



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS**

TESE

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM SECADOR SOLAR
MULTIENERGÉTICO PARA SECAGEM DE FRUTAS**

ANTONIO GOMES NUNES

Campina Grande – PB, julho de 2016

ANTONIO GOMES NUNES

TESE

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM SECADOR SOLAR
MULTIENERGÉTICO PARA SECAGEM DE FRUTAS**

Tese de Doutorado submetido à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo

Campina Grande – PB, julho de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

N972d

Nunes, Antonio Gomes.

Desenvolvimento experimental de um secador solar multienergético para secagem de frutas. / Antonio Gomes Nunes. - Campina Grande, 2016.

198 f. : il. color.

Tese (Doutorado em engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo".

Referências.

1. Secagem de frutas. 2. Secador solar. 3. Secagem indireta. 4. Banana passa. I. Grilo, Marcelo Bezerra. II. Título

CDU 631.365(043)

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM SECADOR SOLAR MULTIENERGÉTICO PARA SECAGEM DE FRUTAS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos

Tese apresentada no dia 15/07/2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo - UAEM/PPGEP/CCT/UFCG
Orientador

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima - UAEM/PPGEP/CCT/UFCG
Examinador Interno

Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz - UAEG/PPGEP/CTRN/UFCG
Examinador Interno

Prof. Dr. Rodrigo Ronelli Duarte de Andrade – DCBS/CCHSA/UFPB
Examinador Externo

Prof. Dr. Marcos Barros de Medeiros - CCHSA/UFPB
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Pedro Nunes Sobrinho (guerreiro) e a minha mãe Geralda Maria Gomes (minha heroína), pelo amor e a coragem que me deram durante a minha vida acadêmica.

Aos meus irmãos e irmãs, Creuza Gomes Nunes, Maria do Socorro Gomes Nunes, Damião Gomes Nunes, Maria de Fátima Gomes Nunes e José Cirino Nunes Neto, que me ajudaram nos momentos necessários.

AGRADECIMENTOS

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

Um agradecimento especial a minha família, especialmente meus pais, por terem me colocado no mundo para desfrutar de algo tão especial, “a vida”.

Ao meu orientador, Marcelo Bezerra Grilo, pelo empenho e dedicação, pois com sua paciência não cansou de me ajudar.

Um agradecimento especial a minha namorada, Célia Maria, pelo apoio moral e incentivo, que me permitiram levar até ao fim este trabalho.

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

Ao meu ex-orientador de mestrado, Prof. Dr. Daniel Marinho Pellegrino, pelo incentivo.

Aos meus colegas, Ítalo, Paulo, Jáder, Jesualdo, Juarez, Aluísio, Deise, Kalina e especialmente aos colegas Wellington, Brasileiro e Caio pelas contribuições.

À UFERSA pelo apoio financeiro.

À UFCG, CAPES, e CNPq pelo apoio durante o desenvolvimento desta pesquisa.

“O segredo do sucesso, eu não sei, mas o do fracasso é tentar agradar a todos.”

John Kennedy

RESUMO

NUNES, Antonio Gomes, Desenvolvimento Experimental de um Secador Solar Multienergético para Secagem de Frutas, Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. 198p. Tese (Doutorado).

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um secador solar com foco nas tecnologias apropriadas para a agricultura brasileira, disseminando a cultura das energias renováveis e contribuindo para promoção do desenvolvimento sustentável. Trata-se de um secador solar de exposição indireta com coletor solar e câmara de secagem acopladas e apresenta inúmeras inovações, dentre as quais um capacitor térmico no interior do coletor solar e um sistema de movimentação do ar de secagem (*cooler*), acionado por energia solar fotovoltaica. As inovações utilizadas, permitiram obter temperaturas do ar no interior da câmara de secagem na faixa de $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, e umidade relativa do ar de secagem na faixa de $30^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Com essas características o processo de secagem se comportou como nos secadores tradicionais com média da eficiência mássica do processo de secagem obtido, em torno de 86,25%. Os testes experimentais foram realizados com secagem de banana prata (*Musa spp.*). Para os testes experimentais realizados, o secador solar mostrou-se confiável, pois, o tempo necessário para a banana atingir os valores de teor de umidade em base úmida em torno de 25%, foi de 840 minutos (14 h), sendo compatível com os tempos relatados na literatura para equipamentos equivalentes. A cinética de secagem foi ajustada pelo modelo matemático empírico de Page e os resultados foram representativos com valores elevados dos coeficientes de determinação que se aproximaram de 0,99. O sistema de medição de temperatura e umidade relativa do ar de secagem, usando Arduino, garantiu a medição de temperatura e umidade relativa do ar de secagem nas entradas e saídas do coletor solar e da câmara de secagem, o que possibilitou a realização do balanço de energia do secador solar, resultando no cálculo do rendimento termodinâmico do secador solar e na obtenção das outras propriedades termodinâmicas do ar de secagem. Os resultados obtidos para o rendimento térmico do secador solar foram em torno de 19,60%, que são compatíveis com os descritos na literatura para sistemas de secagem equivalentes que usam apenas energia solar como fonte de energia. Os investimentos com a manutenção e operação do sistema do secador solar dizem respeito, simplesmente, à degradação natural dos seus componentes. Sua viabilidade econômica foi demonstrada com um tempo de retorno do investimento estimado em até seis meses.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar. Secador Solar. Secagem Indireta. Banana passa.

