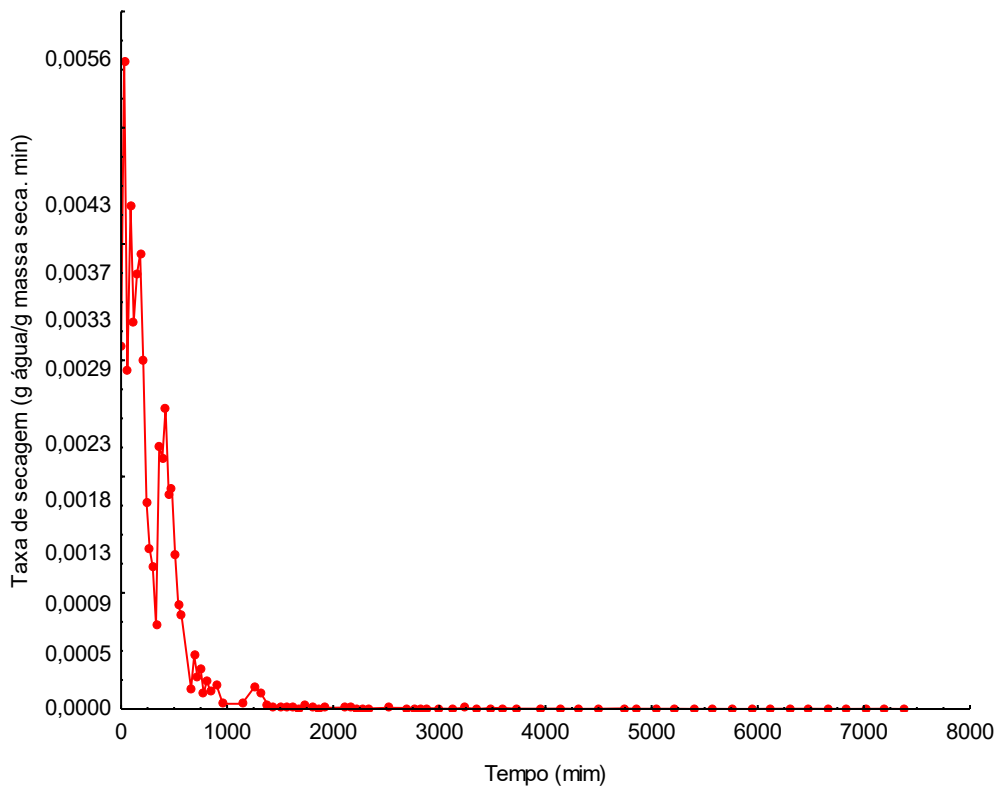
Observando-se nas Figuras 4.2 e 4.3 os valores das taxas de secagem do feijão-caupi nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, verificou-se que o aumento da temperatura do ar de secagem resultou em maiores valores de taxa de remoção de água do produto. Resultados que estão de acordo com os obtidos por Morais et al. (2013) e Camicia et al. (2015) para o feijão-caupi.

Constatou-se, também, que no início do processo de secagem a remoção de água do feijão-caupi ocorreu de maneira mais acentuada que no final desse processo, independentemente da temperatura. Tal fenômeno ocorre devido ao fato de que, no final da secagem, há uma maior necessidade de energia para a evaporação da água, uma vez que, essa se encontra mais fortemente ligada à matéria seca. Durante o processo de secagem, a água superficial em produtos agrícolas é a primeira a ser evaporada. Todavia, com a remoção da água superficial, a frente de evaporação se desloca gradativamente para as camadas mais interiores do produto, de modo que passa a vigorar o processo de difusão líquida (BABALIST et al., 2006), o qual é mais influenciado pela temperatura do ar de secagem (RESENDE et al., 2007).

Observou-se nas Figuras 4.2 e 4.3 que inicialmente a taxa de secagem apresentou uma fase de adaptação do material com a temperatura do ar de secagem, e que ocorreu uma elevação gradual da temperatura da amostra e da pressão de vapor de água sem a perda de umidade; em seguida a taxa decresceu rapidamente. Na terceira fase a taxa de secagem descreveu-se um comportamento exponencial, vindo depois a permanecer praticamente constante até o final do experimento. Verificou-se que as taxas de secagem nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C no intervalo de tempo inicial de 0 a 2000 min, de 0 a 1250 min, de 0 a 600 min e de 0 a 400 min, respectivamente, apresentaram variações de taxas ascendente e descendente.

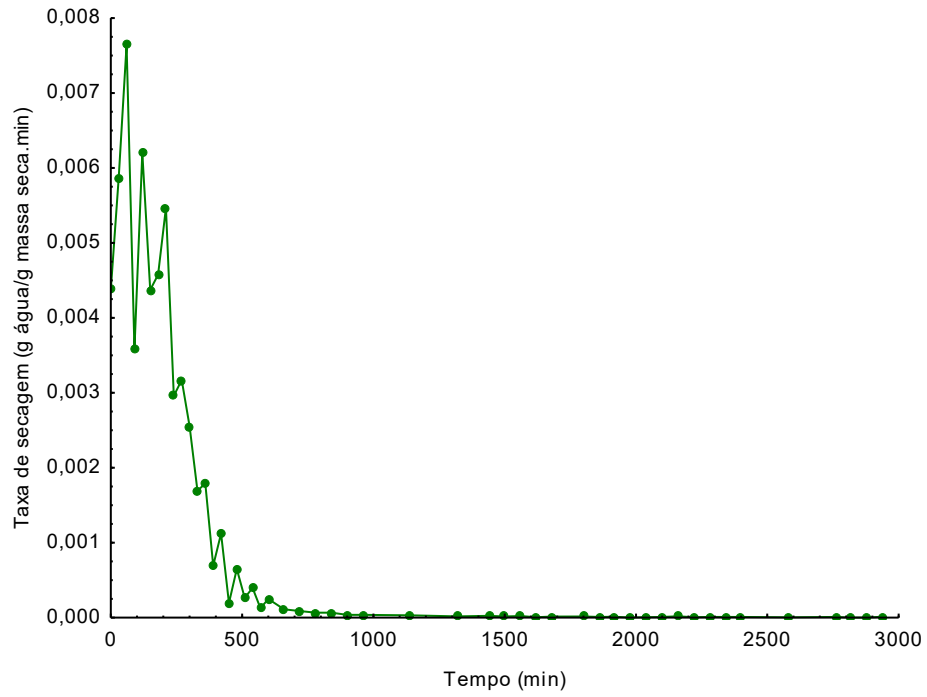


(a)

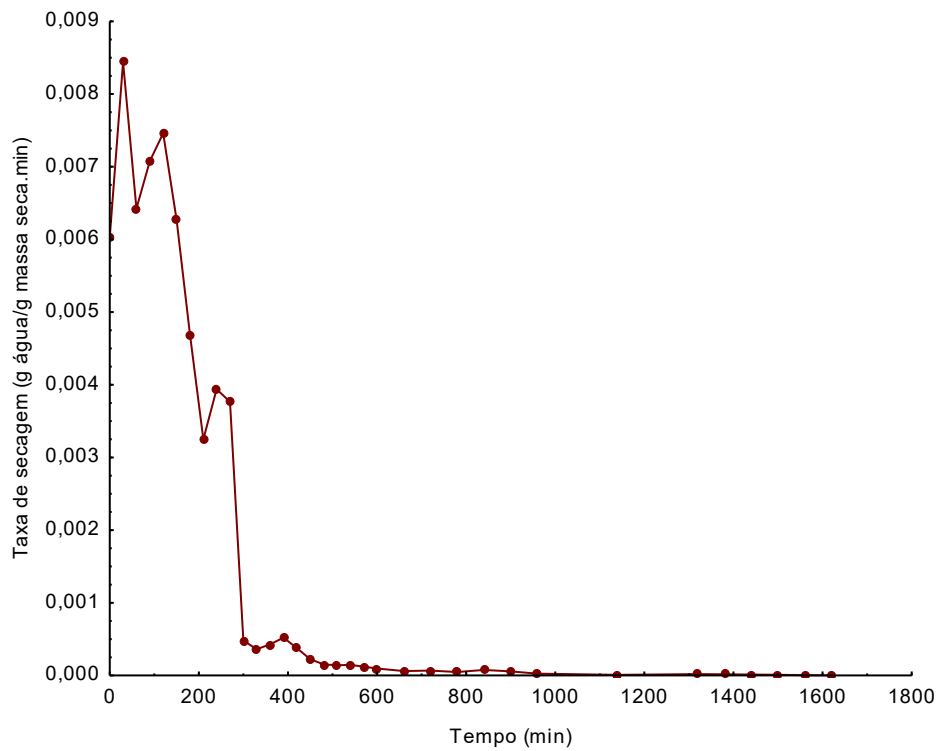


(b)

Figura 4.2 – Taxas de secagem em função do tempo de secagem do feijão-caupi nas temperaturas de: 40 °C (a) e 50 °C (b)



(a)



(b)

Figura 4.3 – Taxa de secagem artificial das amostras de feijão-caupi em camada fina para a temperatura de: 60 °C (a) e temperatura de 70 °C (b)

Estão apresentados, na Tabela 4.2, os parâmetros dos modelos matemáticos de Verna, Aproximação da Difusão, Page, Logarítmico, Dois Termos, Henderson e Pabis, Lewis, Thompson, Exponencial de dois Termos e Midilli ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem em estufa de feijão-caupi nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

Observou-se que todos os modelos matemáticos avaliados se ajustaram bem aos dados experimentais de secagem para a faixa de temperatura estudada, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,980, $\chi^2 < 0,0002$ e $DQM < 0,0145$. De acordo com esses resultados, todos os modelos avaliados, podem ser utilizados na predição da cinética de secagem de feijão-caupi. Constatou-se que os modelos de Page, Aproximação da Difusão e Verna apresentaram, de maneira geral, maiores valores dos coeficientes de determinação (R^2) e os menores valores de χ^2 e DQM, sendo os melhores para estimar as curvas de cinética de secagem do feijão-caupi, na faixa de temperatura de 40 a 70 °C.

A constante de secagem (k) representa o efeito das condições externas de secagem podendo ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura e está relacionada com a difusividade efetiva no processo de secagem para o período decrescente, sendo a difusão líquida o mecanismo que controla o processo. Verificou-se que o parâmetro “ k ” dos modelos de Verna, Aproximação da Difusão e Page aumentou com o aumento da temperatura de 60 para 70 °C. Nos modelos Logarítmico, Henderson e Pabis, Lewis e Exponencial de Dois Termos o parâmetro “ k ” aumentou com o aumento da temperatura de 40 a 70 °C .

Observou-se também que o parâmetro “ n ” do modelo Page, aumentou com a elevação da temperatura.

No modelo de Dois Termos e Verna, o parâmetro “ a ” diminuiu com o aumento da temperatura entre 40 e 50 °C.

Tabela 4.2 – Parâmetros dos modelos matemáticos, coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM) de diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de secagem de feijão-caupi em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C

Modelo	Parâmetros						χ^2	R^2	DQM
	a	b	c	n	k	k_1			
Temperatura de secagem – 40 °C									
Verna	1,2550	-	-	-	0,0021	0,0080	$5,46 \times 10^{-20}$	0,9995	$0,22 \times 10^{-9}$
Aproximação da Difusão	-0,237	0,2578	-	-	0,0082	-	$9,16 \times 10^{-20}$	0,9995	$0,29 \times 10^{-9}$
Page	-	-	-	1,1103	0,0008	-	$0,74 \times 10^{-20}$	0,9982	$0,08 \times 10^{-9}$
Logarítmico	1,0663	-	0,0006	-	0,0018	-	$5,48 \times 10^{-5}$	0,9975	0,0072
Dois Termos	0,5232	0,5232	-	-	0,0018	0,0018	$5,45 \times 10^{-5}$	0,9975	0,0072
Henderson e Pabis	1,0664	-	-	-	0,0018	-	$5,32 \times 10^{-5}$	0,9975	0,0072
Lewis	-	-	-	-	0,0016	-	$1,98 \times 10^{-16}$	0,9947	$1,4 \times 10^{-8}$
Thompson	-6903,1	3,4144	-	-	-	-	$2,07 \times 10^{-16}$	0,9947	$1,4 \times 10^{-8}$
Exponencial de Dois Termos	0,0024	-	-	-	0,6835	-	$2,24 \times 10^{-16}$	0,9943	$1,4 \times 10^{-8}$
Midilli	1,1014	-0,000	-	0,9304	0,0029	-	$2,22 \times 10^{-5}$	0,9951	0,0046
Temperatura de secagem – 50 °C									
Verna	1,0693	-	-	-	0,0033	0,2371	$0,15 \times 10^{-8}$	0,9936	$3,8 \times 10^{-5}$
Aproximação da Difusão	-	0,8931	-	-	0,0052	-	$2,92 \times 10^{-31}$	0,9962	$5,3 \times 10^{-16}$
Page	-	-	-	1,1338	0,0014	-	$0,93 \times 10^{-32}$	0,9960	$0,9 \times 10^{-16}$
Logarítmico	1,0415	-	0,0024	-	0,0032	-	$25,7 \times 10^{-6}$	0,9941	0,0049
Dois Termos	0,5214	0,5214	-	-	0,0032	0,0032	$57,5 \times 10^{-31}$	0,9940	23×10^{-16}
Henderson e Pabis	1,0428	-	-	-	0,0032	-	$2,41 \times 10^{-5}$	0,9940	0,0048
Lewis	-	-	-	-	0,0031	-	$1,14 \times 10^{-22}$	0,9928	$1,0 \times 10^{-11}$
Thompson	-7256,30	4,7649	-	-	-	-	$1,19 \times 10^{-22}$	0,9928	$1,0 \times 10^{-11}$
Exponencial de Dois Termos	0,0028	-	-	-	1,1075	-	$0,15 \times 10^{-8}$	0,9914	$3,82 \times 10^{-5}$
Midilli	1,0839	0,0000	-	0,9225	0,0054	-	$9,39 \times 10^{-5}$	0,9899	0,0094
Temperatura de secagem – 60 °C									
Verna	-5,6953	-	-	-	0,0031	0,0033	$0,001 \times 10^{-6}$	0,9895	$3,8 \times 10^{-5}$
Aproximação da Difusão	-1,7417	0,6919	-	-	0,0112	-	$1,42 \times 10^{-20}$	0,9984	$1,1 \times 10^{-10}$
Page	-	-	-	1,3173	0,0008	-	$1,57 \times 10^{-28}$	0,9983	$0,01 \times 10^{-12}$
Logarítmico	1,0861	-	-0,002	-	0,0052	-	0,0001	0,9910	0,0121
Dois Termos	-14,5986	15,5912	-	-	0,0096	0,0090	$1,23 \times 10^{-6}$	0,9984	0,0010
Henderson e Pabis	1,0850	-	-	-	0,0052	-	0,0001	0,9909	26×10^{-7}
Lewis	-	-	-	-	0,0048	-	$2,36 \times 10^{-14}$	0,9860	$1,5 \times 10^{-7}$
Thompson	-5769,43	5,3064	-	-	-	-	$2,44 \times 10^{-14}$	0,9860	$1,53 \times 10^{-7}$
Exponencial de Dois Termos	0,0024	-	-	-	1,9945	-	$2,63 \times 10^{-14}$	0,9857	$1,5 \times 10^{-7}$
Midilli	1,1180	0,0000	-	0,9282	0,0081	-	$3,2 \times 10^{-5}$	0,9859	0,0054
Temperatura de secagem – 70 °C									
Verna	-5,6353	-	-	-	0,0129	0,0112	$5,70 \times 10^{-9}$	0,9987	72×10^{-6}
Aproximação da Difusão	-23,720	0,9655	-	-	0,0122	-	$0,01 \times 10^{-14}$	0,9987	$0,01 \times 10^{-6}$
Page	-	-	-	1,3657	0,0009	-	$1,38 \times 10^{-21}$	0,9986	$0,03 \times 10^{-9}$
Logarítmico	1,0879	-	-0,008	-	0,0065	-	0,0002	0,9890	0,0138
Dois termos	1,0421	0,0408	-	-	0,0067	0,0067	0,0002	0,9886	0,0144
Henderson e Pabis	1,0829	-	-	-	0,0067	-	0,0002	0,9886	0,0144
Lewis	-	-	-	-	0,0062	-	$5,0 \times 10^{-11}$	0,9835	$7,0 \times 10^{-6}$
Thompson	-2537,04	3,9812	-	-	-	-	$5,32 \times 10^{-11}$	0,9835	$7,0 \times 10^{-6}$
Exponencial de Dois Termos	0,0023	-	-	-	2,6238	-	$3,5 \times 10^{-11}$	0,9835	0,0144
Midilli	1,0807	0,0000	-	1,0415	0,0054	-	0,0002	0,9910	0,0140

Na Figura 4.4 estão representados as curvas do modelo de Page ajustadas aos dados experimentais da cinética de secagem do feijão-caupi nas temperaturas de secagem de 40, 50, 60 e 70 °C. Devido a sua simplicidade matemática e por possuir apenas dois coeficientes (k e n), selecionou-se o modelo de Page para descrever a secagem em camada fina do feijão-caupi nas diferentes condições de temperatura. O modelo de Page tem sido comumente utilizado por diversos pesquisadores para representar processos de secagem em camada fina de diferentes produtos agrícolas (GONELI et al., 2009; RESENDE et al., 2011; SHARADA, 2013; SIQUEIRA et al., 2013; RESENDE et al., 2014; COSTA et al., 2015). Além do que, foi considerado como um dos melhores modelos para estimar as curvas de cinética de secagem. Verificaram-se as proximidades das curvas ajustadas com o modelo de Page aos valores experimentais. Constatou-se efeito pronunciado da temperatura do ar de secagem sobre as curvas de secagem do feijão-caupi. Com o aumento da temperatura, reduziu-se o tempo de secagem. Com isso, houve aumento do potencial de transferência de calor e massa durante a secagem, resultando em aumento na taxa de secagem, e consequentemente, em diminuição no tempo de processo (FERREIRA et al., 2012).

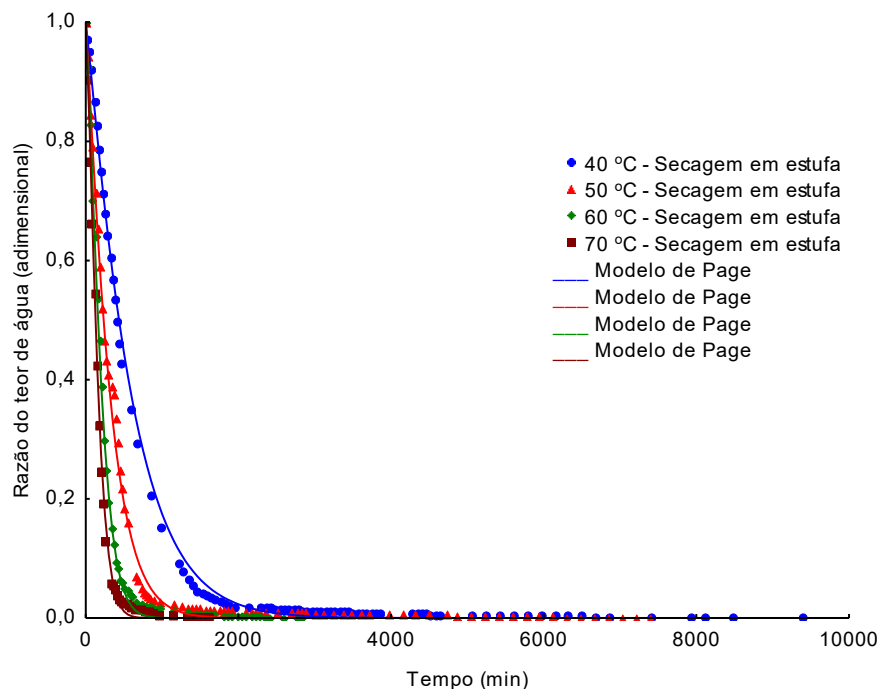


Figura 4.4 – Valores de razão do teor de água experimentais e estimados pelo modelo de Page em função do tempo de secagem em estufa do feijão-caupi nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C

Em virtude do mecanismo de transporte da água no interior do produto ocorrer por meio de difusão de vapor, utilizou-se a equação baseada na Lei de Fick, aplicada a produtos com forma geométrica esférica, para calcular a partir dos dados experimentais a difusividade efetiva do produto (D_{ef}). Conforme Oliveira et al. (2012), a difusividade pode ser descrita como a facilidade com que a água é removida de determinado material. A mesma depende da temperatura do ar de secagem empregada, de modo que, quanto maior a magnitude dessa variável, menor será a resistência do produto à remoção de água.

Na Tabela 4.3 estão os valores dos coeficientes de difusão efetivo (D_{ef}) ou difusividade efetiva e os coeficientes de determinação (R^2) do feijão-caupi para cada condição de secagem artificial em estufa. Utilizou-se para o cálculo o valor médio do raio equivalente de 0,0036 m para o feijão-caupi. Os dados do coeficiente de difusão foram obtidos pelo ajuste da Equação (3.12), aos dados experimentais das secagens das amostras de feijão-caupi.

Tabela 4.3 – Valores dos coeficientes de difusão efetivo (D_{ef}) e dos coeficientes de determinação (R^2) para o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) em diferentes temperaturas de secagem artificial em estufa

Temperatura (°C)	D_{ef} ($10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	R^2
40	$2,12 \times 10^{-11}$	0,9653
50	$4,18 \times 10^{-11}$	0,9559
60	$6,66 \times 10^{-11}$	0,9411
70	$8,68 \times 10^{-11}$	0,9401

Os valores dos coeficientes de difusão efetivo das amostras de feijão-caupi aumentaram com a elevação da temperatura de secagem, quanto maior a temperatura maior será a absorção de calor e conseqüentemente maior a difusão efetivo. Ao secar feijão nas temperaturas de 35 e 45 °C Resende et al. (2008) verificaram valores superiores do coeficiente de difusão efetivo de $2,41$ a $4,83 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o feijão vermelho e de $1,39$ a $1,53 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o feijão preto.

Na Figura 4.5 apresenta-se graficamente os valores de D_{ef} na forma de “ $\ln D_{ef}$ ” descritos em função do recíproco da temperatura absoluta (T_a^{-1}), cuja dependência com relação à temperatura do ar de secagem foi descrita pela equação de Arrhenius. Constatou-se que os valores dos coeficientes de difusão aumentaram linearmente,

corroborando com os resultados relatados por Moraes et al. (2013) e Camicia et al. (2015). O ajuste linear indica que houve uniformidade na variação do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura (REIS et al., 2011).

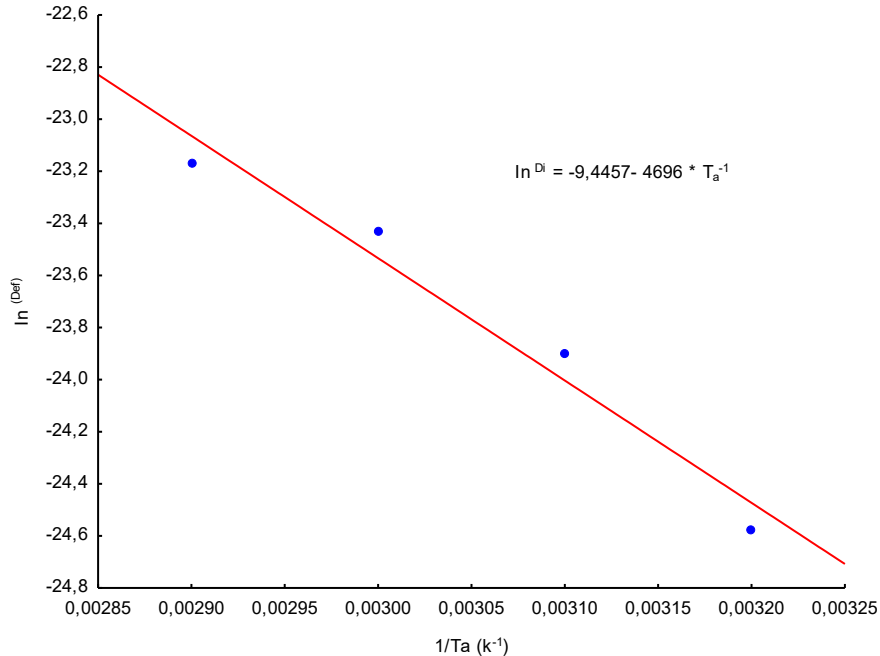


Figura 4.5 – Representação da Equação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo durante a secagem em camada fina das amostras de feijão-caupi nas diferentes condições de temperatura

Verifica-se na Figura 4.5 que os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram linearmente sua dependência com relação à temperatura do ar de secagem, concordando com os resultados relatados por Costa et al. (2011) e Faria et al. (2012). A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação E_a/R , enquanto a sua interseção com o eixo das coordenadas indica o valor de D_0 .

Na Equação (4.1), tem-se os coeficientes da equação de Arrhenius ajustada aos coeficientes de difusão efetivo das amostras de feijão-caupi.

$$D_i = 7,902 \times 10^{-5} \exp(39,04 / 8,314.T_a) \quad (4.1)$$

Conforme verificado na Equação 4.1, o valor da energia de ativação para desencadear o processo de secagem das amostras de feijão-caupi, no intervalo de temperatura de 40 a 70 °C foi de 39,04 kJ mol⁻¹.

Termodinamicamente, a energia de ativação pode ser definida como a facilidade com que as moléculas de água presentes nas camadas mais interiores das amostras

superam as barreiras de energia durante a migração dessas para as camadas mais superficiais, sendo que, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto (CORRÊA et al., 2006; CORRÊA et al., 2007; RESENDE et al., 2007; 2010; MORAIS et al., 2013).

O valor de energia de ativação obtido no presente estudo está próximo dos valores encontrados por Moraes et al. (2013) e Camicia et al. (2015) em sementes de feijão-caupi, de 27,16 e 35,04 kJ mol⁻¹, respectivamente. Para Zorgas et al. (1996), a energia de ativação para a maioria dos produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110,0 kJ mol⁻¹.

Na Tabela 4.4 observa-se os valores das propriedades termodinâmicas (entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs) para as diferentes temperaturas de secagem artificial na estufa das amostras de feijão-caupi. Verificou-se que os valores de entalpia sofreram redução com o aumento da temperatura do ar de secagem das amostras de feijão-caupi.

Tabela 4.4 – Propriedades termodinâmicas do processo de secagem das amostras de feijão-caupi nas diferentes condições de temperatura

Temperatura de secagem (°C)	Entalpia específica (KJ/mol)	Entropia específica (J/mol K)	Energia livre de Gibbs (J/mol)
40	36,43	-323,84	137.840,49
50	36,35	-324,09	141.161,97
60	36,27	-324,35	144.487,36
70	36,18	-324,59	147.815,25

Corrêa et al. (2010) trabalhando com café, também observaram comportamento semelhante quanto a entalpia. Esse comportamento da entalpia era esperado, uma vez que, imaginando a amostra como um sistema termodinâmico, o aumento da temperatura do ar de secagem promove aumento da pressão parcial de vapor de água na amostra, enquanto a do ar permanece constante. Assim, ocorre o aumento na velocidade da difusão de água do interior para a superfície da amostra e, conseqüentemente, perda de água da amostra por dessorção. Ademais, no caso do processo de secagem descrito, os valores de variação de entalpia permitiram atestar que há uma maior estabilidade das interações das moléculas de água entre si, assim como as da amostra, em comparação àquelas entre a água e a amostra, ou seja, as interações água-água e amostra-amostra são

entalpicamente mais estáveis em comparação as interações água-amostra, repercutindo em uma diminuição de entalpia ao final de secagem e, conseqüentemente, indicando uma menor quantidade de energia necessária para remover a água ligada a amostra com a elevação do fator (OLIVEIRA et al., 2015).

A energia necessária para a retirada da água da amostra, que na secagem ocorre por difusão, é composta pela entalpia de vaporização da água livre e a entalpia de vaporização da água na amostra ou calor isostérico (GONELI et al., 2010). Uma vez que, em todas as temperaturas do ar utilizadas, a variação do teor de água inicial e final foi a mesma, a energia necessária para quebrar as ligações da água com água e água com superfície adsorvente (calor isostérico) foi constante, ocorrendo variação somente na entalpia de vaporização da água livre. Com o aumento da temperatura e conseqüente aumento da pressão parcial de vapor da água no interior da amostra, ocorre redução na entalpia de vaporização da água livre, e, portanto, no balanço de entalpia final. Com a elevação da temperatura do ar de secagem, ocorre redução na entalpia do processo de difusão de água na amostra durante a secagem (ARAÚJO et al., 2017).

Analisando-se o comportamento da entropia observou-se que, para as amostras de feijão-caupi, esta propriedade termodinâmica comportou-se de forma similar à entalpia e seus valores foram reduzidos com o aumento da temperatura. A entropia é uma grandeza termodinâmica ligada ao grau de desordem, onde seus valores se elevam durante um processo natural em um sistema isolado (GONELI et al., 2010). Com a elevação da temperatura do ar de secagem e conseqüente aumento na pressão parcial de vapor da água na amostra, também ocorre aumento na excitação das moléculas de água e redução da viscosidade da água, fatores que combinados propiciam o aumento da velocidade do processo de difusão de água e redução da entropia no processo. Os valores negativos da entropia podem ser atribuídos à existência de adsorção química e ou modificações estruturais do adsorvente (MOREIRA et al., 2008).

A energia livre de Gibbs é uma função termodinâmica responsável por quantificar a máxima energia liberada em um processo sendo que, em condições de temperatura e pressão constantes, a energia livre de Gibbs pode servir de indicativo quanto ao trabalho útil realizado (NKOLO MEZE'E; NOAHNGAMVENG; BARDET, 2008).

Verificou-se que houve aumento nos valores da energia livre de Gibbs para as amostras de feijão-caupi com o aumento da temperatura do ar de secagem. Logo, permitiu-se confirmar o aumento do trabalho realizado para tornar os sítios de sorção

disponíveis (NKOLO MEZE'E; NOAH NGAMVENG; BARDET, 2008), elevando a capacidade de transferência de moléculas de água da amostra para o ar de secagem (OLIVEIRA et al., 2014). Além disso, o valor positivo da energia livre de Gibbs caracterizou a presente reação como endergônica, em que uma adição de energia proveniente do meio em que o produto está envolvido é requerida para que ocorra a reação. Esse comportamento é esperado, uma vez que o processo de dessecagem apresentado foi não espontâneo, posto as amostras estarem inicialmente em um ambiente com maior umidade relativa (colheita), sendo posteriormente submetidas a uma menor umidade relativa (secagem) (ARAÚJO et al., 2017).

4.3 – Secagem solar

4.3.1 – Secagem em secador ACSN (Experimento 3)

As secagens em camada fina do feijão-caupi no secador ACSN (Secador acumulador de calor para secagem no período noturno) foram iniciadas às 16:30 h e processadas até que as amostras de feijão-caupi atingissem o teor de água de equilíbrio, às 08:00 h do dia seguinte.

Na Figura 4.6 são apresentados os dados experimentais da cinética de secagem de feijão-caupi desidratado em secador ACSN no período noturno, expressos através da razão do teor de água em função do tempo de secagem. No tocante à testemunha, no período noturno as amostras de feijão-caupi ficaram na bancada do laboratório (abrigo), expostas às condições ambientais, com a finalidade de se avaliar a eficiência do secador ACSN. A temperatura e a umidade relativa do ambiente externo, durante o intervalo de realização da secagem noturna, variaram de 23,74 a 27,32 °C e de 85,47 a 65,23%, respectivamente, e a temperatura e a umidade relativa no interior do secador ACSN variaram de 57,00 a 36,30 °C e de 43,2 a 62,3%, respectivamente.

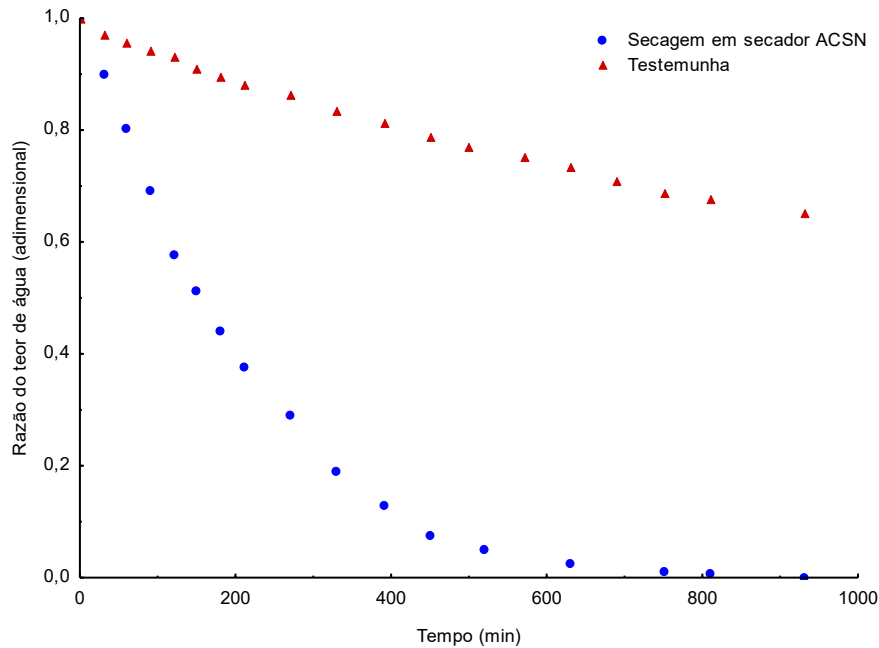


Figura 4.6 – Secagem de feijão-caupi em secador ACSN e da testemunha colocada em abrigo

Observou-se que as amostras que foram desidratadas no secador ACSN durante o período noturno perderam água com maior velocidade em relação às amostras que permaneceram abrigadas na bancada do laboratório. Efeito já esperado, uma vez que, durante a noite, o ambiente externo apresenta umidade relativa mais elevada e a temperatura mais baixa. No entanto, no interior do secador ACSN, a temperatura é mais elevada e a umidade relativa mais baixa que a do ambiente externo, o que favorece a remoção de água do produto. O tempo de secagem para que o feijão-caupi atingisse o teor de água de equilíbrio foi de 15,5 h (930 min), mas notou-se que no tempo de 450 min a razão do teor de água já estava próxima de 0,07 e com teor de água de 19,58% b.u., enquanto que a testemunha, em igual tempo, apresentou razão do teor de água superior a 0,7893 e com teor de água de 58,46% b.u.

Observa-se, na Tabela 4.5, o teor de água inicial e final do feijão-caupi referente à secagem em secador ACSN no período noturno. Viu-se que as amostras e as testemunhas iniciaram o processo de secagem com teor inicial de 62,77% b.u. (1,686 b.s.) e ao final da desidratação apresentavam teores de 11,26% b.u. (0,1268 b.s.) para a amostra de feijão-caupi do secador ACSN e de 54,29% b.u. (1,187 b.s.) para a testemunha. O valor do teor de água do feijão-caupi atingido no secador ACSN no final da secagem foi inferior a 13%, sendo considerado um teor seguro para o

armazenamento de grãos, ao passo que o teor de água da testemunha estava muito acima desse valor, indicando que o secador ACSN foi eficiente para a secagem do feijão-caupi. Observou-se que a perda de água das amostras no secador ACSN foi de 82,06% enquanto que a perda de água da testemunha no mesmo período de tempo foi de 13,51%, resultando em uma diferença de 68,55%, evidenciando a eficiência do secador ACSN em relação à testemunha em abrigo.

Tabela 4.5 – Teor de água (% b.u.) inicial, final e perda de água (%) das amostras de feijão-caupi desidratadas em secador ACSN e colocadas na bancada do laboratório no período noturno (testemunha)

Teor de água (% b.u.)					
Secagem em secador ACSN			Testemunha		
Inicial	Final	Perda de água (%)	Inicial	Final	Perda de água (%)
62,77	11,26	82,06	62,77	54,29	13,51

Na Figura 4.7, tem-se os dados experimentais do teor de água (% b.u.) das amostras de feijão-caupi em secador ACSN e de sua testemunha colocada em abrigo no laboratório. Constatou-se que o teor de água diminui com o tempo de secagem mais rapidamente no secador ACSN do que para a testemunha.

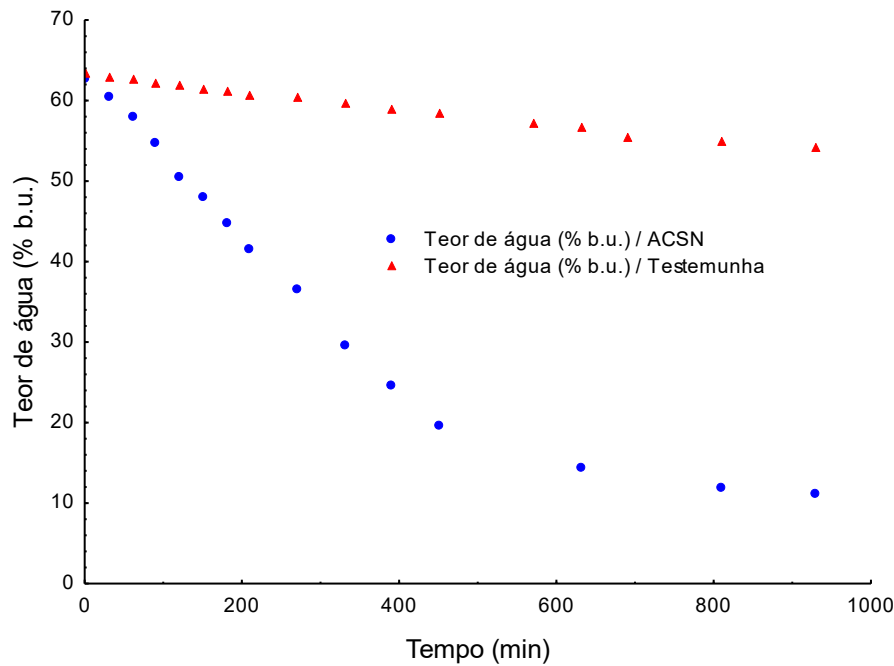


Figura 4.7 – Curva do teor de água (% b.u.) das amostras em secador ACSN e testemunha

Na Figura 4.8 (a) tem-se as taxas de secagem em função do tempo da amostra de feijão-caupi em secador ACSN, observou-se, inicialmente, uma tendência de aumento da taxa de secagem que representa uma fase de adaptação do material com a temperatura do ar de secagem, na qual ocorreu uma elevação gradual da temperatura da amostra e da pressão de vapor de água sem a perda de água, vindo em seguida a decrescer de forma linear rapidamente até 120 min, quando ocorreu um aumento e decréscimo na taxa de secagem entre 150 e 270 min, devido a formação de gradientes de umidade que ocorre enquanto a superfície do material está seca e a parte central está úmida. A partir deste período a taxa decresce de forma exponencial até próximo de 810 min, vindo depois a taxa de secagem a permanecer praticamente constante até o final do experimento. Com o aumento da temperatura do ar de secagem ocorreu maior taxa de remoção de água do produto, concordando com diversos pesquisadores para vários produtos agrícolas, como Santos et al. (2013) (grão de urucum); Jittanit et al. (2011) (grão de abóbora). Na Figura 4.8 (b), observou-se as taxas de secagem em função do tempo da testemunha. Tem-se, inicialmente, uma taxa decrescente até 90 min, vindo em seguida aumentar a taxa de secagem até o tempo de 120 min, quando se inicia um decréscimo da taxa até 210 min, vindo depois a taxa de secagem oscilar em crescente e decrescente até o final da secagem no tempo de 930 min.

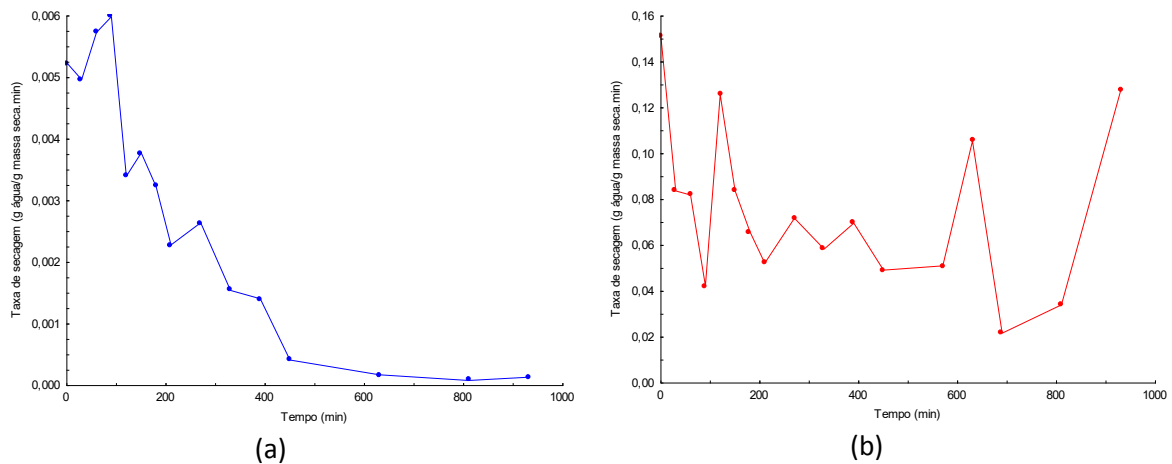


Figura 4.8 – Taxas de secagem em função do tempo de secagem do feijão-caupi em camada fina no secador ACSN (a) e testemunha (b)

Na Tabela 4.6 apresentam-se os parâmetros dos modelos matemáticos de Page, Aproximação da Difusão, Verna, Logarítmico, Dois Termos, Henderson e Pabis e Thompson, Lewis, Exponencial de Dois Termos e Midilli ajustados aos dados da cinética de secagem das amostras de feijão-caupi no secador ACSN de uso noturno e de sua testemunha em abrigo, com os respectivos coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

Observou-se que todos os modelos matemáticos avaliados se ajustaram bem aos dados experimentais de secagem do feijão-caupi em secador ACSN e de sua testemunha em bancada de laboratório (abrigo) para a faixa de temperatura estudada, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,980, $\chi^2 < 0,0001$ e DQM $< 0,0106$, exceto para o modelo de Midilli. De acordo com esses resultados, todos os modelos avaliados, podem ser utilizados na predição da cinética de secagem de feijão-caupi. Constatou-se que os modelos de Page, Aproximação da Difusão e Verna apresentaram, de maneira geral, os maiores valores dos coeficientes de determinação (R^2) e os menores valores de χ^2 e DQM sendo os melhores para estimar as curvas de cinética de secagem do feijão-caupi, na faixa de temperatura de 40 a 70 °C. Meneghett et al. (2012) ao ajustarem os modelos de Page, Dois termos, Aproximação da difusão e Logarítmico aos dados experimentais de secagem de grãos de arroz também encontraram bons ajustes com esses modelos.

Tabela 4.6 – Parâmetros dos diferentes modelos ajustados às curvas de cinética de secagem do feijão-caupi com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM) em secador ACSN e de sua testemunha em bancada de laboratório (abrigo)

Modelo	Parâmetros						χ^2	R^2	DQM
	a	b	c	n	k	k ₁			
Page									
ACSN	-	-	-	1,1584	0,0020	-	$0,12 \times 10^{-5}$	0,9991	0,0010
Testemunha	-	-	-	0,8509	0,0012	-	$2,10 \times 10^{-5}$	0,9973	0,0043
Aproximação									
ACSN	-2,9954	0,8502	-	-	0,0084	-	$0,12 \times 10^{-5}$	0,9991	0,0009
Testemunha	0,5918	-0,063	-	-	0,0010	-	$7,6 \times 10^{-9}$	0,9962	$7,9 \times 10^{-5}$
Verna									
ACSN	-3,4758	-	-	-	0,0084	0,0072	$0,11 \times 10^{-5}$	0,9991	0,0009
Testemunha	0,0208	-	-	-	0,166	0,0004	$1,90 \times 10^{-5}$	0,9955	0,0040
Logarítmico									
ACSN	1,0648	-	-	0,0340	0,0042	-	0,0001	0,9973	0,0092
Testemunha	0,5484	-	-	0,4450	0,0010	-	$0,30 \times 10^{-5}$	0,9971	0,0043
Dois Termos									
ACSN	0,5199	0,5198	-	-	0,0048	0,0048	0,0001	0,9957	0,0106
Testemunha	0,4905	0,4905	-	-	0,0004	0,0004	$0,08 \times 10^{-7}$	0,9922	$7,9 \times 10^{-5}$
Henderson e Pabis									
ACSN	1,0397	-	-	-	0,0048	-	0,0001	0,9957	0,0106
Testemunha	0,9828	-	-	-	0,0004	-	$4,2 \times 10^{-5}$	0,9935	0,0061
Thompson									
ACSN	5167,80	4,9072	-	-	-	-	$1,3 \times 10^{-5}$	0,9937	0,0033
Testemunha	-11,971	0,0882	-	-	-	-	$0,65 \times 10^{-6}$	0,9967	0,0007
Lewis									
ACSN	-	-	-	-	0,0046	-	$1,2 \times 10^{-5}$	0,9937	0,0033
Testemunha	-	-	-	-	0,0005	-	$4,8 \times 10^{-5}$	0,9844	0,0067
Exponencial de Dois Termos									
ACSN	0,0025	-	-	-	1,8590	-	$1,3 \times 10^{-5}$	0,9934	0,0034
Testemunha	0,0334	-	-	-	0,0131	-	$0,85 \times 10^{-5}$	0,9966	0,0027
Midilli									
ACSN	1,1653	-0,0007	-	0,0000	0,6923	-	0,0040	0,7746	0,0544
Testemunha	1,0306	0,0004	-	0,0015	0,9671	-	0,0003	0,9441	0,0158

Na Figura 4.9 tem-se a curva de cinética de secagem do feijão-caupi no secador ACSN e da testemunha no abrigo com ajuste pelo modelo de Page, considerado como um dos melhores modelos dentre os testados, onde os pontos representam os valores experimentais e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem predita pelo modelo de Page.