ABSTRACT

NUNES, Antonio Gomes, Experimental Development of a Multi Energy Solar dryer for fruits drying, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. 198p. Tese (Doutorado).

This work represents the development of a solar dryer focusing on the appropriate technologies for the Brazilian agriculture, spreading the culture of renewable energies and contributing to the promotion of the sustainable development. It is about an indirect solar exposition dryer with the solar collector and drying chamber merged and represents numerous innovations, which are a thermal capacitor inside the solar collector and a movement system of the drying air (*cooler*), energized by photovoltaic solar energy. The innovations used allowed the system to obtain air temperatures inside the drying chamber around $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, the drying air relative humidity about $30^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. With these characteristics, the drying process operated in the traditional dryers with an average efficiency around 87%. The experimental tests were realized by drying silver bananas (*Musa spp.*). For the experimental tests realized, the solar dryer shown itself trustworthy, because the necessary time required for the bananas to reach humidity level in wet basis of about 25% was 840 minutes (14 h), being compatible with the catalogued time in the equivalent equipment literature. The drying kinetics was adjusted by the empirical method of Page and the results were representative with high values of determination coefficients approached 0.99. The temperature and relative air humidity measurement system of the drying air using Arduino, ensured the measurement of the temperature and relative air humidity in the intakes and outlets of the solar collector and drying chamber, allowing the solar dryer energy balance realization, resulting in the thermal efficiency calculation of the solar dryer and other thermodynamics properties of the drying air. The results obtained by the thermal efficiency of the drying system were around 19.60%, which are compatible with the ones described in the literature for equivalent solar dryer that used only solar energy as energy provider. The investments with the maintenance and operation of the drying system are only related to the natural degradation of its components. Its economic viability was demonstrated in a short term investment return of about six months.

KEYWORDS: Solar Energy. Solar Dryer. Indirect Drying. Dried Banana

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Curva de secagem.	11
Figura 2.2	Esquema da composição da massa de produtos biológicos.	15
Figura 2.3	Banana prata.	18
Figura 2.4	Secador construído na Universidade Federal de Sergipe, UFS.	27
Figura 2.5	Secador construído na UFCG.	27
Figura 2.6	Secadores em telas suspensas, para secagem solar construído na UFV.	28
Figura 2.7	Secador Solar construído na UFPR.	28
Figura 2.8	Sistema projetado para secagem utilizando energia solar e eólica.	29
Figura 2.9	Secador solar exagonal.	29
Figura 2.10	Representação esquemática de uma célula fotovoltaica.	31
Figura 2.11	Representação do movimento de rotação da Terra.	32
Figura 2.12	Representação do movimento da Terra em torno do sol.	33
Figura 3.1	Fotos do LEMT, UFCG.	36
Figura 3.2	Fotos do <i>Solarium</i> do LEMT, UFCG.	37
Figura 3.3	Banana prata <i>in natura</i> com casca, própria para consumo.	37
Figura 3.4	Vista panorâmica e de cima do protótipo do sistema de secagem solar.	38
Figura 3.5	Vista de cima do protótipo do sistema de secagem solar, indicando cada componente.	39
Figura 3.6	Telha de fibrocimento pintado de preto fosco utilizada como capacitor térmico.	40
Figura 3.7	Fotos do sistema de secagem solar no solarium do LEMT/UFCG.	40
Figura 3.8	Modelo físico da transferência de calor na placa absorvedora do secador solar.	42
Figura 3.9	Desenho esquemático do coletor solar desenvolvido.	43
Figura 3.10	Câmara de secagem em funcionamento no solarium.	44
Figura 3.11	Desenho esquemático da câmara de secagem desenvolvido.	46
Figura 3.12	<i>Cooler</i> e o mini painel fotovoltaico.	46
Figura 3.13	Sistema de medição de temperatura do ar.	47
Figura 3.14	Distribuição dos sensores de temperatura no coletor solar e na câmara de secagem.	48
Figura 3.15	Modelo de tabela de registro de temperatura usado nos experimentos	