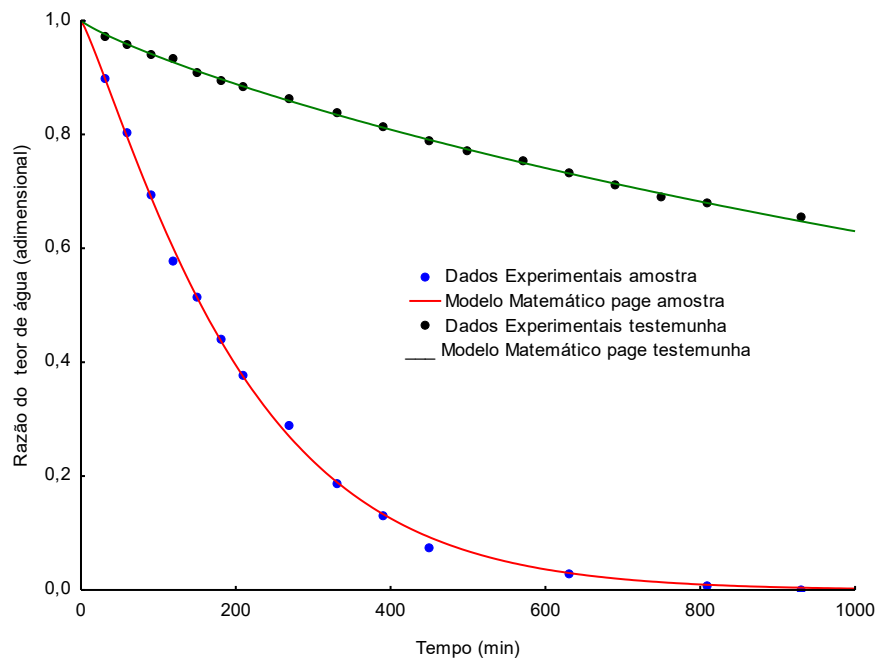


Figura 4.9 – Cinética de secagem do feijão-caupi no secador ACSN e da testemunha em abrigo com ajuste pelo modelo de Page

Observou-se que durante todo o intervalo de tempo de secagem, a linha que representa o modelo matemático encontra-se praticamente sobreposta aos pontos experimentais, com exceção dos tempos de 120, 270 e 450 min, onde os pontos experimentais ficaram ligeiramente afastados da curva que representa o modelo.

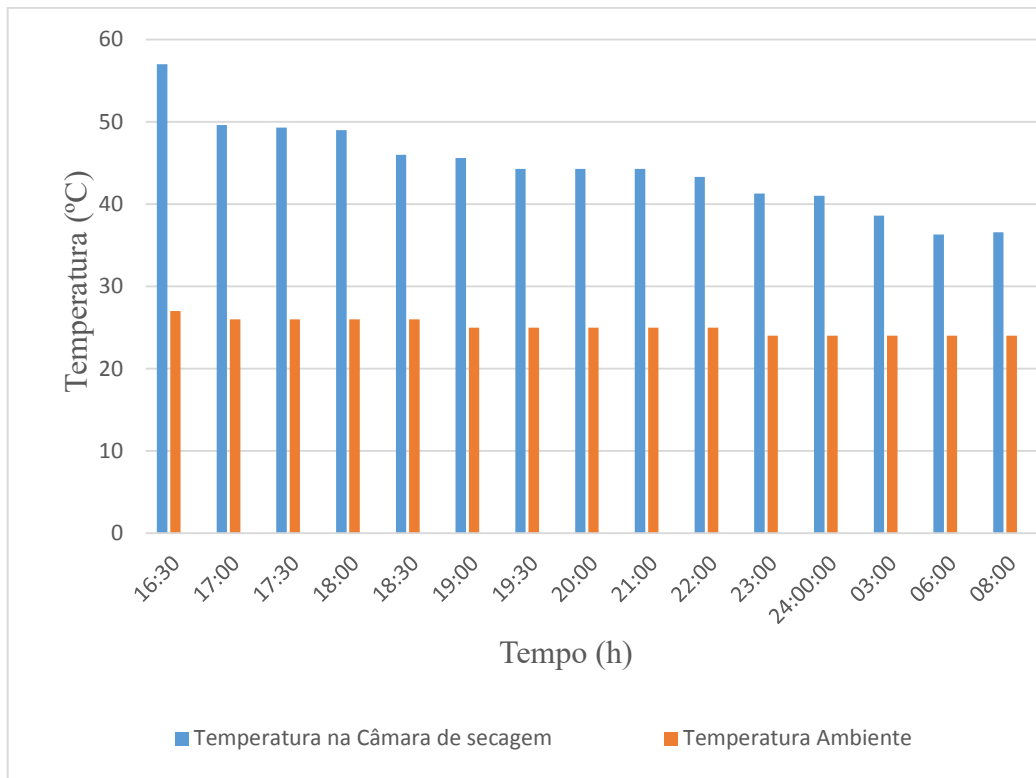
Este comportamento concorda com os obtidos por Diógenes (2010), ao estudar a secagem de farinha de grãos de abóbora em secador ACSN combinada com desidratação por exposição ao sol, no qual obteve bons ajustes para os modelos de Aproximação da Difusão e Page, com R^2 superiores a 0,99. Santos et al. (2011) secaram feijão-caupi em secador ACSN durante duas noites e verificaram valores de R^2 superiores a 0,98 para os modelos Dois Termos, Midilli e Page, na primeira noite de secagem, e superiores a 0,99, para os mesmos modelos, na segunda noite de secagem.

Os valores do coeficiente de difusão efetivo e coeficiente de determinação (R^2) da secagem das amostras de feijão-caupi no secador ACSN e da testemunha, estão apresentados na Tabela 4.7. Estes resultados corroboram os encontrados para sementes de feijão-adzuki (ALMEIDA et al., 2009), feijão *Phaseolus* (CORRÊA et al., 2006; RESENDE et al., 2007) e diversos outros produtos agrícolas (RESENDE et al., 2011; FERREIRA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2012a; ALVES et al., 2013; BAPTESTINI et al., 2014; GONELI et al., 2014; COSTA et al., 2015; MARTINS et al., 2015). Verificou-se que o valor do coeficiente de difusão efetivo da amostra foi praticamente vinte e seis vezes o valor da testemunha, visto que a temperatura do ar de secagem e a umidade relativa aumentam e diminuem, respectivamente, dentro da câmara de secagem, em relação ao ambiente da bancada na qual a temperatura e a umidade relativa da testemunha diminuem e aumentam, respectivamente, devido às condições meteorológicas.

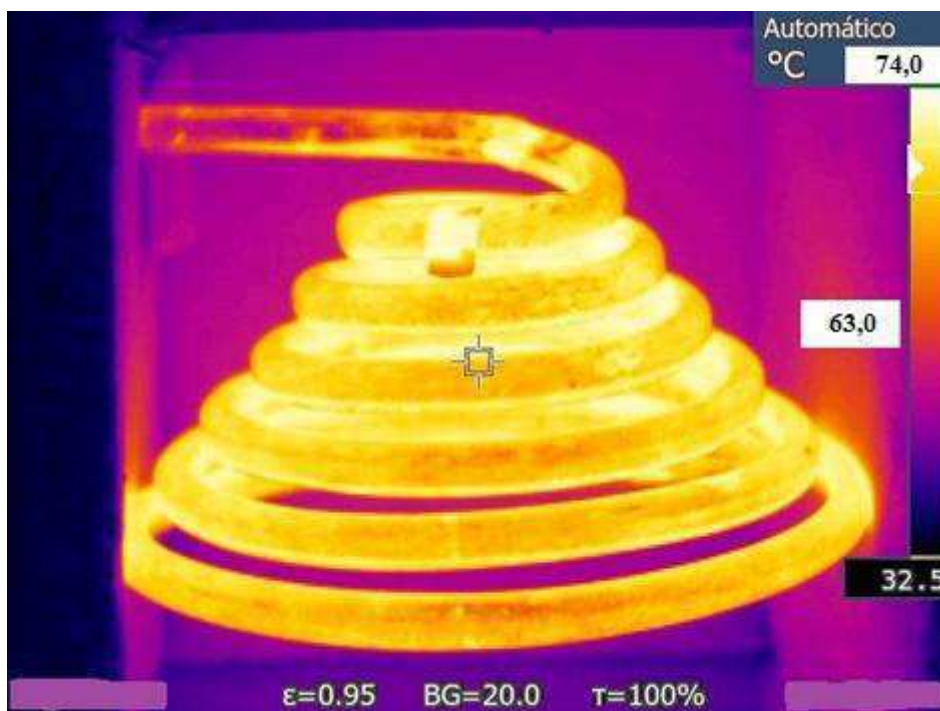
Tabela 4.7 – Valores do coeficiente de difusão efetivo e coeficiente de determinação (R^2) obtidos para amostra de feijão-caupi no secador ACSN e para a testemunha

Feijão-caupi	Amostra em secador ACSN	Testemunha (abrigo)
Coeficiente de difusão efetivo (m^2/s)	$5,84 \times 10^{-11}$	$0,22 \times 10^{-11}$
Coeficiente de determinação (R^2)	0,9576	0,9617

Na Figura 4.10, são mostrados os valores de temperatura do ar de secagem na câmara de secagem do secador ACSN, como também os valores de temperatura do ar ambiente do laboratório (abrigo) e a imagem da serpentina aquecida dentro da câmara durante o processo de aquecimento do ar de secagem. A temperatura inicial da água na entrada da serpentina da câmara de secagem oriunda do reservatório térmico foi de 74,0 °C às 16:30 h e a temperatura final da água na saída da serpentina na câmara de secagem era de 48,0 °C às 08:00 h do dia seguinte.



(a)



(b)

Figura 4.10 – Temperaturas na câmara de secagem do secador ACSN e no ambiente do laboratório (a) e imagem térmica da serpentina na câmara de secagem durante o processo de secagem (b)

Constatou-se que a temperatura do ar na câmara de secagem iniciou-se com o valor de 57 °C às 16:30 h e ao longo do período de secagem esta temperatura diminuiu até o valor de 36,6 °C, às 08:00 h do dia seguinte, sendo maiores as temperaturas dentro da câmara de secagem do que as temperaturas no ambiente (fora da câmara). A diminuição de temperatura na câmara de secagem ao longo do processo é justificada devido a troca de calor da água na serpentina com o ar dentro da câmara por convecção natural e pelas perdas ao longo do circuito térmico. A diferença entre a temperatura inicial e final na câmara foi de 20,4 °C, num intervalo de tempo de 15 h e 30 min.

Viu-se também que as temperaturas no ambiente do laboratório começaram com o valor de 27,32 °C às 16:30 h e alcançaram o valor de 23,74 °C às 08:00 h do dia seguinte no final do processo, representando uma variação de 3,58 °C. Os valores médios das temperaturas e das umidades relativas no ambiente externo e interno do secador ACSN no período noturno estão na Tabela A.1 (Apêndice A).

4.3.1.1 – Eficiência térmica do coletor solar de tubos a vácuo

Na Figura 4.11 tem-se a intensidade média de irradiação solar observado na cidade de Campina Grande no dia da secagem (26/03/2016) com medições em intervalos de uma hora, das 08:00 às 16:30 h, estes valores da radiação solar foram convertidos no total de energia usados na equação (3.19). Estes dados foram fornecidos pela Estação Meteorológica da Casa Ecoeficiente do SENAI, durante o processo de aquecimento de água no coletor de tubos a vácuo/reservatório térmico antes da secagem do feijão-caupi. Verificou-se que a maior intensidade de irradiação foi registrada às 12:00 h com o valor de 909,97 W/m² e sua menor intensidade foi registrada às 16:30 h com o valor de 249,36 W/m² (Tabela 4.8).

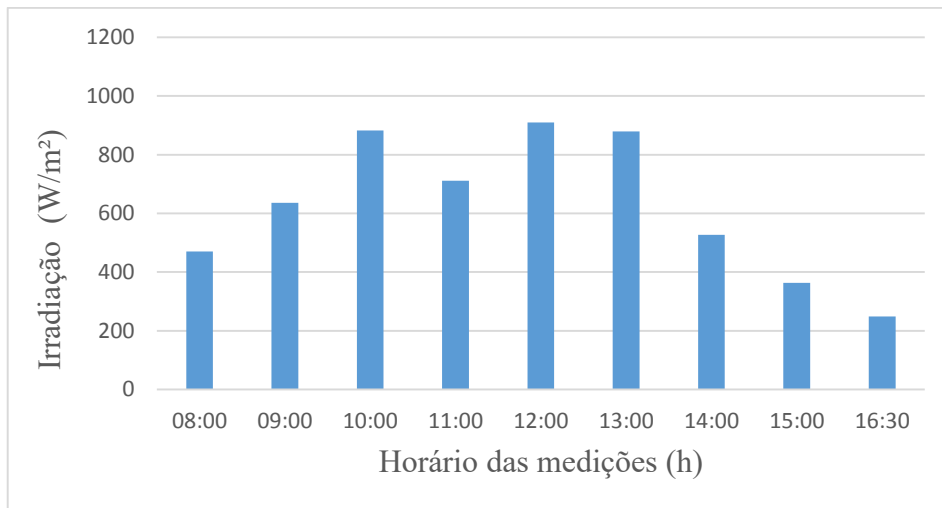


Figura 4.11 – Intensidade média de irradiação solar na cidade de Campina Grande no dia da secagem (26/03/2016)

Tabela 4.8 – Intensidade média de irradiação na cidade de Campina Grande no dia (26/03/2016)

Horário de medição (h)	Intensidade média de irradiação (W/m ²)
08:00	470,30
09:00	636,26
10:00	883,00
11:00	711,16
12:00	909,97
13:00	879,16
14:00	526,86
15:00	362,91
16:30	249,36

A eficiência térmica do coletor solar de tubos a vácuo foi calculada usando as Equações 3.18, 3.19, 3.20 e 3.21. Para o experimento no secador solar ACSN, a energia térmica foi de 15.674,38 Wh e a eficiência térmica do coletor solar no experimento (η), foi de 41,16%. Este valor foi próximo ao verificado por Goerck (2008) para um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo com *heat pipe* na região de Taquari (RS) uma eficiência de 43%.

Com baixas radiações o coletor de tubos a vácuo conseguiu elevar a temperatura do fluido de trabalho, enquanto o coletor plano não. Isto se deve, provavelmente, às perdas térmicas que no coletor de tubos com vácuo são muito menores que no coletor

plano convencional. Em dias nublados, com pancadas de chuvas alternadas, pôde-se observar que a partir de radiações de cerca de 100 W/m^2 o coletor de tubos a vácuo já apresentava aquecimento.

Durante as pancadas de chuva, o coletor de tubos a vácuo manteve sua taxa de aquecimento proporcional à radiação recebida, enquanto o coletor plano, com circulação forçada constante, durante o período de chuva esfriou o fluido de trabalho. Estes testes mostraram que, inclusive em dias com pouca radiação, em temporadas de chuva e temperaturas baixas, o coletor de tubos a vácuo foi a melhor opção. Os coletores planos variaram muito sua eficiência com as variações climáticas, enquanto o coletor de tubos a vácuo pouco mudou entre uma situação de clima desfavorável e uma situação favorável (ROSA, 2012).

4.3.2 – Secagem por exposição direta ao sol (Experimento 4)

A secagem em camada fina do feijão-caupi por exposição direta ao sol foi iniciada às 08:00 h e mantida até que as amostras de feijão-caupi atingissem o teor de água de equilíbrio do produto às 16:30 h do dia. Observou-se um tempo de secagem de 08:30 h (510 min).

Tem-se na Figura 4.12, os dados experimentais da cinética de secagem por exposição ao sol do feijão-caupi, expressos através da razão do teor de água em função do tempo de secagem. Viu-se que a razão do teor de água diminuiu com o tempo de secagem. Durante a secagem a temperatura média do ambiente externo a lona variou de 24 a 40 °C e a umidade relativa média externa a lona variou de 44,57 a 75,00%, respectivamente, e a temperatura e a umidade relativa no interior da lona variaram de 27 a 55,30 °C e de 40,29 a 68,50%, respectivamente. Os valores médios dos parâmetros termodinâmicos do ambiente para as secagens das amostras de feijão-caupi estão apresentados na Tabela A.2 (Apêndice A).

Doymaz (2011), estudando a secagem de grãos de feijão verde em camada fina por exposição ao sol, verificou tempo de 100 h de secagem para os grãos, com uma variação da temperatura de 33 a 46 °C.

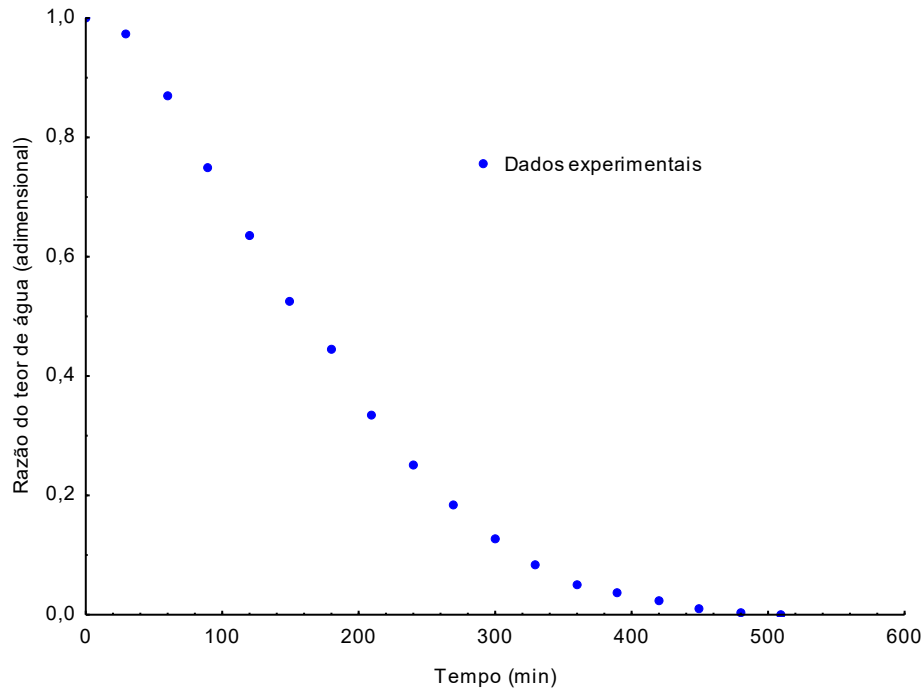


Figura 4.12 – Secagem das amostras de feijão-caupi por exposição direta ao sol

Na Figura 4.13 tem-se as taxas de secagem em função do tempo durante a secagem do feijão-caupi por exposição direta ao sol. Observou-se ausência de um período de taxa constante de secagem, onde a perda de água da amostra durante a secagem ocorreu quase que exclusivamente no período de taxa decrescente. Constatou-se dois períodos de secagem: uma fase de adaptação do material com a temperatura do ar de secagem até 60 min, em que ocorre uma elevação gradual da temperatura da amostra e da pressão de vapor da água sem a perda de água; e um segundo período, a taxa decrescente desta amostra que apresentou um comportamento próximo ao exponencial a partir dos 60 min até o final da secagem. Este comportamento foi semelhante ao da secagem de sementes de amaranto por exposição direta ao sol nas (RONOH et al., 2009).

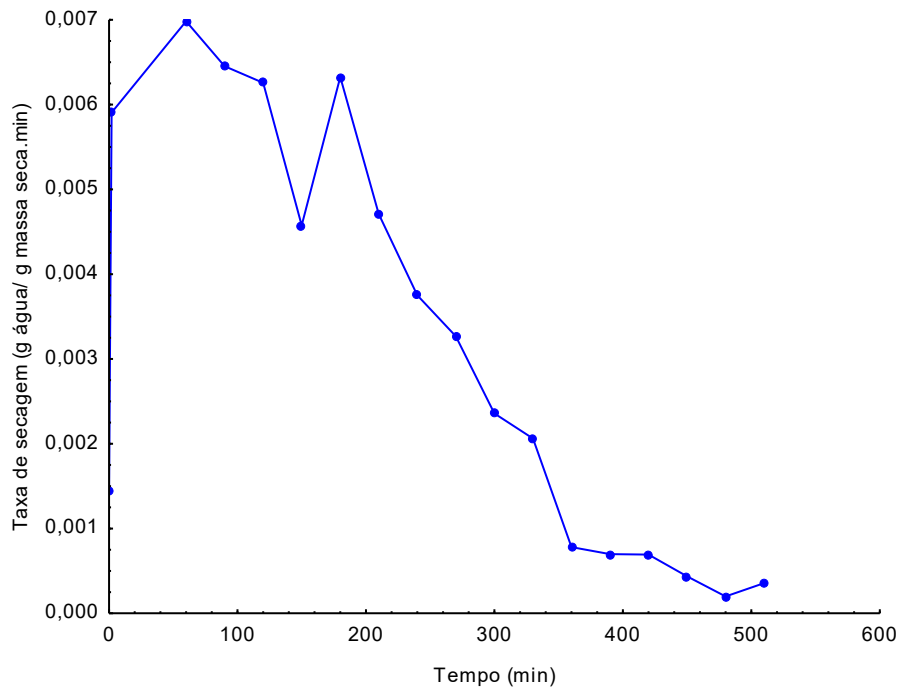


Figura 4.13 - Taxa de secagem em função do tempo de secagem em camada fina de feijão-caupi por exposição direta ao sol

Apresenta-se, na Tabela 4.9, o teor de água inicial e final das amostras de feijão-caupi secadas por exposição direta ao sol. Verificou-se que o produto iniciou a secagem com teor de água de 65,38% b.u. (1,8887 b.s.), chegando ao final da secagem a um teor de água de 15,38% b.u. (0,1818 b.s.), com perda de água de 76,48%. De maneira geral, a secagem por exposição direta ao sol das amostras de feijão-caupi foi eficiente e seguro para reduzir o teor de água.