	de 1 a 4	49
Figura 3.16	Distribuição de temperatura do ar de secagem no coletor solar para um dia de teste experimental.....	49
Figura 3.17	Termômetro infravermelho modelo TI – 890.....	50
Figura 3.18	Termo-Higrômetro usado para medir umidade relativa do ar nos experimentos de 1 a 4.....	50
Figura 3.19	Esquema da placa em forma de blocos placa.....	52
Figura 3.20	Fotos da placa utilizada.....	53
Figura 3.21	Sistema de aquisição de dados (ARDUINO), usado para medir umidade relativa e temperatura do ar de secagem.....	54
Figura 3.22	Piranômetro instalado no LEMT/UFCG.....	55
Figura 3.23	Estação meteorológica modelo HD32MT.1, SN 11031486 e FW 0714141114, LEMT/UFCG.....	56
Figura 3.24	Variação da irradiação solar incidente em função do tempo para um dia.	56
Figura 3.25	Intensidade média de irradiação solar medida em um dos experimentos.	57
Figura 3.26	Anemômetro usado para medir a do velocidade do ar.....	58
Figura 3.27	Características construtivas e dimensionais do protótipo do sistema de secagem.....	58
Figura 3.28	Modelo de curva de secagem ou curva de cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page.....	61
Figura 3.29	Bananas cortadas longitudinalmente <i>in natura</i>	61
Figura 3.30	Estufa com circulação mecânica mod. 320E	62
Figura 3.31	Modelo de tabela usada para registrar e calcular valores obtidos em cada experimento.	63
Figura 3.32	Representação do volume de controle do coletor solar.....	68
Figura 3.33	Representação do volume de controle da câmara de secagem.....	70
Figura 3.34	Representação do volume de controle do secador solar.....	72
Figura 3.35	Potência útil e rendimento do secador solar para cada processo.	73
Figura 3.36	Resumo das eficiências dos processos de secagem para cada experimento.	74
Figura 3.37	Planilha de custos para fabricação de um sistema de secagem secador solar de frutas.	74
Figura 4.1	Distribuição de temperatura do ar se secagem: (a) no coletor solar e na (b) câmara de secagem no dia 12 /03/2015.....	77

Figura 4.2	Distribuição de temperatura do ar se secagem: (a) no coletor solar e na (b) câmara de secagem no dia 13 /03/2015.....	78
Figura 4.3	Distribuição de temperatura do ar se secagem: (a) no coletor solar e na (b) câmara de secagem no dia 14 /03/2015.....	79
Figura 4.4	Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 12, 13 e 14 de março de 2015 na UFCG.	81
Figura 4.5	Valores de temperaturas obtidos para o secador de exposição direta.	82
Figura 4.6	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, primeira bandeja.....	85
Figura 4.7	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, segunda bandeja.	86
Figura 4.8	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page das bandejas 1 e 2.....	86
Figura 4.9	Distribuição de temperatura do ar se secagem: (a) no coletor solar e na (b) câmara de secagem no dia 26 /03/2015.....	89
Figura 4.10	Distribuição de temperatura do ar se secagem: (a) no coletor solar e na (b) câmara de secagem no dia 27 /03/2015.....	90
Figura 4.11	Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 26 e 27 de março de 2015 na UFCG.	91
Figura 4.12	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, primeira bandeja.....	94
Figura 4.13	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, segunda bandeja.	95
Figura 4.14	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page das bandejas 1 e 2.....	95
Figura 4.15	Distribuição de temperatura do ar se secagem: (a) no coletor solar e na (b) câmara de secagem no dia 28 /04/2015.....	96
Figura 4.16	Distribuição de temperatura do ar se secagem: (a) no coletor solar e na (b) câmara de secagem no dia 29 /04/2015.....	97
Figura 4.17	Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 28 e 29 de abril de 2015 na UFCG.	99
Figura 4.18	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, primeira bandeja.....	102
Figura 4.19	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page,	

	segunda bandeja.....	102
Figura 4.20	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page das bandejas 1 e 2.....	103
Figura 4.21	Distribuição de temperatura do ar se secagem: (a) no coletor solar e na (b) câmara de secagem no dia 26 /05/2015.....	104
Figura 4.22	Distribuição de temperatura do ar se secagem: (a) no coletor solar e na (b) câmara de secagem no dia 27 /05/2015.....	105
Figura 4.23	Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 26 e 27 de maio de 2015 na UFCG.	107
Figura 4.24	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, primeira bandeja.....	110
Figura 4.25	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, segunda bandeja.....	111
Figura 4.26	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page das bandejas 1 e 2.....	111
Figura 4.27	Localização dos sensores A, B e C de temperatura e umidade, relativa do ar de secagem.....	112
Figura 4.28	Valores obtidos para umidade relativa do ar de secagem no secador solar, nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016 nas posições A, B e C.....	113
Figura 4.29	Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016 na UFCG.....	114
Figura 4.30	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, primeira bandeja.....	118
Figura 4.31	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, segunda bandeja.....	118
Figura 4.32	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page das bandejas 1 e 2.....	119
Figura 4.33	Valores obtidos para umidade relativa do ar de secagem no secador solar, nos dias 21 e 22 de março de 2016 nas posições A, B e C.....	120
Figura 4.34	Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 21 e 22 de março de 2016 na UFCG.	122
Figura 4.35	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, primeira bandeja.....	125
Figura 4.36	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, segunda bandeja.....	126
Figura 4.37	Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page das bandejas 1 e 2.....	126

Figura 4.38	Taxa de secagem do experimento realizado nos dias 12,13 e 14 de março de 2015 no LEMT/UFCG.	128
Figura 4.39	Taxa de secagem do experimento realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015 no LEMT/UFCG	128
Figura 4.40	Taxa de secagem do experimento realizado nos dias 21 e 22 de março de 2015 no LEMT/UFCG	129
Figura 4.41	Banana passa obtida em um dos experimentos	129
Figura 4.42	Dados das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, obtidos com uso do CATT, experimento 5.....	131
Figura 4.43	Dados das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, obtidos com uso do CATT, experimento 6.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Principais características construtivas do coletor solar.....	43
Tabela 3.2	Principais características construtivas da câmara de secagem.....	45
Tabela 3.3	Modelo matemático empregado para ajuste das curvas de secagem	63
Tabela 4.1	Dados obtidos no experimento realizado nos dias 12,13 e 14 de março de 2015, bandeja 1.....	83
Tabela 4.2	Dados obtidos no experimento realizado nos dias 12,13 e 14 de março de 2015, bandeja 2.....	84
Tabela 4.3	Dados obtidos no experimento realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015, bandeja 1.....	92
Tabela 4.4	Dados obtidos no experimento realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015, bandeja 2.....	92
Tabela 4.5	Dados obtidos no experimento realizado nos dias 28 e 29 de abril de 2015, bandeja 1	99
Tabela 4.6	Dados obtidos no experimento realizado nos dias 28 e 29 de abril de 2015, bandeja 2	100
Tabela 4.7	Dados obtidos no experimento realizado nos dias 26 e 27 de maio de 2015, bandeja 1.....	107
Tabela 4.8	Dados obtidos no experimento realizado nos dias 26 e 27 de maio de 2015, bandeja 2.....	108
Tabela 4.9	Dados obtidos no experimento realizado nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016, bandeja 1.....	115
Tabela 4.10	Dados obtidos no experimento realizado nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016, bandeja 2.....	116
Tabela 4.11	Dados obtidos no experimento realizado nos dias 21 e 22 de março de 2016, bandeja 1.....	122
Tabela 4.12	Dados obtidos no experimento realizado nos dias 21 e 22 de março de 2016, bandeja 2.....	123
Tabela 4.13	Parâmetros de secagem	137
Tabela 4.14	Propriedade do ar de secagem.....	138
Tabela 4.15	Potência útil e rendimento do coletor solar para cada processo.	138
Tabela 4.16	Eficiências térmicas do coletor solar, câmara de	

	secagem e do secador solar	138
Tabela 4.17	Resumo das eficiências mássicas dos processos de secagem	139
Tabela 4.18	Resumo dos parâmetros coeficientes de correlação obtidos para cada experimento, ajustado pelo modelo de Page.....	140
Tabela 4.19	Planilha de custos para fabricação de um secador solar de frutas com aproveitamento multienergético.....	141