Tabela 4.9 – Teor de água inicial e final e perda de água das amostras de feijão-caupi na secagem por exposição direta ao sol

Teor de água (% b.u.)		Perda de água (%)
Inicial	Final	
65,38	15,38	76,48

Doymaz (2011), estudando a secagem por exposição ao sol de feijão verde, verificou redução no conteúdo de água de 83,24%, superior à quantidade de água perdida pelas amostras de feijão-caupi em análise com teor de água inicial e final dos grãos de feijão verde de 89,5% b.u. (8,5238 b.s.) e 15,0% b.u. (0,1765 b.s.), respectivamente.

Observa-se, na Tabela 4.10, os parâmetros dos modelos de Page, Aproximação da Difusão, Verna, Logarítmico, Dois Termos, Henderson e Pabis, Lewis, Thompson, Exponencial de Dois Termos e Midilli ajustados aos pontos experimentais da cinética de secagem do feijão-caupi, por exposição direta ao sol, com os respectivos coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

Verificou-se que o modelo de Page, Aproximação da Difusão e Verna foram os que melhores se ajustaram aos dados de secagem do feijão-caupi, apresentando coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,990 e os mais baixos valores de DQM e χ^2 .

Os demais modelos matemáticos avaliados apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,92 e baixos valores de DQM e χ^2 , podendo também ser usados na predição da cinética de secagem por exposição direta ao sol do feijão-caupi, exceto o modelo Midilli que apresentou o menor R^2 , abaixo de 0,8.

Tabela 4.10 – Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados de secagem por exposição direta ao sol do feijão-caupi, coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM)

Modelo	Parâmetros						χ^2	R^2	DQM
	a	b	c	n	k	k_1			
Page	-	-	-	1,533763	0,0003	-	$0,95 \times 10^{-5}$	0,9973	0,0029
Aproximação da Difusão	-177,644	0,9935	-	-	0,0119	-	$2,1 \times 10^{-5}$	0,9968	0,0042
Verna	-10,4945	-	-	-	0,0126	0,0113	$2,1 \times 10^{-5}$	0,9968	0,0042
Logarítmico	1,32955	-	-0,234	-	0,0039	-	0,0008	0,9855	0,0258
Dois termos	0,5881	0,5588	-	-	0,0060	0,0060	0,0017	0,9610	0,0366
Henderson e Pabis	1,1469	-	-	-	0,0060	-	0,0015	0,9610	0,0366
Lewis	-	-	-	-	0,0053	-	0,0002	0,9399	0,0151
Thompson	-4524,81	4,9346	-	-	-	-	0,0002	0,9399	0,0151
Exponencial de Dois Termos	0,0019	-	-	-	2,7771	-	0,0002	0,9393	0,0152
Midilli	1,4136	-0,0016	-	0,0000	0,7222	-	0,0145	0,7620	0,1062

De acordo com os parâmetros avaliados, o modelo de Page foi o melhor para representação da secagem das amostras de feijão-caupi. Diversos pesquisadores observaram que o modelo de Page é um dos mais recomendados para predição da cinética de secagem de vários produtos agrícolas (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999; CORRÊA et al., 2007).

Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Ronoh et al. (2009) que ao ajustarem os modelos matemáticos as curvas de secagem por exposição direta ao sol de sementes de amaranto (*Amaranthus cruentus*) verificaram R^2 de 0,99 para o modelo de Page. Na Figura 4.14, estão ilustrados os dados das razões do teor de água em função do tempo observadas e estimadas pelo modelo de Page, para as amostras de feijão-caupi. Notou-se, por meio da correspondência entre os valores experimentais e estimados, que o modelo de Page descreveu adequadamente o fenômeno de secagem.

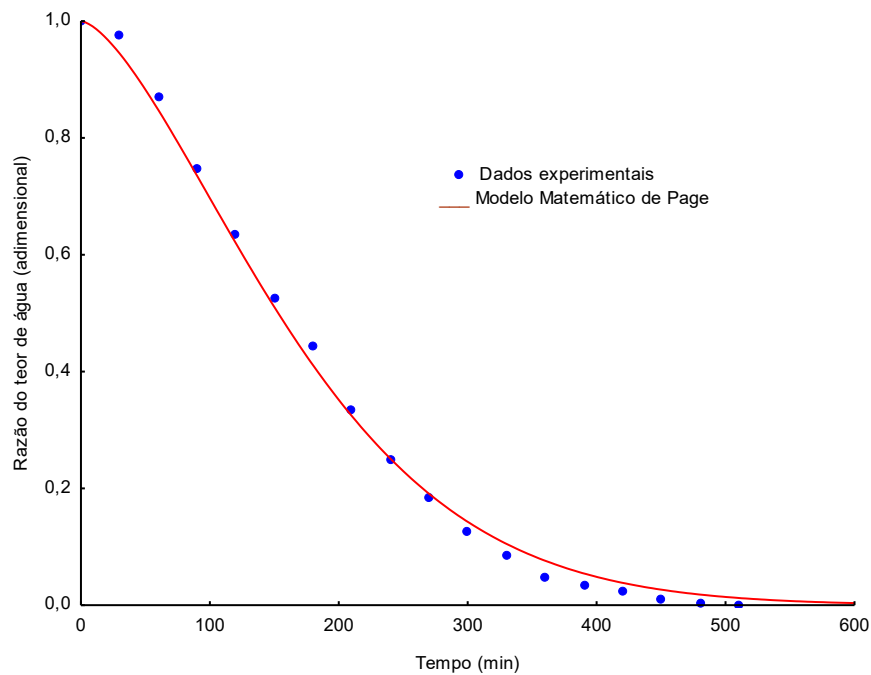


Figura 4.14 – Cinética de secagem por exposição direta ao sol do feijão-caupi com ajustes pelo modelo de Page

O valor do coeficiente de difusão efetivo e o coeficiente de determinação (R^2) das amostras de feijão-caupi, durante a secagem em exposição direta ao sol, foi de $7,18 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ e 0,8961, respectivamente com uma variação de temperatura de $28,30 \text{ }^\circ\text{C}$. Este valor foi superior a difusão efetivo do feijão-caupi no secador ACSN sendo de $5,84 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ com uma variação de temperatura de $20,40 \text{ }^\circ\text{C}$. O valor do coeficiente de difusão calculado para as amostras de feijão-caupi estão coerentes com os resultados na literatura para secagem de produtos agrícolas que, de acordo com Madamba et al. (1996), apresentam-se na ordem de 10^{-11} a $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

4.3.3 - Secagem em secador solar no período diurno (Experimento 5)

Deu-se início às secagens, aproximadamente, às 08:00 h da manhã e as mesmas prosseguiram até que as amostras de feijão-caupi atingissem o equilíbrio higroscópico com o ar de secagem. A secagem foi encerrada aproximadamente às 16:30 h. O tempo de secagem das amostras foi de 08:30 h (510 min).

Os valores médios dos parâmetros termodinâmicos do ambiente externo e interno estão apresentados na Tabela A.3 (Apêndice A).

Tem-se na Figura 4.15, os pontos experimentais da cinética de secagem do feijão-caupi em secador solar, expressos através da razão do teor de água em função do tempo de secagem. Observou-se que a razão do teor de água diminuiu com o tempo de secagem. As temperaturas e as umidades relativas do ambiente externo ao secador solar, durante o intervalo de realização da secagem solar, variaram de 24,00 a 40,00 °C e de 44,57 a 75%, respectivamente, e a temperatura e umidade relativa no interior do secador solar variaram de 32,5 a 82,5 °C e de 36,07 a 68,4%, respectivamente.

Ferreira et al. (2008) também verificaram redução de 50% no tempo de secagem, ao compararem a desidratação de grãos de café em chaminé solar e por exposição direta ao sol, em que a secagem em secador solar possibilitou menores tempos de secagem.

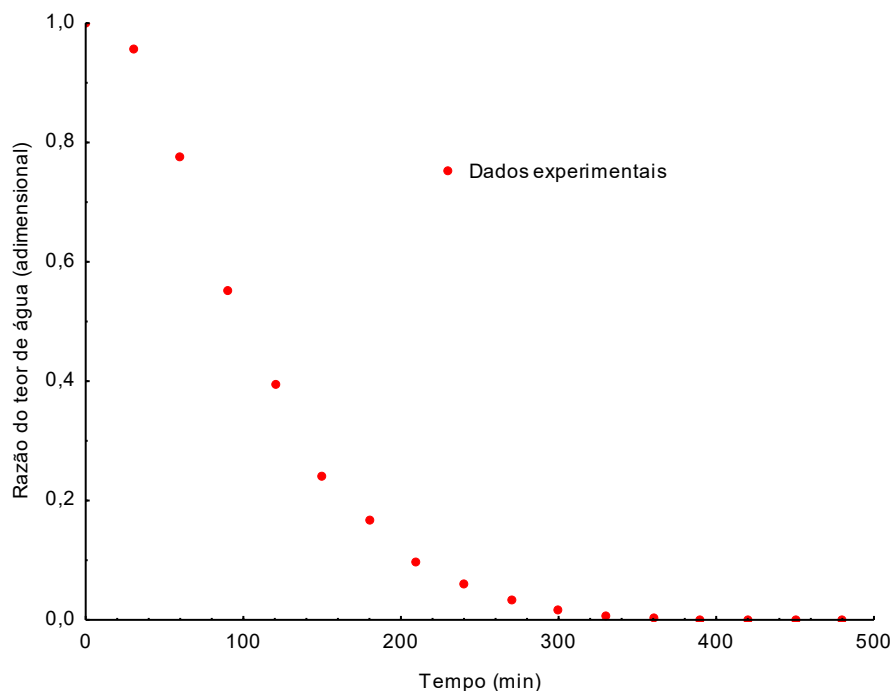


Figura 4.15 – Cinética de secagem do feijão-caupi em secador solar

Na Figura 4.16, tem-se os valores médios da taxa de secagem das amostras de feijão-caupi em secador solar e constatou-se que inicialmente a taxa de secagem apresenta uma fase de adaptação do material com a temperatura do ar de secagem, em que ocorre uma elevação gradual da temperatura da amostra e da pressão de vapor de água sem a perda de água. Observou-se também, que as maiores taxas de secagem foram verificadas no início das secagens, sendo diminuídas com a continuidade do processo. Não foi verificado período de taxa constante de secagem, transcorrendo todo o processo em taxa decrescente. Este fenômeno é comum e relatado na secagem de produtos agrícolas: amora (AKPINAR, 2008); pimenta verde (AKPINAR; BICER, 2008); grãos de café (RESENDE et al., 2009); folhas de hortelã e salsa (ZAKIPOUR; HAMIDI, 2011); uvas sem semente (ÇAKMAK; YILDIZ, 2011); grãos de feijão verde e quiabo (DOYMAZ, 2011), entre outros.

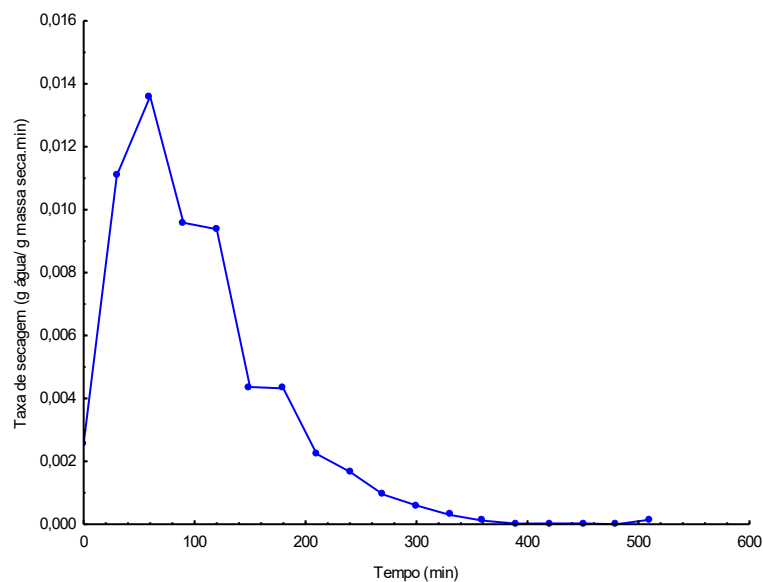


Figura 4.16 - Taxa de secagem da amostra de feijão-caupi em secador solar

Apresenta-se, na Tabela 4.11, o teor de água inicial e final das amostras de feijão-caupi secas em secador solar. Verificou-se que o produto iniciou a secagem com teor de água de 65,48% b.u. (1,8975 b.s.), chegando ao final da secagem a um teor de água de 6,75% b.u. (0,0725 b.s.), com perda de água de 89,69%. Midilli & Kucuk (2003) desidrataram em camada fina pistache com casca em secador solar e também encontraram porcentagem de redução de água superior a 70%. Ronoh et al. (2009) secaram em camada fina sementes de amaranto em secador solar e obtiveram redução de 89,06% no conteúdo de água.

Tabela 4.11 – Teor de água inicial e final das amostras de feijão-caupi desidratadas em secador solar

Teor de água (% b.u.)		Perda de água (%)
Inicial	Final	
65,48	6,75	89,69

Ao se comparar a secagem das amostras de feijão-caupi em secador solar e por exposição direta ao sol, verificou-se que a secagem em secador solar apresentou no final da secagem um teor de água de 6,75% b.u. (0,0725 b.s.) e a secagem por exposição direta ao sol apresentou no final da secagem um teor de água de 15,39 b.u. (0,1818 b.s.), constatando-se uma diferença de 8,64% b.u. de teor de água da secagem em secador solar em relação a secagem por exposição direta ao sol. Isto mostra uma redução no tempo de secagem e uma maior eficiência de um secador solar em relação à secagem por exposição direta ao sol. Vários fatores podem estar envolvidos nesta redução no tempo de secagem do secador solar em comparação com a secagem por exposição direta ao sol, sendo o mais provável a temperatura atingida no interior do secador solar no momento da desidratação, podendo em alguns dias chegar a mais de 90 °C.

Na Tabela 4.12 encontram-se os parâmetros dos modelos de Aproximação da Difusão, Verna, Page, Logarítmico, Dois termos, Henderson e Pabis, Lewis, Thompson, Exponencial de Dois Termos e Midilli ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem do feijão-caupi com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

Notou-se que os modelos da Aproximação da Difusão, Verna e Page foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais das secagens em secador solar de exposição direta, apresentando os maiores valores de R^2 superior a 0,990 e baixos valores de χ^2 e DQM. Viu-se ainda que todos os modelos matemáticos avaliados apresentaram valores de R^2 superiores a 0,93 e baixos valores de DQM e χ^2 , logo todos os modelos avaliados podem ser utilizados na predição da cinética de secagem do feijão-caupi, com exceção do modelo Midilli onde o valor de R^2 foi inferior a 0,80. Tunde-Akintunde (2011) e Ronoh et al. (2009) ao ajustaram o modelo de Page aos dados experimentais da secagem de pimenta malagueta e sementes de amaranto, respectivamente, também constataram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,990.

Tabela 4.12 – Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados as curvas de secagem do feijão-caupi em secador solar, coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM)

Modelo	Parâmetros						χ^2	R^2	DQM
	a	b	c	n	k	k ₁			
Aproximação da Difusão	-82,2574	0,9849	-	-	0,0196	-	$8,7 \times 10^{-8}$	0,9996	0,0002
Verna	-15,3240	-	-	-	0,0200	0,0187	$8,7 \times 10^{-8}$	0,9996	0,0002
Page	-	-	-	1,5685	0,0005	-	$4,9 \times 10^{-9}$	0,9968	$6,6 \times 10^{-5}$
Logarítmico	1,1867	-	-0,07039	-	0,0079	-	0,0011	0,9739	0,0301
Dois termos	0,5689	0,5689	-	-	0,0093	0,0093	0,0014	0,9643	0,0335
Henderson e Pabis	1,1378	-	-	-	0,0093	-	0,0012	0,9644	0,0335
Lewis	-	-	-	-	0,0084	-	1900×10^{-5}	0,9487	0,0042
Thompson	-4285,33	-	-	-	-	-	2000×10^{-8}	0,9487	0,0042
Exponencial de Dois Termos	0,0021	-	-	-	3,9577	-	$7,0 \times 10^{-37}$	0,9482	$7,9 \times 10^{-19}$
Midilli	1,3025	-0,0018	-	0,0000	0,7255	-	0,0122	0,7322	0,0967

Comparando os valores das constantes de secagem (k) do modelo de Page entre os Experimentos 3 (secador ACSN), 4 (exposição direta ao sol) e 5 (secador solar) verificou-se que o maior valor de k foi para a secagem no secador ACSN, indicando que a temperatura e a umidade relativa nestes experimentos podem ter influenciado nas secagens (CARLESSO et al., 2007).

Na Figura 4.17, estão ilustradas as razões do teor de água observadas e estimadas em função do tempo de secagem para as amostras de feijão-caupi, com ajustes pelo modelo de Aproximação da Difusão, considerado como um dos melhores dentre os testados. Notou-se, por meio da correspondência entre os valores experimentais e estimados, que o modelo da Aproximação da Difusão descreveu adequadamente o fenômeno de secagem.

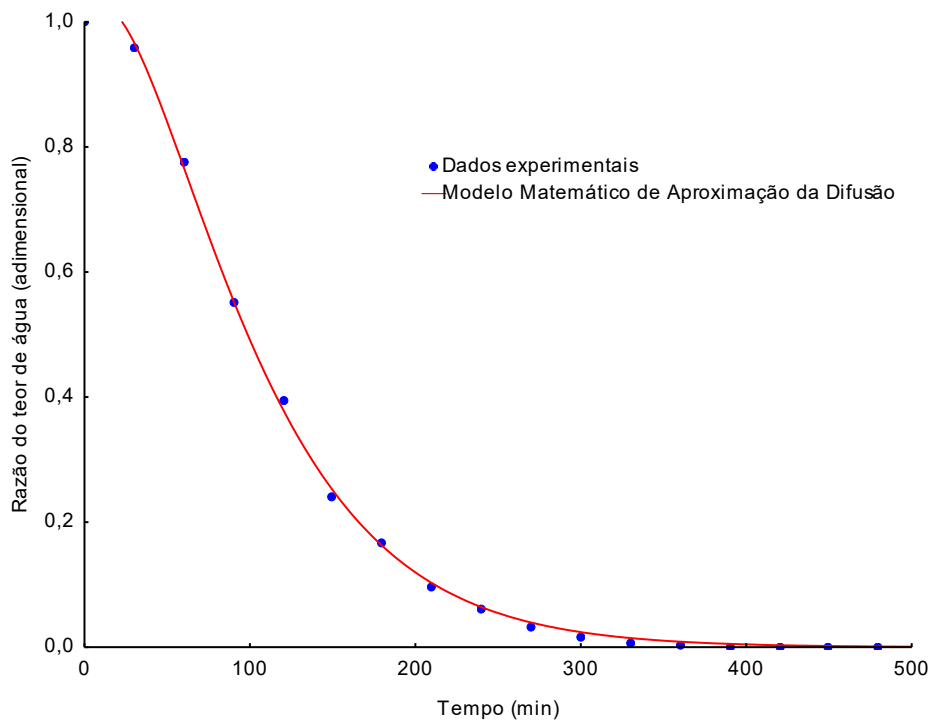


Figura 4.17 – Cinética de secagem em secador solar do feijão-caupi com ajuste pelo modelo de Aproximação da Difusão

O valor do coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) e o coeficiente de determinação (R^2) das amostras de feijão-caupi foi de $11,95 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ e 0,8992, respectivamente. Esse valor da D_{ef} foi superior ao do secador ACSN e a da secagem por exposição direta ao sol, indicando que neste secador solar a velocidade de secagem foi superior, devido a variação de temperatura ser maior dentro deste secador. Pesquisadores reportaram coeficientes de difusão efetivo na ordem de $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ para grãos de ervilha que variaram de $8,05 \times 10^{-11}$ até $1,97 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ (DOYMAZ; KOCAYIGIT, 2011); grãos de canola que variaram de $3,76 \times 10^{-11}$ até $8,46 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ (GAZOR; MOHSENIMANESH, 2010), entre outros.

4.3.4 – Secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem no período noturno no secador ACSN (Experimento 6)

Percebe-se na Figura 4.18 os pontos experimentais da cinética de secagem das amostras de feijão-caupi e de sua testemunha, secas por exposição direta ao sol no período diurno, combinada com a secagem em secador ACSN no período noturno. No período noturno a testemunha permanecia em abrigo na bancada do laboratório, com a finalidade de se avaliar a eficiência do secador ACSN.

A primeira etapa de secagem, corresponde à desidratação por exposição direta ao sol, iniciada aproximadamente às 08:30 h e encerrada 16:30 h, quando as amostras foram conduzidas a desidratação no secador ACSN ou foram abrigadas em laboratório; a segunda etapa de secagem, corresponde à desidratação em secador noturno (ACSN) no qual foi iniciada aproximadamente às 16:30 h e encerrada aproximadamente às 08:00 h da manhã do dia seguinte; a terceira etapa de secagem, corresponde ao segundo dia de desidratação por exposição direta ao sol, no qual foi iniciada aproximadamente às 08:00 h e encerrada às 16:30 h; a quarta etapa de secagem, corresponde à desidratação em secador noturno (ACSN) e abrigadas em laboratório a qual foi iniciada aproximadamente às 16:30 h e encerrada às 08:00 h da manhã seguinte, no qual atingiu o teor de água de equilíbrio e a quinta etapa de secagem, corresponde à desidratação por exposição direta ao sol somente para as amostras testemunhas, na qual se encerrou a secagem quando atingido o teor de água de equilíbrio, às 16:00 h.

Os valores médios dos parâmetros termodinâmicos do ambiente externo e interno estão apresentados na Tabela A.4.e A.5 (Apêndice A).

Durante a realização das secagens as temperaturas e umidades relativas do ambiente externo variaram de 25,00 a 36,00 °C e 42,79 a 74,85%, respectivamente, para a secagem diurna e de 23 a 27 °C e 55,11 a 95,03%, respectivamente, para a secagem noturna. A temperatura e a umidade relativa no interior de secador ACSN variaram de 28,33 a 55,6 °C e 41,87 a 74,65%, respectivamente. O tempo necessário para que a amostra de feijão-caupi atingisse o teor de água de equilíbrio foi de 42,5 h (2550 min) e o tempo necessário para que a testemunha atingisse o equilíbrio foi de 54,5 h (3270 min).

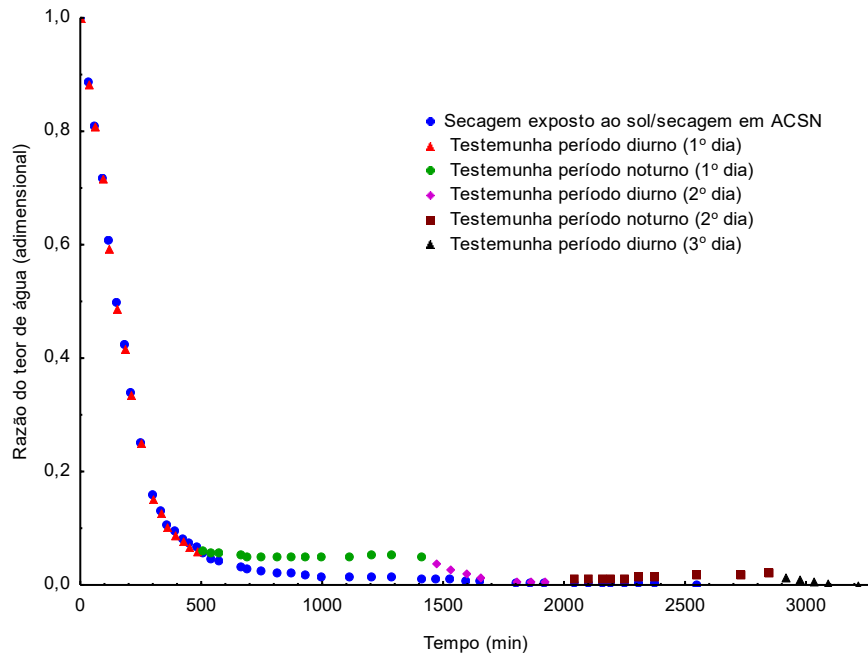


Figura 4.18 – Secagem do feijão-caupi por exposição direta ao sol combinada com secagem noturna em secador ACSN ou em abrigo do laboratório (Testemunha)

Como se verifica na Figura 4.18, no período diurno, referente ao primeiro dia de secagem, ambas as amostras perderam água em uma velocidade próxima, tendo em vista que as mesmas estavam expostas as condições semelhantes durante a secagem por exposição direta ao sol. Ao final do primeiro dia de secagem, 480 min após o início das secagens, os valores médios de RX eram em torno 0,0715 para as amostras e testemunhas do feijão-caupi.

No período noturno a amostra foi conduzida ao secador ACSN para prosseguimento da secagem e a testemunha foi colocada em abrigo, exposta às condições ambientais do interior do laboratório, descritas anteriormente. Observou-se que as amostras no secador ACSN continuaram a perder água com o tempo de secagem.

O teor de água absorvido pela testemunha pode ser atribuído à elevada umidade relativa do ambiente (95,03%). Ao final da secagem noturna (1410 min do início), o valor médio de RX da amostra foi de 0,0127, evidenciando continuidade do processo de secagem no período noturno, enquanto que a testemunha apresentou valor médio de RX de 0,0511. Este resultado demonstra a eficiência do secador ACSN para prosseguimento da secagem no período noturno.

No período diurno, referente ao segundo dia de secagem por exposição direta ao sol (após 1920 min do início da secagem), a amostra de feijão-caupi continuou a perder água com o decorrer do tempo de secagem e a testemunha, que havia absorvido água no período noturno, também perdeu água com o prosseguimento da desidratação. Os valores médios de RX foram de 0,0041 e 0,0774 para as amostras do secador ACSN e testemunhas, respectivamente. No período noturno referente ao segundo dia, a amostra foi acondicionada no secador ACSN, finalizando a secagem com o valor final de RX de 0,0000 em 2550 min e a testemunha, colocada em abrigo, atingindo o valor de RX de 0,0204 em 2859 min.

No período diurno, referente ao terceiro dia de secagem por exposição ao sol, a testemunha, que havia absorvido água no período noturno, finalizou a secagem com o valor de RU de 0,0000 em 3270 min.

Na Figura 4.19 são apresentados os valores das taxas de secagem das amostras expostas diretamente ao sol combinado com secagem em secador ACSN e sua testemunha. Verificou-se inicialmente que a taxa de secagem apresenta uma fase de adaptação do material com a temperatura do ar de secagem, em que ocorre uma elevação gradual da temperatura da amostra e da pressão de vapor de água sem a perda de água. Observou-se também, que as maiores taxas de secagem foram verificadas no início das secagens, sendo diminuídas com a continuidade do processo. No final do processo, a água se encontrou fortemente ligada, necessitando de maior energia para a sua evaporação, resultando em menores valores de taxas de secagem. Notou-se que as taxas de secagem para as amostras da testemunha apresentaram ligeiro aumento no mesmo intervalo de tempo. Em todas as amostras foi observado taxas de secagem mais acentuadas nos primeiros 400 min, que correspondem a perdas de água maiores, corroborando com resultados que associam maior demanda energética a etapas finais de secagem (SACILIK, 2007; NUTHONG et al., 2011; JITTANIT, 2011; SANTOS et al., 2012, 2013).

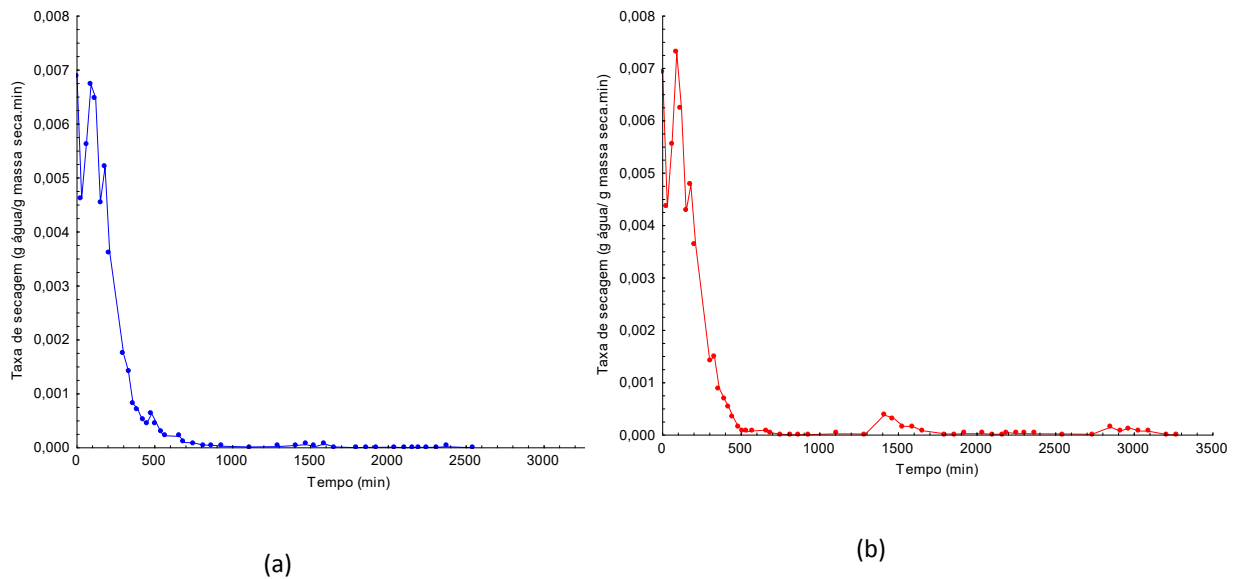


Figura 4.19 – Taxa de secagem das amostras de feijão-caupi por exposição direta ao sol combinada com secagem noturna em secador ACSN (a) e testemunha (b)

Observa-se na Tabela 4.13, o teor de água inicial e final das amostras de feijão-caupi na secagem por exposição direta ao sol combinada com a secagem em secador ACSN e para a testemunha, e as perdas de água nas cinco etapas de secagem.

Tabela 4.13 - Teor de água inicial e final das amostras de feijão-caupi secas por exposição direta ao sol combinada com secagem em ACSN e da testemunha, em cinco etapas

Etapa	Produto	Secagem por exposição ao sol			Secagem ACSN	
		Teor de água (% b.u.)		Perda de água (%)	Teor de água (% b.u.)	
		Inicial	Final		Inicial	Final
Primeira (dia)	Amostra	65,42	16,12	75,36	-	-
	Testemunha	65,08	16,02	75,38	-	-
Segunda (noite)	Amostra	-	-	-	16,12	8,69
	Testemunha	-	-	-	16,02	14,64
Terceira (dia)	Amostra	8,69	7,37	15,19	-	-
	Testemunha	14,64	8,55	41,60	-	-
Quarta (noite)	Amostra	-	-	-	7,37	6,72
	Testemunha	-	-	-	8,55	10,45
Quinta (dia)	Amostra	-	-	-	-	-
	Testemunha	10,45	7,44	28,80	-	-

Notou-se que as amostras de feijão-caupi iniciaram a secagem com teor de água inicial de 65,42 b.u. (1,8920 b.s.) e ao final da desidratação no primeiro dia apresentaram teores de 16,12% b.u. (0,1922 b.s.), por exposição direta ao sol e 16,02% b.u. (19,09%) para a testemunha. Neste primeiro momento da secagem ambos os produtos foram secados por exposição direta ao sol, o que justifica o teor de água final semelhante. Viu-se ainda que a porcentagem de perda de água foi próxima entre a amostras e a testemunha, correspondendo a 75,36 e 75,38%, respectivamente, uma vez que, ambas as amostras estavam sob as mesmas condições ambientais.

Uma vez que as amostras de feijão-caupi e testemunha não haviam atingido o teor de água de equilíbrio desejado na primeira etapa da secagem (Exposição direta ao sol), o processo de desidratação foi continuado à noite. Analisando-se o teor de água inicial e final das amostras e testemunha, referente a segunda etapa de secagem que corresponde a desidratação no período noturno onde as amostras foram conduzidas ao secador ACSN permanecendo durante toda a noite, enquanto as testemunhas foram direcionadas ao abrigo na bancada do laboratório, observou-se que as amostras continuaram a perder água durante a noite com redução do teor de água atingindo o valor de 8,69% b.u. (0,0952 b.s.), enquanto as testemunhas perderam apenas 14,64% do seu valor do teor de água.

Como as amostras em secador ACSN e as testemunhas não haviam atingido o teor de água de equilíbrio ao final da secagem, deu-se a continuidade à terceira etapa de secagem, onde as amostras e testemunhas voltaram para desidratação ao sol.

As amostras do secador ACSN continuaram a perder água, com redução do teor de água para 7,37% b.u. (0,0796 b.s.), enquanto as testemunhas tiveram redução do teor de água para 8,55% b.u. (0,0936 b.s.).

Uma vez que as amostras do ACSN e testemunha não haviam atingido o teor de água de equilíbrio desejado na terceira etapa da secagem (expostas ao sol), o processo de desidratação foi continuado à noite em secador ACSN, no qual estas amostras atingiram o teor de água final de 6,72% b.u. (7,21%), finalizando a secagem, e perda de água de 8,82%, enquanto a testemunha absorveu água atingindo o teor de água de 10,45% b.u. (0,1167 b.s.), com ganho de água de 22,22%.

Devido ao teor de água da testemunha não atingir o equilíbrio, esta foi exposta ao sol na quinta etapa de secagem, onde finalizou com teor de água de 7,44% b.u. (0,0804 b.s.), com perda de água de 28,80%. Ao final do processo de secagem, as amostras e as testemunhas tiveram perda de água correspondendo a 89,73 e 88,57%,

respectivamente, estando próximos ao resultado de Doymaz (2011), que relatou perda de água de 83,24% em grãos de feijão.

Pode-se verificar na Tabela 4.14, os parâmetros dos ajustes dos modelos de Aproximação da Difusão, Page, Verna, Logarítmico, Dois Termos, Henderson e Pabis, Thompson, Lewis, Exponencial de Dois Termos e Midilli aos dados experimentais da cinética de secagem do feijão-caupi por exposição direta ao sol combinada as amostras em secador ACSN e de sua testemunha, com seus respectivos parâmetros dos modelos matemáticos, qui-quadrado (χ^2), coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

Verificou-se que o modelo de Aproximação da Difusão foi um dos que melhor se ajustaram aos dados experimentais da secagem por exposição direta ao sol, no período diurno, combinada com secagem em secador ACSN, no período noturno, das amostras de feijão-caupi. Este modelo apresentou valor de R^2 superior a 0,990 e baixos valores de DQM e χ^2 . Para as amostras da testemunha, o modelo de Aproximação da Difusão foi um dos melhores que se ajustou aos dados experimentais.

Observou-se que todos os modelos matemáticos avaliados apresentaram valores de R^2 superiores a 0,80, podendo ser utilizados na predição da cinética de secagem das amostras e testemunhas de feijão-caupi. Doymaz (2011) estudou secagem ao sol de quiabo e obteve bons ajustes utilizando os modelos empregados neste trabalho. Clement et al. (2009) investigaram a secagem ao sol de sementes de cacau fermentadas e obtiveram ajustes com R^2 superiores a 0,94 para os modelos Dois Termos, Page e Thompson.

Tabela 4.14 – Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados de secagem do feijão-caupi por exposição direta ao sol combinada com secagem noturna em secador ACSN ou testemunha, colocada em abrigo no laboratório, coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM)

Modelo	Parâmetros						χ^2	R^2	DQM
	a	B	c	n	k	k ₁			
Aproximação da difusão									
Amostra	-0,6164	0,4593	-	-	0,0154	-	0,01x10 ⁻¹⁵	0,9976	0,33x10 ⁻⁸
Testemunha	-0,3273	0,3150	-	-	0,0203	-	4,5x10 ⁻⁷	0,9879	0,0006
Page									
Amostra	-	-	-	1,2631	0,0012	-	4,9x10 ⁻²⁴	0,9971	0,02x10 ⁻¹⁵
Testemunha	-	-	-	1,2193	0,0015	-	4,4x10 ⁻⁷	0,9868	0,0006
Verna									
Amostra	0,5000	-	-	-	0,0051	0,0051	10x10 ⁻¹⁴	0,9882	3,1x10 ⁻⁷
Testemunha	-0,3290	-	-	-	0,0202	0,0064	5,0x10 ⁻⁷	0,9879	0,0006
Logarítmico									
Amostra	1,0671	-	0,0018	-	0,0055	-	0,0001	0,9916	0,0102
Testemunha	1,0485	-	0,0204	-	0,0057	-	0,0001	0,9882	0,0100
Dois Termos									
Amostra	0,5340	0,5340	-	-	0,0054	0,0054	0,0001	0,9915	0,0101
Testemunha	0,5295	0,5295	-	-	0,0054	0,0054	7,6x10 ⁻⁵	0,9836	0,0083
Henderson e Pabis									
Amostra	1,0681	-	-	-	0,0054	-	0,0001	0,9915	0,0101
Testemunha	1,0591	-	-	-	0,0054	-	7,3x10 ⁻⁵	0,9836	0,0083
Thompson									
Amostra	-4909,3	5,0228	-	-	-	-	9,7x10 ⁻¹⁴	0,9882	3,0x10 ⁻⁷
Testemunha	-4586,46	4,8177	-	-	-	-	4,4x10 ⁻⁷	0,9811	0,0006
Lewis									
Amostra	-	-	-	-	0,0051	-	9,4x10 ⁻¹⁴	0,9882	3,4x10 ⁻⁷
Testemunha	-	-	-	-	0,0050	-	4,3x10 ⁻⁷	0,9811	0,0006
Exponencial de Dois Termos									
Amostra	0,0025	-	-	-	2,0126	-	10x10 ⁻¹⁴	0,9880	3,1x10 ⁻⁷
Testemunha	0,0032	-	-	-	1,5646	-	4,4x10 ⁻⁷	0,9808	0,0006
Midilli									
Amostra	1,0000	0,0000	-	1,0704	0,6217	-	3,9x10 ⁻⁵	0,8430	0,0059
Testemunha	1,0954	0,0000	-	0,9161	0,0088	-	0,0002	0,9826	0,0139

Na Figura 4.20, estão ilustrados as razões do teor de água observadas e estimadas, pelo modelo de Aproximação da Difusão, para as amostras de feijão-caupi.

Notou-se, por meio da correspondência entre os valores experimentais e estimados, que o modelo da Aproximação da Difusão descreve adequadamente o fenômeno de secagem.

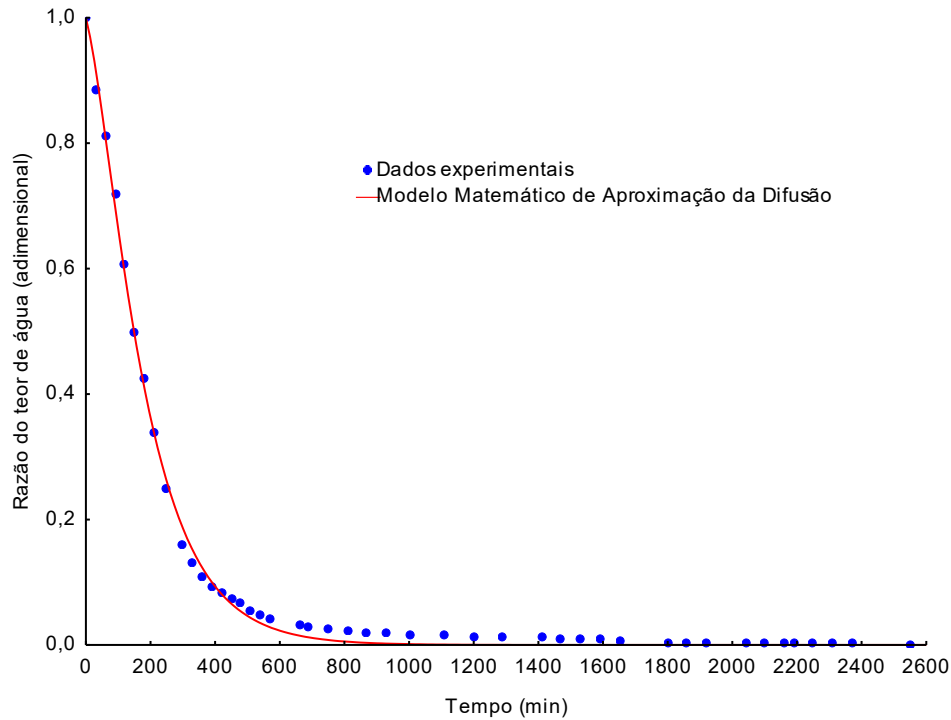


Figura 4.20 – Cinética de secagem por exposição ao sol combinada com secagem noturna em secador ACSN do feijão-caupi com ajuste pelo modelo de Aproximação da Difusão

Na Figura 4.21, estão ilustrados as razões do teor de água observadas e estimadas, pelo modelo de Aproximação da Difusão, para a testemunha de feijão-caupi. Notou-se, por meio da correspondência entre os valores experimentais e estimados, que o modelo de Aproximação da Difusão descreve adequadamente o fenômeno de secagem.

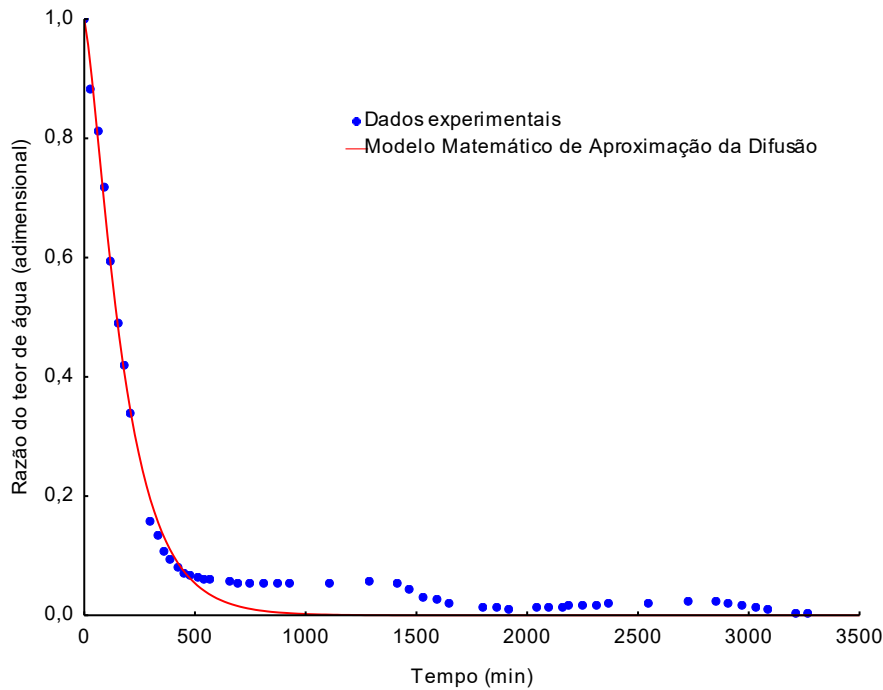


Figura 4.21 – Cinética de secagem por exposição ao sol combinada com secagem noturna em abrigo no laboratório do feijão-caupi com ajuste pelo modelo de Aproximação da Difusão

Na Tabela 4.15 tem-se os valores dos coeficientes de difusão efetivo (D_{ef}) e os coeficientes de determinação (R^2) das amostras de feijão-caupi da secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN e da testemunha. Verificou-se que o valor da D_{ef} na secagem combinada foi superior a secagem realizada apenas no secador ACSN (Experimento 3), ficando com o valor da D_{ef} inferior a secagem no secador solar (Experimento 5) e a secagem por exposição direta ao sol (Experimento 4).

De acordo com Jittanit (2011) coeficiente de difusão efetivo indica a rapidez com que a água pode ser transferida do interior para a superfície do produto. Produtos agrícolas diversos apresentam difusão efetivo com magnitude de 10^{-9} a 10^{-11} m^2/s , a exemplo de soja (NIAMNUY et al., 2012), sementes de feijão-caupi (CAMICIA et al., 2015) e sementes feijão-caupi (MORAIS et al., 2013).