NOMENCLATURA

A_1	Área de cobertura transparente	[m ²]
A_2	Área da secção transversal da chaminé	[m ²]
c_p	Calor específico do fluido de trabalho	[J/kg°C]
EC_e	Energia cinética na entrada do volume de controle	[J]
EC_s	Energia cinética na saída do volume de controle	[J]
EP_e	Energia potencial na entrada do volume de controle	[J]
EP_s	Energia potencial na saída do volume de controle	[J]
g	Aceleração gravitacional	[m/s ²]
h	Entalpia; ($h = u + pv$)	[kJ/kg]
h_e	Entalpia na entrada do volume de controle	[kJ/kg]
h_s	Entalpia na saída do volume de controle	[kJ/kg]
$h_{va} = h_v$	Entalpia da água saturada como vapor saturado na temperatura média de saída	[kJ/kg]
\bar{G}	Irradiação solar média incidente	[W/m ²]
L	Comprimento da placa	[m]
$m_{H_2O_i}$	Massa de água contida no produto antes do processo de secagem	[kg]
$m_{H_2O_f}$	Massa de água contida no produto depois do processo de secagem	[kg]
m_{H_2O}	Massa de água contida no produto	[kg]
m_{ms}	Massa de matéria seca	[kg]
m_{msi}	Massa inicial de matéria seca	[kg]
m_{msf}	Massa final de matéria seca	[kg]
m_{ti}	Massa inicial total do produto	[kg]
m_t	Massa total do produto	[kg]
$m_{inicial}$	Massa inicial do produto	[kg]
m_{final}	Massa final do produto	[kg]
$m_{total\ água}$	Massa total de água presente no produto a ser secado	[kg]
\dot{m}	Vazão mássica do fluido de trabalho	[kg/s]

\dot{m}_e	Vazão mássicas instantâneas na entrada do volume de controle	[kg/s]
\dot{m}_s	Vazão mássicas instantâneas na saída do volume de controle	[kg/s]
\dot{m}_{va}	Massa de água retirada do produto no período de tempo	[kg/s]
n	Número de verificações (medições)	
P_u	Potência transferida ao fluido de trabalho	[W]
\dot{Q}_{vc}	Taxa de transferência de calor ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle	[J]
q	Fluxo de calor na placa (telha)	[W/m ²]
\overline{Rad}	Irradiação solar média	[W/m ²]
RU	Razão de umidade	[adim]
RH	Umidade relativa	[%]
$T_{t+\Delta t}$	Temperatura num instante $t + \Delta t$	[K]
ΔT	Diferença de temperatura	[K]
T	Temperatura	[°C]
Tp1	Termopar localizado abaixo do coletor, temperatura ambiente	
Tp2	Termopar localizado na posição de entrada do coletor	
Tp3	Termopar localizado a 20 cm da entrada do coletor	
Tp4	Termopar localizado na posição central do coletor 63 cm da entrada	
Tp5	Termopar localizado na posição 84 cm da entrada do coletor	
Tp6	Termopar localizado na saída do coletor.	
Tp7	Termopar localizado na entrada de ar da câmara de secagem	
Tp8	Termopar localizado na primeira bandeja da câmara de secagem	
Tp9	Termopar localizado na segunda bandeja da câmara de secagem.	
Tp10	Termopar localizado na saída da câmara de secagem	
\bar{T}	Temperatura média (parâmetros concentrados)	[°C]
T_t	Temperatura num instante t	[°C]
T	Tempo	[s]
t_i	Tempo inicial	[h]

t_f	Tempo final	[h]
v_c	Volume de controle	
X	Teor de água (base seca)	[decimal]
X_e	Teor de água de equilíbrio (base seca)	[decimal]
X_0	Teor de água inicial (base seca).	[decimal]
X_{bsi}	Teor de umidade inicial, base seca	[decimal]
X_{bsf}	Teor de umidade final, base seca	[decimal]
X_{bu}	Teor de umidade, em base úmida	[decimal]
X_{bs}	Teor de umidade, em base seca	[decimal]
V	Volume	[m ³]
X	Coordenada cartesiana.	[m]
Y	Coordenada cartesiana	[m]
\dot{W}_{vc}	Taxa de transferência por trabalho ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle	[J/s]