Tabela 4.15 – Valores do coeficiente de Difusão efetivo (D_{ef}) e do coeficiente de determinação (R^2) obtidos para a amostra e testemunha de feijão-caupi para a secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN

Feijão-caupi	Amostra	Testemunha (abrigo)
Coeficiente de Difusão efetivo (m^2s^{-1})	$6,98 \times 10^{-11}$	$6,84 \times 10^{-11}$
Coeficiente de determinação (R^2)	0,9451	0,9370

4.3.5 - Secagem em secador ACSN ou abrigo durante a noite combinada com secagem em secador solar durante o dia (Experimento 7)

Na Figura 4.22 estão visualizados os pontos experimentais das curvas de secagem da amostra do feijão-caupi, desidratada em secador ACSN no período noturno, combinado com secagem em secador solar no período diurno, com as testemunhas abrigadas no período noturno em bancada de laboratório.

A primeira etapa de secagem, correspondente à desidratação em secador ACSN foi iniciada aproximadamente às 16:30 h e encerrada aproximadamente às 08:00 h do dia seguinte, quando as amostras, inclusive as testemunhas, abrigadas em laboratório, foram conduzidas a desidratação em secador solar, a segunda etapa de secagem, referente à etapa de desidratação em secador solar, foi iniciada aproximadamente às 08:00 h e encerrada aproximadamente às 16:30 h para as amostras de feijão-caupi e testemunha (1440 min após o início da secagem), quando atingiram o teor de água de equilíbrio.

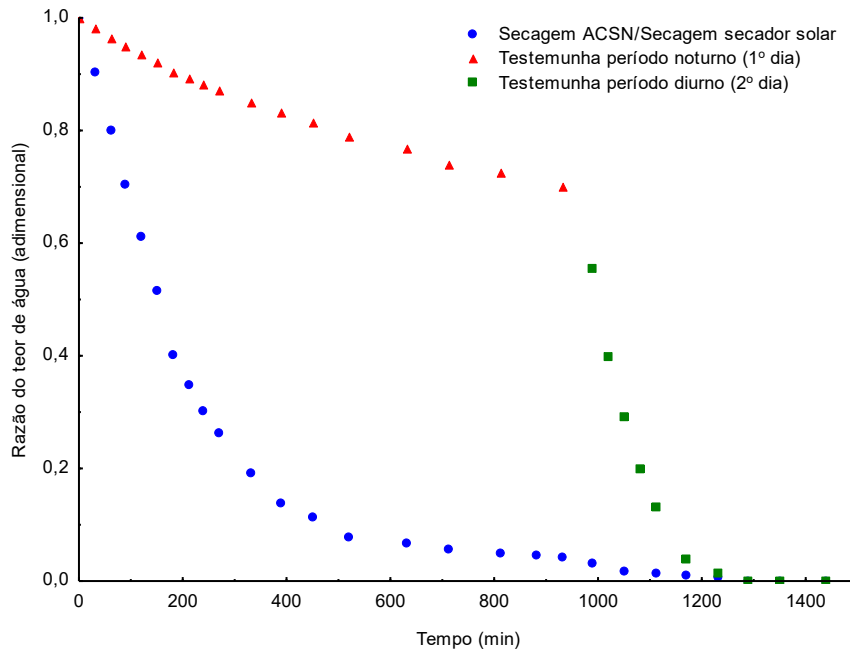


Figura 4.22 - Secagem do feijão-caupi em secador noturno ACSN ou colocados em abrigo no período noturno (testemunha) combinada com secagem em secador solar

Os valores médios dos parâmetros termodinâmicos do ambiente externo e interno estão apresentados na Tabela A.6. e A.7 (Apêndice A).

Durante a realização das secagens, as temperaturas e as umidades relativas do ambiente externo variaram de 23 a 28 °C e de 59,07 a 96,10%, respectivamente, para a secagem noturna, variaram de 26 a 32 °C e 41,30 a 80,78%, respectivamente, para a secagem diurna; as temperaturas e as umidades relativas durante à noite no interior da câmara de secagem do secador ACSN variaram de 37 a 52,66 °C e 26,43 a 69,56%, respectivamente, e as temperaturas e umidades no interior do secador solar durante o dia variaram de 39,30 a 71,60 °C e de 25,06 a 48,70%, respectivamente.

No período noturno, referente à primeira etapa da secagem (Figura 4.22), verificou-se que o produto que estava no secador ACSN perdeu água com maior velocidade do que a testemunha, abrigada na bancada do laboratório. Ao final da primeira etapa da secagem, 930 min após o seu início, os valores médios de RX eram de 0,0436 e 0,7028 para as amostras do secador ACSN e a testemunha, respectivamente.

No período diurno a amostra proveniente do secador ACSN e a testemunha foram colocadas no secador solar para a continuação do processo e observou-se que as amostras do secador ACSN continuaram a perder água, no entanto, em velocidade inferior à verificada para a testemunha, que havia perdido menos água no período

noturno; a secagem foi interrompida quando todas as amostras atingiram o teor de água de equilíbrio, aos 1440 min (24:00 h) do início da secagem.

Na Figura 4.23, são apresentados os valores das taxas de secagem em função do tempo em secador ACSN combinada com a secagem em secador solar e de sua testemunha. A testemunha foi representada em duas partes: testemunha 1 (secagem no abrigo) e testemunha 2 (secagem em secador solar), pois apresentam comportamentos diferentes. Verificou-se inicialmente que a taxa de secagem apresenta uma fase de adaptação do material com a temperatura do ar de secagem, em que ocorre uma elevação gradual da temperatura da amostra e da pressão de vapor de água sem a perda de água. Observou-se que as maiores taxas de secagem, para as amostras analisadas, ocorreram no início da secagem. Inicialmente as taxas das amostras sob secagem em secador ACSN e as taxas da testemunha 2 (secagem em secador solar) apresentaram maiores valores do que as taxas iniciais da testemunha 1 (secagem em abrigo), devido as fontes de secagem oferecerem maior energia ao longo do tempo para as amostras e a testemunha 2. No final da secagem, a água se encontra fortemente ligada, necessitando de maior energia para a sua evaporação. Nas amostras secas em ACSN e testemunha 2 notou-se perda mais acentuada de umidade nos primeiros 200 min, enquanto para a testemunha 1 a perda é mais acentuada nos primeiros 400 min.

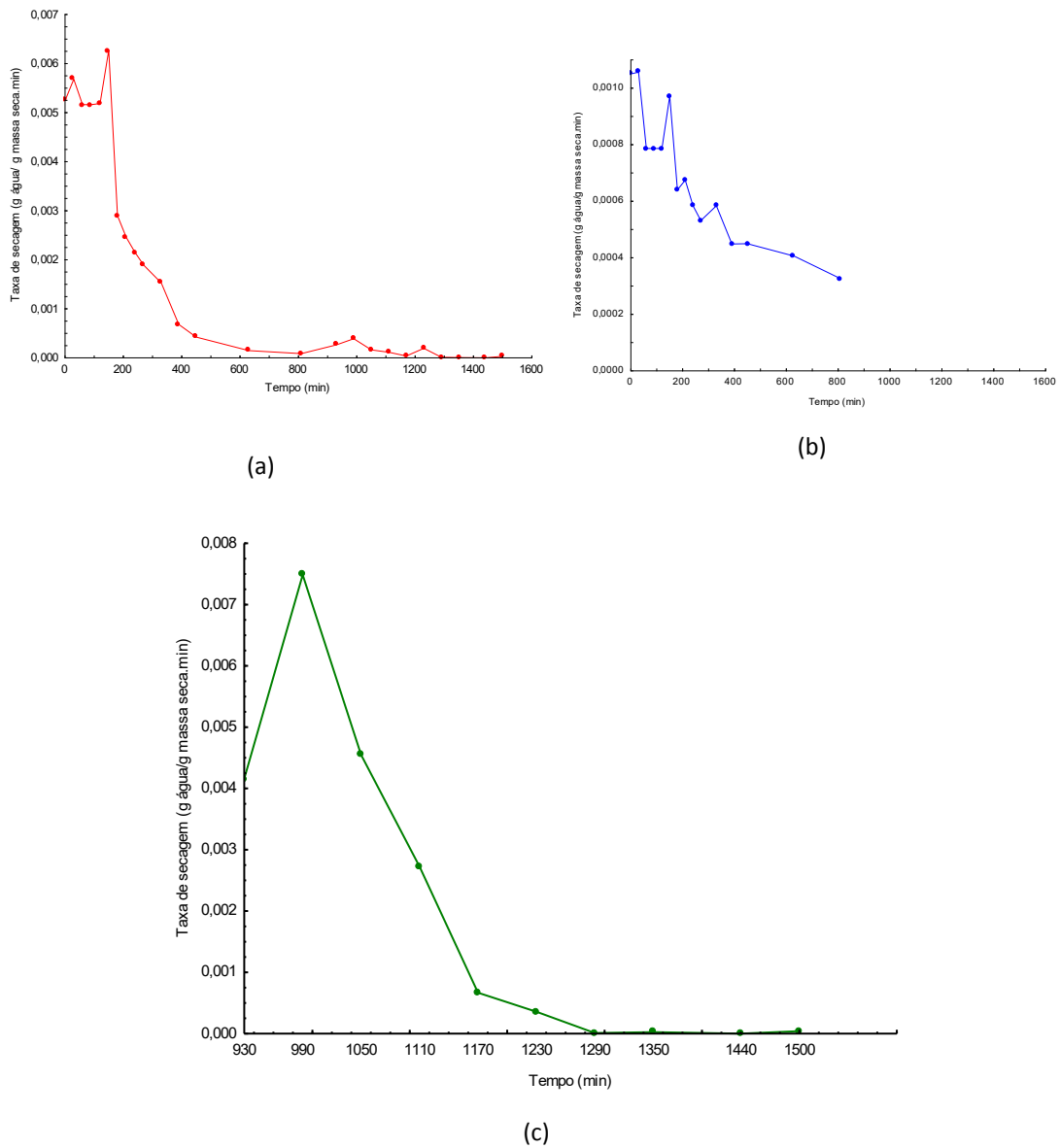


Figura 4.23 - Taxas de secagem da amostra de feijão-caupi em: secador ASCN combinada com secagem em secador solar (a); testemunha1 - amostra mantida em abrigo (noite) (b); e testemunha 2 - amostra mantida em abrigo (noite) e seca em secador solar (dia) (c)

Observa-se, na Tabela 4.16, o teor de água inicial e final das amostras e testemunhas desidratadas em secador ACSN e em secador solar referente à primeira e segunda etapa de secagem.

Tabela 4.16 – Teor de água inicial e final das amostras de feijão-caupi secas em secador ACSN combinada com secador solar e testemunha na primeira e segunda etapas de secagem

Etapa	Produto	Secagem no ACSN		Secagem no secador solar			
		Teor de água (% b.u.)		Perda de água (%)	Teor de água (% b.u.)		Perda de água (%)
		Inicial	Final		Inicial	Final	
Primeira (noite)	Amostra	62,76	10,69	82,97	-	-	-
	Testemunha	62,76	55,75	11,17	-	-	-
Segunda (dia)	Amostra	-	-	-	10,69	4,60	56,97
	Testemunha	-	-	-	55,75	5,72	89,74

Constatou-se que as amostras do secador ACSN e da testemunha iniciaram a secagem com teor de água inicial de 62,76% b.u. (1,6856 b.s.) e ao final da desidratação apresentaram teor de água de 10,69% b.u. (0,1197 b.s.), para a amostra de feijão-caupi e 55,75% b.u. (1,2599 b.s.) para a testemunha; ao final dessa primeira etapa de secagem as amostras de feijão-caupi e testemunha apresentaram perdas de água de 82,97% e 11,17%, respectivamente. Percebeu-se que as amostras que permaneceram no secador ACSN no período noturno, apresentaram maior porcentagem de perda de água ao final dessa etapa de desidratação, demonstrando a eficiência do secador ACSN para secagem noturna.

Uma vez que, as amostras de feijão-caupi e a testemunha não haviam atingido o teor de água de equilíbrio ao final da secagem no secador ACSN, deu-se continuidade à segunda etapa de desidratação, agora no período diurno, com secador solar. Observou-se que, ao final da secagem, a amostra do secador ACSN atingiu o teor de água de equilíbrio de 4,60% b.u. (0,0482 b.s.), com uma perda de água de 56,97%; já a testemunha apresentou porcentagem de perda de água de 89,74%, superior à da amostra do ACSN, uma vez que, no período noturno havia perdido menos água e no dia seguinte sofreu uma variação de temperatura maior dentro do secador solar; no entanto, seu teor de água final de 5,72% b.u. (0,0607 b.s.) foi um pouco superior ao teor de água final da amostra do ACSN. Comparando o teor de água final da amostra do ACSN e da testemunha, verificou-se diferença de 1,12% entre as amostras. Diógenes (2010) desidratou grãos de abóbora no período noturno em secador ACSN, de construção assemelhada ao do presente estudo, e também observou que a amostra perdeu maior

porcentagem de água que a testemunha, sendo os conteúdos de perda de água de 74,44 e 42,44% para as amostras do ACSN e testemunha, respectivamente.

Observa-se na Tabela 4.17 os parâmetros dos modelos de Midilli, Aproximação da Difusão, Verna, Page, Logarítmico, Dois Termos, Henderson e Pabis, Thompson, Lewis e Exponencial de Dois Termos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem das amostras de feijão-caupi e suas testemunhas, com seus respectivos parâmetros, coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e desvios quadráticos médios (DQM). Nas testemunhas, identificadas pelos termos “Testemunha 1 noite” e “Testemunha 2 dia”, os ajustes foram feitos por trechos, onde se ajustou os modelos matemáticos aos dados da cinética de secagem referentes à secagem noturna em secador ACSN e posteriormente aos dados da desidratação diurna em secador solar. A justificativa para esse ajuste por partes é que as secagens processadas à noite e durante o dia são muito distintas entre si. Enquanto que durante a noite têm-se umidades relativas altas e temperaturas relativamente mais baixas, durante o dia, no secador solar, conseguiu-se obter temperaturas elevadas e conseqüentemente umidades relativas mais baixas.

Pôde-se verificar que os modelos da aproximação da Difusão, Verna e Midilli apresentaram os melhores ajustes, com R^2 superiores a 0,99 e baixos valores de DQM e χ^2 para a secagem das amostras de feijão-caupi em secador ACSN no período noturno.

Verificou-se que todos os modelos testados podem ser usados para estimar os dados experimentais da secagem das amostras de feijão-caupi e para a Testemunha 1 em secador ACSN no período noturno, combinado com secagem em secador solar no período diurno, apresentando valores de R^2 superiores a 0,90 e baixos valores de DQM e χ^2 . Observou-se que o modelo de Aproximação da Difusão foi o melhor modelo para representar a Testemunha 1. Verificou-se também, que para a Testemunha 2, apenas os modelos matemáticos de Dois Termos, Henderson e Pabis, Midilli e Aproximação da Difusão apresentaram bons ajustes, indicando valores de R^2 superiores a 0,98 e baixos valores de DQM e χ^2 , podendo ser utilizados na predição da cinética de secagem.

Esses resultados corroboram com Santos et al. (2013) que ao ajustarem os modelos de Page, Dois Termos, Midilli e Thompson aos dados experimentais da cinética de secagem de urucum em secador ACSN ou abrigo no período noturno combinada com secagem em secador solar no período diurno, verificaram R^2 superiores a 0,92 e valores baixos de DQM.

Tabela 4.17 – Parâmetros dos modelos ajustados aos dados de secagem do feijão-caupi em secador ACSN combinado com secagem em secador solar, qui-quadrado (χ^2), coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

Modelo	Parâmetros						χ^2	R^2	DQM
	a	b	c	n	k	k ₁			
Midilli									
Amostra	1,0128	0,0000	-	1,1238	0,0024	-	25x10 ⁻⁶	0,9971	0,0045
Testemunha 1	1,0002	0,0001	-	0,8649	0,0013	-	0,37x10 ⁻⁶	0,9996	0,0005
Testemunha 2	0,0000	0,0000	-	0,7969	3707,2	-	8,1x10 ⁻⁵	0,9934	0,0063
Aproximação da Difusão									
Amostra	-0,1228	0,1563	-	-	0,0340	-	0,13x10 ⁻⁷	0,9971	0,0001
Testemunha 1	0,0882	0,0642	-	-	0,0043	-	0,47x10 ⁻⁶	0,9998	0,0001
Testemunha 2	-9223,1	0,0134	-	-	0,7293	-	8,7x10 ⁻⁵	0,9834	1,1180
Verna									
Amostra	-0,1230	-	-	-	0,0339	0,0053	0,13x10 ⁻⁷	0,9971	0,0001
Testemunha 1	0,0250				0,1685	0,0003	19x10 ⁻⁶	0,9890	0,0039
Testemunha 2	-0,2112				0,0009	0,0003	0,0140	0,6334	0,0936
Page									
Amostra	-	-		1,1272	0,0023	-	0,01x10 ⁻⁷	0,9961	3,8x10 ⁻⁵
Testemunha 1	-	-		0,7880	0,0016	-	1,4x10 ⁻⁵⁰	0,9988	1,1x10 ⁻²⁵
Testemunha 2	-			1,0809	0,0008		0,0199	0,2912	0,1222
Logarítmico									
Amostra	1,0328		0,0100	-	0,0050		5,3810	0,9958	0,0090
Testemunha 1	0,4037		0,5922	-	0,0013		2,0x10 ⁻⁶	0,9990	0,0012
Testemunha 2	4,0959		-2,179		0,0004		0,0097	0,7069	0,0781
Dois Termos									
Amostra	0,5196	0,5196	-	-	0,0048	0,0048	77x10 ⁻⁶	0,9954	0,0080
Testemunha 1	0,5728	0,5828	-	-	-0,000	0,0012	3,6x10 ⁻⁶	0,9988	0,0016
Testemunha 2	37337,7	73052,			197,24	0,0118	11,2x10 ⁻⁶	0,9957	0,0023
Henderson e Pabis									
Amostra	1,0393		-	-	0,0048	-	73x10 ⁻⁶	0,9954	0,0080
Testemunha 1	0,9790		-	-	0,0003	-	56x10 ⁻⁶	0,9843	0,0070
Testemunha 2	76581,7				0,0119		6,8x10 ⁻⁶	0,9956	0,0022
Thompson									
Amostra	-3761,3	4,1888	-	-		-	0,66x10 ⁻⁷	0,9940	0,0002
Testemunha 1	-7,0744	0,0677	-	-			0,35x10 ⁻⁷	0,9997	3,4460
Testemunha 2	-7523,7	3,4730					0,0224	0,2800	0,1297
Lewis									
Amostra		-	-	-	0,0046	-	0,63x10 ⁻⁷	0,9940	0,0002

Testemunha 1	-	-	-	0,0004	-	68×10^{-6}	0,9615	0,0080
Testemunha 2				0,0016		0,0192	0,2800	0,1297
Exponencial de Dois Termos								
Amostra	0,0027	-		1,6628	-	$0,70 \times 10^{-7}$	0,9939	0,0002
Testemunha 1	-0,9314	-		0,0001	-	0,0001	0,9234	0,0109
Testemunha 2	0,0043			0,3591		0,0224	0,2794	0,0129

Na Figura 4.24, estão ilustradas as razões do teor de água observadas e estimadas, pelo modelo da Aproximação da Difusão, para as amostras e testemunha de feijão-caupi submetidas a secagem noturna em secador ACSN combinada com secagem em secador solar. Notou-se, por meio da correspondência entre os valores experimentais e estimados, a descrição adequada do modelo da Aproximação da Difusão do comportamento da secagem.

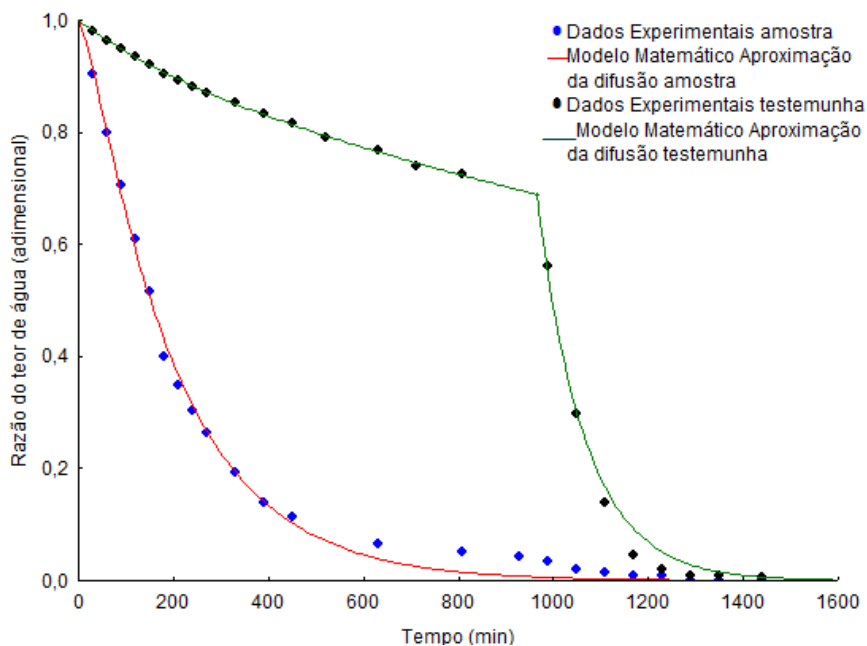


Figura 4.24 – Cinética de secagem noturna em secador ACSN combinada com secagem em secador solar para as amostras e testemunhas de feijão-caupi com ajuste pelo modelo da Aproximação da Difusão

Tem-se na Tabela 4.18 os valores dos coeficientes de difusão efetivo e os coeficientes de determinação (R^2) da secagem em secador ACSN combinada com secagem em secador solar das amostras de feijão-caupi e da testemunha.

Tabela 4.18 – Valores do coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) e coeficiente (R^2) obtidos para secagem em secador ACSN combinada com secagem em secador solar da amostra de feijão-caupi e testemunha

Feijão-caupi	Amostra	Testemunha 1	Testemunha 2
Coeficiente de difusão efetivo ($m^2 s^{-1}$)	$5,76 \times 10^{-11}$	$0,16 \times 10^{-11}$	$2,42 \times 10^{-11}$
Coeficiente de determinação (R^2)	0,9630	0,9733	0,7738

O maior valor do coeficiente de difusão efetivo foi encontrado na amostra no secador ACSN durante a noite combinado com secagem em secador solar diurno, que pode estar relacionado com a eliminação da água superficial das amostras durante a noite devido menor resistência à umidade em direção à difusão, de acordo com os valores da taxa de secagem na Figura 4.23 (a), outro fator, é que a amostra (ACSN) permaneceu durante todo processo em contato com temperaturas mais elevadas. Analisando-se as amostras de controle (testemunha 1 e testemunha 2), durante secagem, percebeu-se que o coeficiente de difusão efetivo foi menor para a amostra da Testemunha 1 no qual esteve em contato com temperaturas menores à noite, no entanto, a Testemunha 2 apresentou maior coeficiente de difusão efetivo no caso usando o secador solar durante o dia com temperaturas de contato maiores. Verificou-se que o valor da D_{ef} na secagem combinada foi superior a secagem realizada apenas no secador ACSN (Experimento 3), ficando com o valor da D_{ef} inferior a secagem no secador solar (Experimento 5), a secagem por exposição direta ao sol (Experimento 4) e a secagem combinada da exposição ao sol com secagem em secador ACSN. (Experimento 6).