Símbolos Gregos

ε	Espessura da placa (telha)	[mm]
α_s	Absortividade solar para o policarbonato	
φ	Ângulo de inclinação da placa (telha) (em relação à horizontal)	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, $5,6697 \cdot 10^{-8}$	[W/m ² °C]
v_{ar}	Velocidade do ar	[m/s]
η_p	Eficiência do processo de secagem	[%]
η_t	Rendimento do secador solar	[%]
ρ	Massa específica do ar	[kg/m ³]

Siglas

EXP	Experimento
CATT	<i>Computer Aided Thermodynamic Table</i>
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
CPU	Unidade Central de Processamento
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
ICSP	<i>In-Circuit Serial Programming</i>
IBRAF	Instituto Brasileiro de Frutas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JTANG	<i>Joint Test Access Group</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LTA	Laboratório de Tecnologia de Alimentos
LEMT	Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas
MCU	<i>Multipoint Control Unit</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	Memória de Acesso Randômico
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
SD	<i>Secure Digital</i>
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
USB	<i>Universal Serial Bus</i> - Porta universal

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	2
1 INTRODUÇÃO.....	2
1.1 Objetivos.....	4
1.1.1 Objetivo geral.....	4
1.1.2 Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO 2	7
2 REFERENCIAIS TEÓRICOS.....	7
2.1 Secagem.....	7
2.1.1 Determinação do teor de umidade.....	12
2.2 Banana.....	17
2.3 Utilização da energia solar.....	19
2.4 Os secadores solares.....	21
2.5 Estado da arte para secadores solares.....	23
2.6 Utilização da energia solar fotovoltaica.....	30
2.7 Posicionamento dos secadores e o movimento aparente do sol.....	31
CAPÍTULO 3	36
3 METODOLOGIA.....	36
3.1 Informações Gerais.....	36
3.2 O produto a ser desidratado (banana).....	37
3.3 O equipamento de secagem (coletor solar com câmara de secagem).....	38
3.3.1 Dimensionamento do sistema de secagem.....	39
3.3.1.1 Coletor solar.....	39
3.3.1.2 Materiais utilizados no coletor solar.....	40
3.3.1.3 Dimensionamento do coletor solar.....	43
3.3.1.4 A Câmara de secagem.....	44
3.3.1.5 Desenvolvimento do sistema de medição de temperatura.....	46
3.3.1.6 A fonte de energia utilizada (energia solar térmica e solar fotovoltaica).....	54
3.4 O processo de secagem da banana.....	59
3.4.1 Determinação das curvas de secagem.....	60

3.5	Análise Energética dos sistemas e processos de secagem.....	64
3.5.1	Conceitos termodinâmicos.....	64
3.5.2	Conservação da massa	64
3.5.3	Primeira lei da termodinâmica	65
3.5.4	Cálculo da eficiência do sistema de secagem.....	66
3.5.4.1	Cálculo do rendimento térmico do equipamento	67
3.5.5	Rendimento termodinâmico do equipamento.....	68
3.5.5.1	Cálculo das eficiências.....	68
3.5.6	Eficiência mássica do processo de secagem.....	73
CAPÍTULO 4.....		76
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	76
4.1	Experimental.....	76
4.1.1	Experimento 1, realizado nos dias 12, 13 e 14 de março de 2015.....	76
4.1.2	Experimento 2, realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015.....	88
4.1.3	Experimento 3, realizado nos dias 28 e 29 de abril de 2015	96
4.1.4	Experimento 4, realizado nos dias 26 e 27 de maio de 2015.....	103
4.1.5	Experimento 5, realizado nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016.....	112
4.1.6	Experimento 6, realizado nos dias 21 e 22 de março de 2016.....	119
4.2	Análise Energética.....	130
4.2.1	Eficiência do secador solar no EXP5.....	130
4.2.2	Eficiência do secador solar no EXP6.....	133
4.2.3	Rendimento médio do equipamento	137
4.2.4	Eficiência mássica da secagem	139
4.2.5	Correlação estatística para os ajustes das cinéticas de secagem.....	140
4.2.6	Análise de Investimento.....	140
CAPÍTULO 5.....		143
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	143
5.1	Conclusões.....	143
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	145
REFERÊNCIAS		146