4.4 - Comparações entre as secagens em estufa e solar

4.4.1 – Comparação da secagem em estufa e em secador ACSN

Na Figura 4.25 estão apresentados os pontos experimentais da cinética de secagem em estufa das amostras de feijão-caupi, comparado com os dados da cinética de secagem das amostras em secador ACSN de uso noturno.

Observou-se que a curva de secagem da amostra de feijão-caupi desidratada em secador ACSN no período noturno, após 930 min de secagem, ficou próximo aos pontos experimentais da cinética de secagem das amostras secas em estufa na temperatura de 60 °C, todavia apresentando tempo de secagem inferior. Apesar da verificação de

temperaturas superiores a 50 °C no secador ACSN (no início da secagem), a umidade relativa no interior do secador estava em torno de 43,2 a 62,3%, além da temperatura no interior da câmara de secagem ir diminuindo gradativamente com as secagens, atingindo valores inferiores a 50 °C; também existe a possibilidade de deficiência na exaustão do ar úmido na saída do secador ACSN devido sua saída ser por convecção natural.

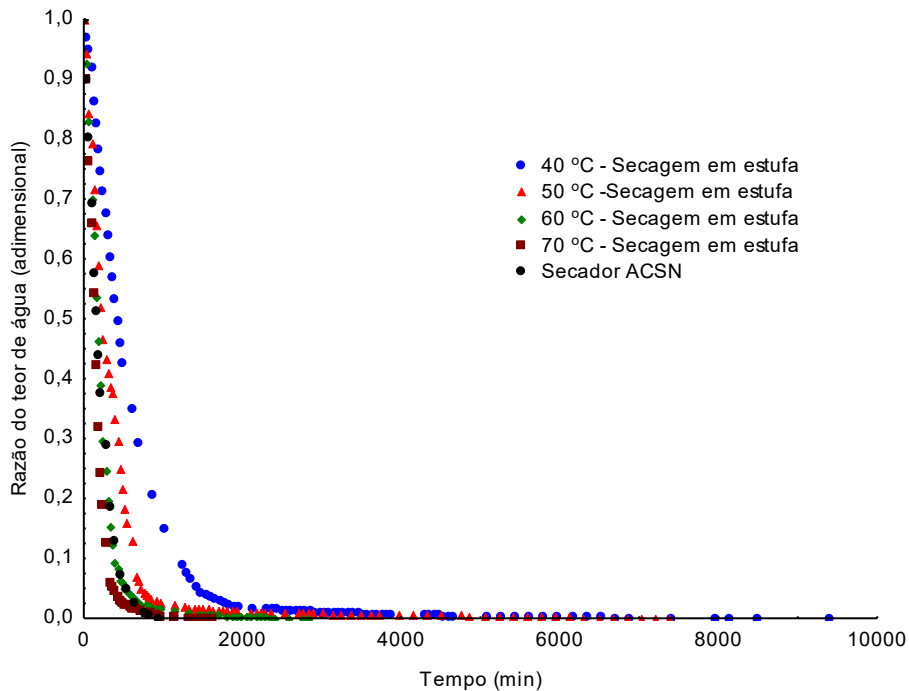


Figura 4.25 – Curvas de secagem das amostras de feijão-caupi em estufa e em secador ACSN

4.4.2 – Comparação da secagem em estufa e em exposição direta ao sol

Tem-se na Figura 4.26, os pontos experimentais da cinética de secagem em estufa das amostras de feijão-caupi e os dados da cinética de secagem por exposição direta ao sol.

Verificou-se que as amostras de feijão-caupi desidratadas por exposição ao sol teve comportamento semelhante à secagem em estufa para a temperatura de 70 °C, com tempo de secagem de 510 min, inferior aos tempos de secagem em estufa.

As secagens por exposição ao sol foram realizadas no mês de março de 2016 com a temperatura em torno de 27 °C, e alcançando os 55,30 °C nos horários próximo ao meio dia, com umidade relativa do ambiente variando de 40,29 a 68,50%.

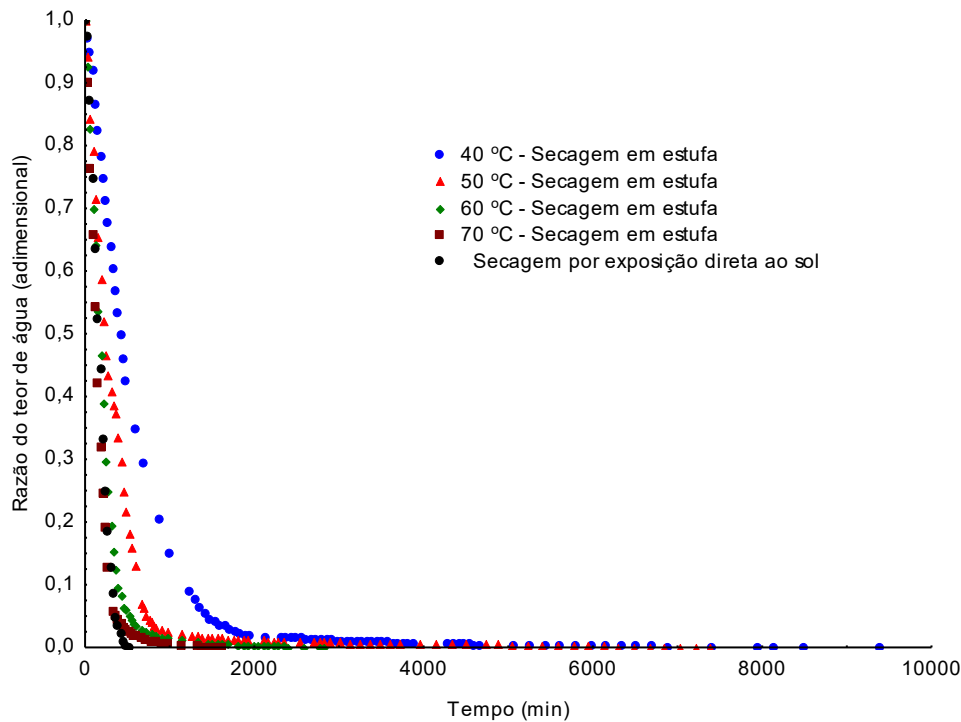


Figura 4.26 – Curvas de secagem das amostras de feijão-caupi em estufa e por exposição direta ao sol

De acordo com Villela e Silva (1992), a velocidade de secagem não depende apenas da temperatura de desidratação, mas também é influenciada pela umidade relativa do ambiente; é provável que a umidade relativa do ambiente no momento das secagens das amostras de feijão-caupi em estufa e por exposição direta ao sol tenha sido a principal variável responsável pela velocidade de desidratação.

4.4.3 – Comparação da secagem em estufa e em secador solar

Na Figura 4.27 se encontram os pontos experimentais da cinética de secagem das amostras de feijão-caupi em estufa e em secador solar. Notou-se que os valores da cinética de secagem solar das amostras de feijão-caupi ficaram próximas aos dados experimentais da cinética de secagem das amostras desidratadas em estufa na temperatura de 70 °C, com tempo de secagem de 510 min, inferior, portanto, aos tempos de secagem em estufa.

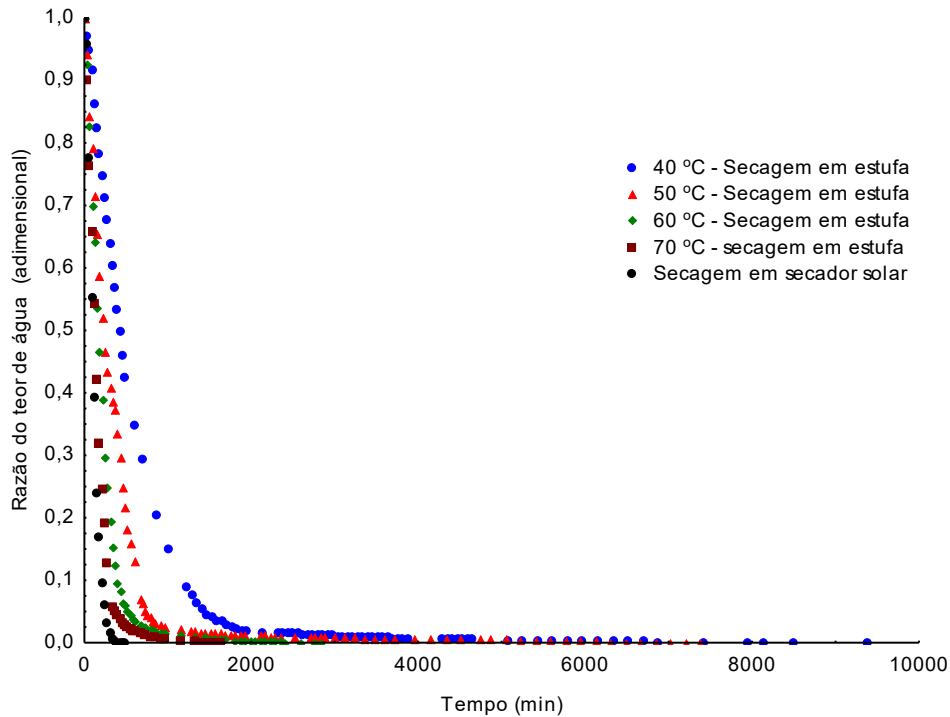


Figura 4.27 – Curvas de secagem das amostras de feijão-caupi em estufa e em secador solar

Analisando-se os dados das temperaturas obtidas no interior do secador solar durante a secagem das amostras, observaram-se temperaturas superiores a 70 °C, com algumas oscilações, visto ser a temperatura no interior do secador solar dependente de sol aberto.

4.4.4 – Comparação da secagem em estufa com exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN

Pôde-se verificar na Figura 4.28, os pontos experimentais da cinética de secagem em estufa das amostras de feijão-caupi, comparados com os dados da cinética de secagem dessas amostras por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN.

Observou-se que as amostras de feijão-caupi desidratadas por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN, apresentou a curva de secagem similar à obtida na temperatura de 60 °C em estufa, com tempo de secagem de 2550 min.

Este resultado pode ser justificado quando se analisam as temperaturas atingidas no interior do secador ACSN, por volta de 55 °C, no período noturno, e também as

condições climáticas no momento das secagens por exposição direta ao sol, no período diurno, podem ter influenciado os tempos de secagem.

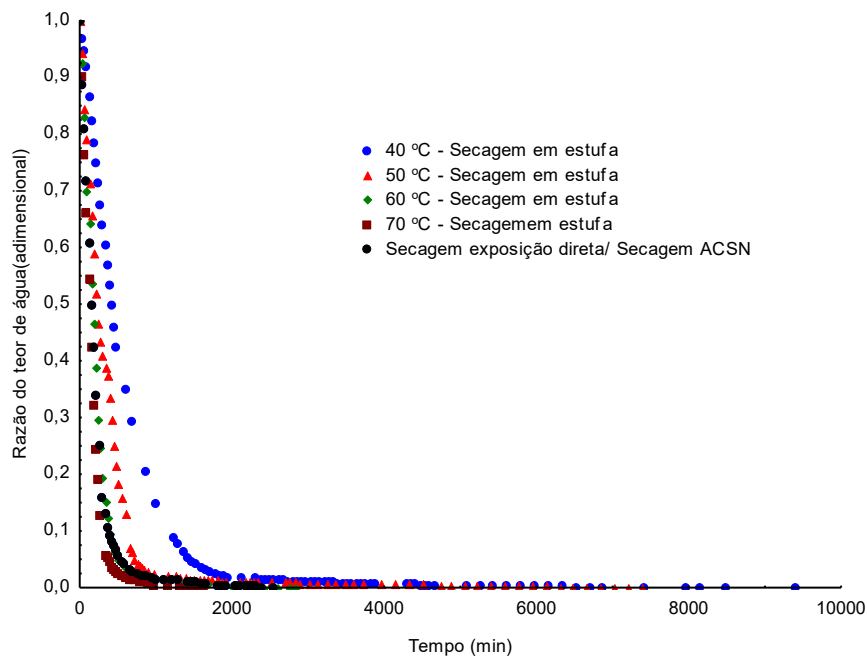


Figura 4.28 – Curvas de secagem das amostras de feijão-caupi em estufa e por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN

4.4.5 – Comparação da secagem em estufa com secagem em secador ACSN combinada com secagem em secador solar

São apresentados na Figura 4.29 os pontos experimentais da cinética de secagem em estufa das amostras de feijão-caupi juntamente com os dados da cinética de secagem das amostras em secador ACSN de uso noturno combinada com secador solar.

Verificou-se que a curva de secagem referente à etapa de desidratação das amostras de feijão-caupi em secador ACSN no período noturno combinada com secador solar ficou próxima aos pontos experimentais das secagens dessas amostras em estufa na temperatura de 60 °C; na segunda etapa de secagem, referente à desidratação em secador solar de uso diurno, observou-se queda brusca nas razões do teor de água, devido a temperatura interna do secador solar atingir 71,6 °C para ambas as amostras, obtendo-se, ao final da secagem, tempos de desidratação menores do que nas secagens em estufa nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C.

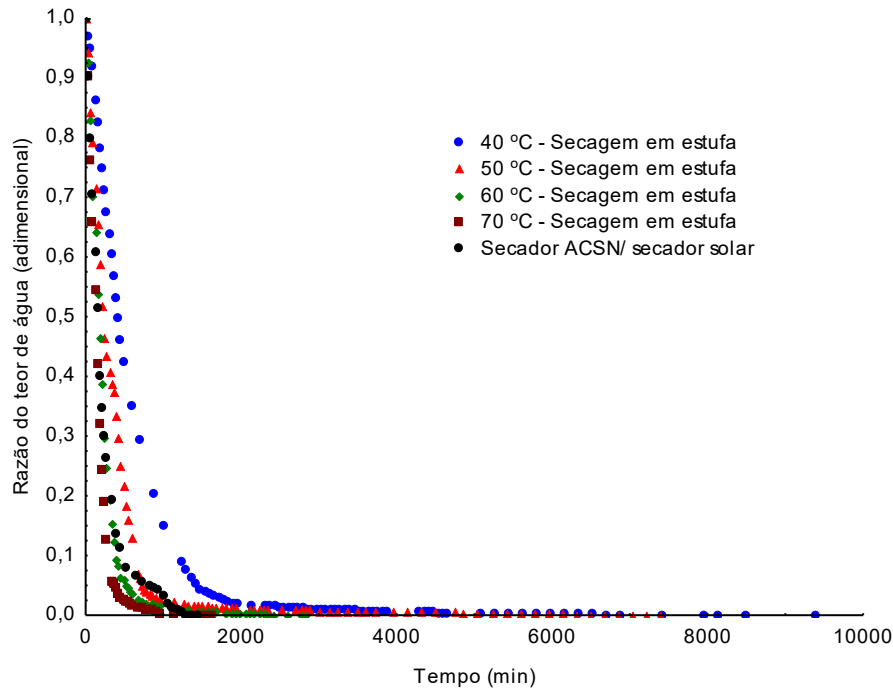


Figura 4.29 – Curvas de secagem das amostras de feijão-caupi em estufa e com secagem em secador ACSN combinada com secagem em secador solar de exposição direta.

Diógenes (2010) realizou comparações entre as secagens de grãos de abóbora em estufa e em secador ACSN combinada com secador solar e verificou que as amostras desidratadas em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C perderam água com maior velocidade que as amostras secas no secador ACSN combinado com secador solar.

5 - CONCLUSÕES

➤ O dimensionamento do sistema fotovoltaico supre as necessidades de bombeamento do secador solar, tornando o secador solar autônomo no que se refere ao fornecimento de energia elétrica nos períodos diurno e noturno;

➤ Os modelos de Aproximação da Difusão, Verna, Page, Logarítmico, dois Termos, Henderson e Pabis, Lewis, Thompson, Exponencial de Dois Termos e Midilli proporcionam excelentes ajustes aos dados experimentais da cinética de secagem das amostras de feijão-caupi em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, e também para as secagens por meio de energia solar;

➤ O modelo de Page foi escolhido como o melhor ajuste para representar os dados experimentais da secagem em estufa, enquanto os modelos da Aproximação e Page foram os modelos com os melhores ajustes para representar os dados experimentais da secagem por meio de energia solar;

➤ A relação entre o coeficiente de difusão efetivo da secagem em estufa e a temperatura do ar de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius;

➤ Para as amostras cujas secagens se iniciaram no período diurno e noturno, a utilização do secador ACSN evita absorção de água pelas amostras, promoveu sua secagem e possibilita a obtenção de produto com menor teor de água;

➤ A taxa de secagem solar do secador ACSN decresce de forma exponencial;

➤ A eficiência do coletor solar de tubos à vácuo calculado, mostra que o resultado obtido é semelhante aos reportados na literatura;

➤ A eficiência do processo de secagem por secador solar com convecção natural é significativa, apresentando, portanto, elevada relação custo benefício;

➤ As secagens solares apresentam tempos de desidratação menores que os observados nas secagens artificiais (estufa) nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 349-353, 1999.

AKPINAR, E. K. Mathematical modelling and experimental investigation on sun and solar drying of White mulberry. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 22, n. 8, p. 1544-1553, 2008.

AKPINAR, E. K.; BICER, Y. Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar drying and under open sun. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 6, p. 1367-1375, 2008.

ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SALES, J. F. cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, v. 2, n. 1, p.72-83, 2009.

ALONSO, L. F. T. **Algoritmo de seleção e dimensionamento de secadores**. 2001. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ALVES, G. E.; ISQUIERDO, E. P.; BORÉM, F. M.; SIQUEIRA, V. C.; OLIVEIRA, P. D.; ANDRADE, E. T. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. **Coffee Science**, v. 8, n. 2, p. 238-247, 2013.

ARAÚJO, E. F.; SILVA, R. F.; SILVA, J. S.; SEDIYAMA, C. S. Influência da secagem das vagens na germinação e no vigor de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 6, n. 2, p. 97-110, 1984.

ARAÚJO, J. P. P.; WATT, E. E. (org.). **O caupi no Brasil**. Brasília: IITA/EMBRAPA, 1998. 722 p.

ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; HARTMAN FILHO, C. P.; MARTINS, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017.

AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W. BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. **Jornal of Food Engineering**, v. 55, n. 4, p. 323-330, 2002.

BAPTISTA, A. S. C. **Análise da viabilidade econômica da utilização de aquecedores solares de água em resorts no nordeste do Brasil**. 2006. 158 f. Dissertação (Mestrado de Ciências em Planejamento Energético) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BABALIST, S. J.; PAPANICOLAOU, E.; KYRIAKIS, N.; BELESSIOTIS, V. G. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). **Journal of Food Engineering**, v. 75, n. 2, p. 205-214, 2006.

BAINI, R.; LANGRISH, T. A. G. Choosing a drying model for intermitente and continuous drying of bananas. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 330-343, 2007.

BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; PAIXÃO, A. A.; MACHADO, P. F. The effect of harvest conditions and drying temperature on drying kinetics of two popcorn genotypes. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 39, p. 2970-2014.

BARBOSA-CÁNOVAS. G. V.; VEJA-MERCADO, H. **Dehydration of foods**. New York; Chapman & Hall, 1996.330p. (Food Engineering Series).

BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; PINHEIRO FILHO, J. B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 60, n. 3, p. 167-173, 1995.

BEZERRA, M. A. **Aplicações térmicas da energia solar**. João Pessoa: 2005. p.98-234.

BORÉM, A.; CARNEIRO, J. E. S. A cultura. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 35, n. 2, p. 15-18, 2006.

BORGES, S. V.; MANCINI, M. C.; CORRÊA, J. L. G.; LEITE, J. B. Drying kinetics of bananas by natural convection: influence of temperature, shape, blanching and cultivar. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 2, p. 368-376, 2011.

BOTELHO, F. M.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; MARTINS, M. A.; MAGALHÃES, F. E. A.; CAMPOS, S. C. Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 845-852, 2011.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grain and oilseeds**. Westport: AVI, 1992. 450 p.

BUDIARDJO, I.; MORRISON, G. L. Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters. **Solar Energy**, v. 8, p. 49-56. 2009.

CAMICIA, R. G. M.; CHRIST, D.; COELHO, S. R. M.; CAMICIA, R. F. M. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 3, p. 206-214, 2015.

CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; DETMANN, E. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 29, n. 2, p. 28-37, 2007.

CARVALHO, N. M. **A secagem de sementes**. Jaboticabal: FUNEP, 1994. 165 p.

CAVARIANI, C. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. 1996. 85 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, São Paulo.

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, 2011.

CLEMENT, A. D.; EMMANUEL, A. N.; KOUAMÉ, P.; BENJAMIN, Y. K. Mathematical modelling of sun drying kinetics of thin layer cocoa (*Theobroma cacao*) beans. **Journal of Applied Sciences Research**, v. 5, n. 9, p. 1110-1116, 2009.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra Brasileira - Grãos safra 2016/2017: Décimo Sétimo Levantamento: abril**. 2017, 162 p.

CORRÊA, P. C.; MACHADO, P.F.; ANDRAD, E.T. Cinética de secagem e qualidade e qualidade de grãos de milho-pipoca. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 25, n. 1, p. 134-142, 2001.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; NOGUEIRA, B. L. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 8, n. 2, p. 117-126, 2006.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTNAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 501-510, 2007.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

COSTA, A. R. S. **Sistema de secagem solar para frutas tropicais e modelagem da secagem de banana em um secador de coluna estática**. 2008. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

COSTA, L. M.; RESENDE, O. SOUSA, K. A.; GONÇALVES, D. N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1089-1096, 2011.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; GONÇALVES, D. N.; OLIVEIRA, D. E. C. Modelagem matemática da secagem de frutos de crambe em camada delgada. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 2, p. 392-403, 2015.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. London: Oxford University Press, 1975. 414 p.

ÇAKMAK, G.; YILDIZ, C. The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM - based solar integrated collector. **Food and Bioproducts Processing**, v. 89, n. 2, p. 103-108, 2011.

DALBELLO, O. **Eficiência do processo de secagem do amendoim (*Arachis hypogaea* L.) e milho-pipoca (*Zea mays* L.)**. 1995. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

DANTAS, H. J. **Secagem solar e convencional de amêndoas de Jaca**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

DIAMANTE, L. M.; MUNRO, P. A. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. **Solar Energy**, v. 51, n. 4, p. 271-276, 1993.

DIÓGENES, A. M. G. **Secagem solar e convencional de grãos de abóbora**. 2010. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

DIÓGENES, A. M. G.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; SANTOS, D. C. Cinética de secagem de grãos de abóbora. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 1, p. 71-80, 2013.

DOYMAZ, I. Drying behavior of green beans. **Journal of Food Engineering**, v. 69, p. 161-165, 2005.

DOYMAZ, I. Drying of green bean and okra under solar energy. **Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly**, v. 17, n. 2, p. 199-205, 2011.

DOYMAZ, I.; ISMAIL, O. Drying characteristics of sweet cherry. **Food and Bioproducts Processing**, v. 89, n. 1, p. 31-38, 2011.

DOYMAZ, I.; KOCAYIGIT, F. Drying and rehydration behaviors of convection drying of green peas. **Drying Technology**, v. 29, v. 11, p 1273-1282, 2011.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 936 p.

EKECHUKWU, O. V.; NORTON, B. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 6, p. 615-655, 1999.

EL-SEBAIL, A. A.; SHALABY, S. M. Experimental investigation of on indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 109-116, 2013.

FAGUNWA, A. O.; KOYA, O. A.; FAVORODE, M. O. Development of an intermittent solar dryer for cocoa beans. **Agricultura Engineering International: The CIGR Journal**, v. 11, n. 1, p. 1-14, 2009.

FARIA, R. Q.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 573-583, 2012.

FERREIRA, L. F. D.; PIROZI, M. R.; RAMOS, A. M.; PEREIRA, J. A. M. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 6, p. 855-862, 2012.

FERREIRA, A. G.; MAIA, C. B.; CORTEZ, M. F. B.; VALLE, R. M. Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. **Solar Energy**, v. 82, n. 3, p. 198-205, 2008.

FERRER SILVA, I. A.; RIBEIRO, A R. **Gestão ambiental e sustentabilidade**. Cuiabá: EdUFMT, 2011. 102 p.

FIGUEIREDO, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2004. 229 p.

FREIRE FILHO, F. R. Origem evolução e domesticação do caupi. In: ARAÚJO, J. P. P.; WATT, E. **O caupi no Brasil**. Brasília: IITA/EMBRAPA, 1988. Cap. 1, p. 26-46.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. M. **Feijão-caupi no Brasil: produção melhoramento genético avanços e desafios**. Teresina: Embrapa Meio-Norte. 2011. 84 p.

FUDHOLI, A.; SOPIAN, K.; RUSLAN, M. H.; ALGHOUL, M. A.; SULAIMAN, M. Y. Review of solar dryers for agricultural and marine products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 1-3, 2010.

FUDHOLI, A.; SOPIAN, K.; YAZDI, M.; RUSLAN, M. H.; GABBASA, M.; KAZEM, H. A. Performance analysis of solar drying system for red chili. **Solar Energy**, v. 99, p. 47-54, 2014.

GARCIA, D. C.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 608, 2004.

GAZOR, H. R.; MOHSEMANESH, A. Modelling the drying kinetics of canola in fluidised bed dryer. **Czech Journal of Food Sciences**, v. 28, n 6, p. 531-537, 2010.

GOERCK, M. **Determinação do potencial energético de um coletor solar foto térmico na região do valor Taquari – RS Brasil**. 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado

em Ambiente e Desenvolvimento) - Centro Universitário Univates, Universidade do Vale do Taguari, Lagedo.

GOMES, D. G. **Otimização teórica/experimental de um coletor de energia solar plano.** Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2007.

GÓMEZ DE LA CRUZ, F. J.; CASA NOVA-PELÁEZ, P. J.; PALOMAR-CARNICERO, J. M.; CRUZ-PERAGÓN, F. Modeling of olive-oil mill waste Rotary dryers: Green energy recovery systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 80, p. 362-373, 2015.

GONELI, A. L. D. **Variação das propriedades físicas-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus comunis* L.) durante a secagem e o armazenamento.** 2008. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C. AFONSO JÚNIOR, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, n. 1, p. 64-73, 2009.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; MAGALHAES, F. E. A.; BAPTESTINI, F. M. Contratação volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33. n. 1. p. 1-8, 2011.

GONELI, A. L. D.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M. Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 1, p. 191-197, 2010.

GONELI, A. L. D.; NASU, A. K.; GANCEDO, R.; ARAÚJO, W. D.; SARATH, K. L. L. Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenacea* DC.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 16, n. 2, p. 434-443, 2014.

GOYALDE, N. A.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P.; GONELI, A. L. D.; ARAÚJO, F. Mathematical modeling of the drying kinetics of sugarcane slices. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 11, n. 2, p. 117-121, 2009.

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

HACIHAFIZOGLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K. Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice. **Food and Bioproducts Processing**, v. 86, n. 4, p. 268-275, 2008.

HUBACKOVA, A.; KUCEROVA, I.; CHRUN, R.; CHALOUPKOVA, P.; BANOUT, J. Development of solar drying model for selected cambodian fish species. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p. 1-10, 2014.

IAL - Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos.** São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

IMRE, L. Solar drying. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying.** Boca Raton: CRC Press, 2015. Chap. 14, p. 303-350.

JIDEANI, V. A.; MPOTOKWANA, S. M. Modeling of water absorption of *Botswana bambara* varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 2, p. 182-188, 2009.

JITTANIT, W Kinetics and temperature dependent moisture diffusivities of pumpkin seeds during drying. **Kasetsart Journal: Natural Scienc**, v. 45 n. 1, p. 147-158, 2011.

JUAMILY, K. E. J.; KHALIFA, A. J. N; YASSEN, T. A. Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq. **Desalination**, v. 209, n.1-3, p. 163-170, 2007.

KALSE, S. B.; PATIL, M. M.; JAIN, S. K. Microwave drying of onion slices. **Research Journal of Chemical Sciences**, v. 2, n. 4, p. 57-60, 2012.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Jounal of Food Engineering**. v. 92, n. 2, p. 182-188, 2007.

KHALIL, E. J.; AL-JUAMILY, A.; KHALIFA, A. N. Testing of the performance of fluid and vegetable solar drying system in Iraq. **Desalination**, v. 209, p. 163-170, 2007.

KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering: processes and systems**. Oxford: Academic Press, 2014. 819 p.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solids material. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.

LIANG, R.; MA, L.; ZHANG, J.; ZHAO, D. Theoretical and experimental investigation of filled-type evacuated tube solar collector with U tube. **Solar Energy**, v. 85, p. 1735-1744, 2011.

MA, L.; LU, Z.; ZHANG, J.; LIANG, B. R. Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube. **Building and Environment**, v. 45, p. 1959-1967, 2010.

LIMA, A. G. B.; NEBRA, S. A.; QUEIROZ, M. R. Aspectos científicos e tecnológicos da banana. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 2, n. 1, p.87-101, 2000.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 75-97, 1996.

MADHLOPA, A.; NGWALO, G. Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater. **Solar Energy**, v. 81, n. 4, p. 449-462, 2007.

MARINOS-KOURIS, D.; MAROULIS, Z. B. Transport properties in the drying of solids. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. Boca Raton: CRC Press, 2015. Chap. 4, p. 78-105.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brasil. **Energy Policy**, v. 39, n. 7, p. 4378-4390, 2011.

MARTINS, E. A. S.; LAGE, E. Z.; GONELI, A. L. D.; HARTMANN FILHO, C. P.; LOPES, J.G. Cinética de secagem de folhas de timbó (*Serjania marginata* Casar).

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 3, p. 238-244, 2015.

MENEGHETT, V. L.; AOSANI, E.; ROCHA, J. C.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M.C.; POHNDORF, R. S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 10, p. 1115-1120, 2012.

MIDILLI, A.; KUCUK, H. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. **Energy Conversion and Management**, v. 44, n. 7, p. 1111-1122, 2003.

MILCZAREK, R. R.; DAI, A. A.; OTONI, C. G.; MCHUGH, T. H. Effect of shrinkage on isothermal drying behavior of 2-phase olive mil waster. **Journal of Food Engineering**, v. 103, n. 4, p. 434-441, 2011.

MORAIS, S. J. S.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficientes de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) walp.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 455-463, 2013.

MOREIRA, R.; CHENLO, M. D.; TORRES, N. V. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 88, n. 4, p. 514-521, 2008.

MORRISON, D. J.; ABDEL-KHALIK, S. I. Effects of phase-change energy storage on the performance air-based and liquid-based solar heating systems. **Solar Energy**, v. 20, n. 1, p. 57-67, 1978.

NIAMNUY, C.; NACHAISIN, M.; POOMSA-AD, N.; DEVAHASTIN, S. Kinetic modelling of drying and conversion/degradation of isoflavones during infrared drying of soybean. **Food chemistry**, v. 133, n. 3, p. 946-952, 2012.

NKOLO MEZE'E, Y. N.; NOAH NGAMVENG, J.; BARDET, S. Effect of enthalpy-entropy compensation during sorption of water vapour in tropical woods: the case of

bubinga (*Guibourtia Tessmanii* J. Léonard; *G. Pellegriniana* J. L.). **Thermochimica Acta**, v. 468, n. 1/2, p. 1-5, 2008.

NUNES, A. G. **Desenvolvimento experimental de um secador solar multienergético para secagem de frutas**. 2016. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

NUNES, A. G.; LIMA, W. S.; GRILO, M. B. Novas tecnologias: Desenvolvimento de um secador solar usado para desidratação de frutas. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2015, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: 2015. v.1, p. 567.

NUTHONG, P.; ACHARIYAVIRIYA, A.; NAMSANGUAN, K.; ACHARIYAVIRIYA, S. Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. **Journal of Food Engineering**, v. 102, n. 3, p. 233-239, 2011.

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T. A. S.; CAMPOS, R. C.; CHAVES, T. H. Cinética de secagem dos grãos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 11, n. 2, p. 190-201, 2012.

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; SOUZA, K. A.; SMANIOTTO, T. A. de S. Propriedades termodinâmicas das sementes de pinhão-mansão. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 3, p. 147-157, 2014.

OLIVEIRA, G. H. H.; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R.; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 18, n.4, p. 314-321, 2015.

PARIKH, D e AGRAWAL, G. Solar drying in hot and dry climate of Jaipur, India. **International Renewable Energy Research**. v. 1, n. 4, p. 224-231, 2011.

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

PENEREIRO, J. C.; MELO, L. P.; CORADI, T. B. Construção de um aquecedor solar de baixo custo sem cobertura: análise experimental da eficiência térmica para vários ensaios. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 10 n. 1, p. 18-34, 2010.

PEREIRA, R. C. Eficiência térmica de coletores solares de baixo custo – CSBC. In: Congresso de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17, 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: 2006.

PISKE, O. **O processo de globalização e a necessária sustentabilidade ambiental**. Tribunal de Justiça do Distrito Federal e dos Territórios, poder Judiciário da União, Brasil. 2011. Disponível em: <
<http://www.tjdft.jus.br/institucional/imprensa/artigos/2011/>> Acesso em: 23 dez. 2016.

POTTLER, K.; DIPPEL, CM.; BECK, A.; FRICKE, J. Optimized finned absorber geometries for solar air heating collectors. **Solar Energia**, v. 67, n. 3, p. 35-52, 2006.

PRADO, R. T. A.; ARRUDA, L. B.; BARROS FILHO, A. M.; TABORIANSKI, V. M.; KAWAKITA, C. Y.; ARANTES, L. O. **Levantamento do estado da arte: energia solar**. São Paulo, 2007.

PRAKASH, O.; KUMAR, A. Solar greenhouse drying: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 905-910, 2013.

QUEIROZ, A. J. M.; DANTAS, H. J.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; MELO, K. S. Solar drying of jack fruit almonds. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 6, p. 1150-1161, 2011.

REIS, R. C.; BARBOSA, L. S.; LIMA, M. L.; REIS, J. S.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R. Modelagem matemática da secagem de pimenta Cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 347-353, 2011.

RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canphora* Pierre) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, p. 189-196, 2009.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2008.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; JAREN, C.; MOURE, A.J. Bean moiture diffusivity and drying kinetics: a comparison of the liquid diffusion model when taking into account and neglecting grain shrinkage. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 5, n. 1, p. 51-58, 2007.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão-adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produto Agroindustriais**, v. 12, n. 2, p 171-178, 2010.

RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; CHAVES, T. H.; FERREIRA, J.; BESSA, V. Kinetics and thermodynamic properties of the drying process of sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moernch) grain. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 32, p. 2453-2462, 2014.

RESENDE, O.; ULLMANN, R.; SIQUEIRA, V.C.; CHAVES, T.H.C.; FERREIRA, L.U. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) durante a secagem **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 6, p. 1123-1135, 2011.

RONOH, E. K.; KANALI, C. L.; MAILUTHA, J. T.; SHITANDA, D. Modeling thin layer drying of amaranth seeds under open sun and natural convection solar tent dryer. **Agricultural Engineering International: the CIGR Journal**, v. 11, n. 1, p. 1-10, 2009.

ROSA, F. N. **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. 2012. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SACILIK, K. The thin-layer modelling of tomato drying process. **Agriculturae Conspectus Scientificus**, v. 72, n. 4, p. 343-349, 2007.

SALEH, A.; BADRAN, I. Modeling and experimental studies on a domestic solar dryer. **Renewable Energy**, v. 34, n. 10, p. 2239-2245, 2009.

SANTOS, D. C. **Secagem solar e convencional de grãos residuais de urucum**. 2012. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

SANTOS, L. D. M.; PRADO, M. M. Estudo da secagem de moringa oleifer. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 27., 2010. **Anais....** Foz do Iguaçu: COBEQ, 2010.

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; OLIVEIRA, E. N. A. Secagem noturna de feijão caupi com o uso de energia solar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40., 2011. **Anais...** Cuiabá: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2011. CD-ROM.

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; OLIVEIRA, E. N. A. Drying of waste grains flour of annatto by using solar energy. **African Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 47, p. 6281-6288, 2012.

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; OLIVEIRA, E. N. A. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 223-231, 2013.

SAVICKI, D. L. **Análise numérica tridimensional e investigação experimental do comportamento térmico e hidrodinâmico de reservatórios térmicos cilíndricos**. 2007. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SHARADA, S. Mathematical models for drying behavior of green beans. **Internacional Journal of Engineering Research and Applications**, v. 3, n. 3, p. 845-851, 2013.

SHERWOOD, T. K. The drying of solids: part-b. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 21, n. 10, p. 976-980, 1929.

SILVA, J. S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995. 509 p.

SILVA, J. S. Secagem e armazenamento de produtos agrícolas. In: SILVA, J. S. **Secagem e secadores**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. p. 109-146.

SIQUEIRA, D. A. **Estudo do desempenho de um aquecedor solar de baixo custo**. 2009. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) –Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Difusividade efetiva de grãos e frutos de pinhão-manso. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 1, p. 2919-2930, 2012a.

SIQUEIRA, V. C.; RESEND, O.; CHAVES, T. H. Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: na empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 2, p. 278-285, 2013.

SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

SOUZA, C. M. A.; RODRIGUES, E.; MRAFULL, L. Z. L.; SILVA J. N. Programa computacional para simular a secagem de abacaxi em secador de leito fixo. In: CONGRESSO ARGENTINO DE INGENIERÍA RURAL, 9., 2007, Córdoba. **Anais... Córdoba**, 2007. v. 1, p. 1-10.

STELLE, W. M.; MEHRA, K. L. Struture, evolution and adaptation to farming system and environment in *Vigna*. In: SUMMERFIELD, D. R; BUNTING, A. H. **Advances in Legume Science**. England: Royal Botanic Gardens, 1980. p. 459-468.

STILING, J.; LI, S.; STROEVE, P.; THOMPSON, J.; MAWA, B.; KONBLUTH, K.; BARRET, D. M. Performace evaluation of an enhanced fruit solar dryer using concentrating panels. **Energy for Sustainable Development**, v. 16, p.224-230, 2012.

TAVAKOLIPOUR, H. Drying kinetics of pistachio nuts (*Pistacia vera* L.). **World Applied Sciences Journal**, v. 12, n. 9, p. 1639-1646, 2011.

TRIPATHY, P. P.; KUMAR, S. Modeling of heat transfer and energy analysis of potato slices and cylinders during solar drying. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 5/6, p. 884-891, 2009.

TUNDE-AKINTUNDE, T. Y. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. **Renewable Energy**, v. 36, n. 8, p. 2139-2011.

ULLMANN, R.; RESENDE, O.; SALES, J. F.; CHAVES, T. H. Qualidade das sementes de pinhão manso submetidas à secagem artificial. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 3 p. 442-447, 2010.

VILELA, C.A.A.; ARTHUR, P.O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 2, p. 387-394, 2008.

VILELA, F. A.; SILVA, W. R. Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método de secagem intermitente. **Scientia Agrícola**, v. 49, n. 1, p. 145-153, 1992.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Saraiva, 2013. 224 p.

WANDER, A. E. Produção e participação brasileira no mercado internacional de feijão-caupi. In: CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 3., 2013, Recife. **Anais...** Recife: IPA, 2013.

ZAKIPOUR, E.; HAMIDI, Z. Vacuum drying characteristics of some vegetables. **Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering**, v. 30, n. 4, p. 97-105, 2011.

ZHU, Y.; PAN, Z.; McHUGH, T. H.; BARRETT, D. M. Processing and quality characteristics of apple slices processing under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with intermittent heating. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 1, p. 8-16, 2010.

ZORGAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v. 14, p. 2225-2253, 1996.

YUN, M. T.; PUSPASARI, I.; TASIRIN, M. S.; TALIB, M. Z. M.; DAUD, W. R. W.; YAAKOB, Z. Drying of oil palm frond particles in a fluidized bed dryer with inert medium. **Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly**, v. 19, n. 4, p. 593-603, 2013.

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Valor médio da temperatura e umidade relativa no ambiente externo e interno do secador ACSN de uso noturno, durante as secagens das amostras de feijão-caupi

Produto	Temperatura (°C)			Umidade relativa (%)		
	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima
Feijão-caupi						
Ambiente Exterior	25,07	27,32	23,74	75,20	85,47	65,23
Ambiente interior	44,63	57,00	36,30	52,75	62,30	43,20

Tabela A.2 – Valor médio da temperatura, umidade relativa e radiação solar no ambiente interno e externo durante as secagens das amostras de feijão-caupi por exposição direta ao sol

Produto	Temperatura (°C)			Umidade relativa (%)			Radiação (W/m²)
	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	
Feijão-caupi							
Ambiente Interno	41,77	55,30	27,00	54,39	68,5	40,29	647,29
Ambiente externo	31,22	40,00	24,00	55,08	75,00	44,57	647,29

Tabela A.3 – Valor médio da temperatura, umidade relativa e radiação solar no ambiente interno e externo durante as secagens das amostras de feijão-caupi em secador solar

Produto	Temperatura (°C)			Umidade relativa (%)			Radiação (W/m²)
	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	
Feijão-caupi							
Ambiente Interno	59,8	82,5	32,5	52,23	64,3	36,07	615,29
Ambiente externo	31,22	40,00	24,00	55,08	75,00	44,57	647,29

Tabela A.4 – Valor médio da temperatura, umidade relativa e radiação solar do ambiente externo durante as secagens das amostras de feijão-caupi e testemunha por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador solar ACSN

Produto Feijão- Caupi	Temperatura (°C)			Umidade relativa (%)			Radiação (W/m ²)
	Média	Max.	Mín.	Média	Max.	Mín.	
Amostra (1 ^o Dia)	30,00	36,00	26,00	61,96	67,23	42,79	661,36
Amostra (1 ^o Noite)	23,91	26,00	23,00	76,00	94,45	57,74	x
Amostra (2 ^o Dia)	29,57	35,00	27,00	53,58	69,72	44,41	627,92
Amostra (2 ^o Noite)	24,20	27,00	23,00	79,96	86,80	55,11	x
Testemunha (1 ^o Dia)	30,00	36,00	26,00	61,96	67,23	42,79	661,36
Testemunha (1 ^o Noite)	25,27	27,00	24,00	87,02	95,03	58,43	x
Testemunha (2 ^o Dia)	29,57	35,00	27,00	53,58	69,72	44,41	627,92
Testemunha (2 ^o Noite)	25,75	26,00	25,00	80,79	86,65	57,03	x
Testemunha (3 ^o Dia)	26,12	29,00	25,00	57,20	74,85	47,40	299,37

Tabela A.5 – Valor médio da temperatura e umidade relativa no interior do secador durante as secagens das amostras de feijão-caupi por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador solar ACSN

Produto Feijão- Caupi	Temperatura (°C)			Umidade relativa (%)		
	Média	Max.	Mín.	Média	Max.	Mín.
Amostra (1 ^a Noite)	45,4	55,6	29	65,34	74,65	57,34
Amostra (2 ^a Noite)	40,79	45,33	28,33	47,54	53,87	41,87

Tabela A.6 – Valor médio da temperatura, umidade relativa e radiação solar do ambiente externo durante as secagens das amostras de feijão-caupi e testemunha em secador solar ACSN combinada com secagem em secador solar

Produto Feijão- Caupi	Temperatura (°C)			Umidade relativa (%)			Radiação (W/m²)
	Média	Max.	Mín.	Média	Max.	Mín.	
Amostra (Noite)	24,64	28,00	23,00	77,58	96,10	59,07	x
Amostra (Dia)	25,22	32,00	26,00	53,67	80,78	41,30	640,85
Testemunha (Noite)	25,28	27,00	24,00	88,45	96,00	60,30	x
Testemunha (Dia)	25,22	32,00	26,00	53,67	80,78	41,30	640,85

Tabela A.7 – Valor médio da temperatura, umidade relativa e radiação solar no interior do secador durante as secagens das amostras de feijão-caupi e testemunha em secador solar ACSN combinada com secagem em secador solar

Produto Feijão- Caupi	Temperatura (°C)			Umidade relativa (%)			Radiação (W/m²)
	Média	Max.	Mín.	Média	Max.	Mín.	
Amostra (Noite)	45,43	52,66	37,00	53,43	69,56	26,43	x
Testemunha (Dia)	56,73	71,60	39,30	39,78	48,70	25,06	637,54