APÊNDICES

Apêndice A	Tabelas com os valores medidos de temperatura e umidade relativa do ar de secagem durante os experimentos EXP1, EXP2, EXP3, EXP4, EXP5, EXP6.....	154
Apêndice B	Desenhos do protótipo com suas dimensões características.....	168
Apêndice C	Laudo com as características físico-químicas da banana <i>in natura</i> e da banana passa obtida.....	173

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Colocar o conhecimento científico a serviço do desenvolvimento sustentável da humanidade, respeitando os recursos naturais e privilegiando a eficiência energética, deve ser a meta do pesquisador moderno, principalmente em países como o Brasil, que tem recursos energéticos disponíveis e precisa crescer para propiciar seu desenvolvimento. Para promover um maior desenvolvimento regional no setor da fruticultura, este trabalho contribui para desenvolver novas tecnologias nos processos de secagem de alimentos que viabilize a comercialização de um produto de boa qualidade, com elevado valor econômico agregado.

Geograficamente posicionado numa zona de excepcional disponibilidade de energia solar, o Brasil tem o desafio de promover a mobilidade social e para isso precisa incentivar seu desenvolvimento tecnológico. Deseja-se que esse crescimento socioeconômico ocorra em sintonia com o mundo globalizado de avançadas tecnologias, porém, com ações locais que priorizem a pesquisa e o desenvolvimento de máquinas simples, de fácil construção, manutenção, operação e, preferencialmente, de baixo custo, que respondam pelas demandas típicas de nosso desenvolvimento.

A escolha do setor frutífero decorre da sua importância no cenário econômico do Nordeste brasileiro. A utilização do secador solar tem como finalidade uma melhor conservação dos produtos, agregação de valor, para que ocorra uma comercialização mais lucrativa. O secador solar foi desenvolvido para secagem de frutas tropicais, que tem o Estado da Paraíba como um importante produtor e cujo cultivo permite ampla geração de emprego no ambiente da agricultura familiar, que carece de tecnologias simples, apropriadas e de baixo custo para se inserir no competitivo mercado de produtos agrícolas. Nesse trabalho o secador foi utilizado na secagem de banana.

Fonte de vitaminas, minerais e fibra, algumas frutas, como a banana, exercem um papel fundamental na nutrição humana, além de representar uma importante parcela na economia de

um país. No Brasil, a base agrícola da cadeia produtiva de frutas já ultrapassou 2,2 milhões de hectares cultivados, sendo responsável pela geração de cerca de cinco milhões de empregos diretos. Com um volume estimado de 43,6 milhões de toneladas produzidas, a fruticultura movimentou em 2013, um valor bruto de cerca de R\$ 20 bilhões (IBRAF, 2013).

Banana é a fruta mais consumida do mundo, sendo cultivada na maioria dos países tropicais, além de constituir-se em uma fonte importante na alimentação humana pelo seu elevado valor calorífico, energético e, principalmente, pelo conteúdo mineral e vitamínico que apresenta (LIMA, 1999). Sob o ponto de vista tecnológico e comercial, devido à grande variedade de vitaminas e nutrientes, observa-se que o mercado para seu aproveitamento e consumo *in natura*, e industrial, é elevado e crescente.

As qualidades alimentícias e comerciais da banana são influenciadas pelas condições de amadurecimento e armazenamento. Isso porque a banana é um fruto climatérico que apresenta alta taxa respiratória e alta produção de etileno após a colheita, o que a torna rapidamente perecível. Nesse sentido, o processo termodinâmico da secagem permite estabilizar a atividade microbiológica e reduzir as reações químicas e enzimáticas devido à diminuição da concentração da água no produto. Essa prática pode possibilitar a disponibilidade do fruto durante todo o ano, além de reduzir seu peso e, conseqüentemente, os custos de transporte e de armazenamento, sem quase afetar suas características sensoriais e sua qualidade nutricional.

Apesar das diversas tecnologias de secagem à disposição dos agricultores, a secagem em terreiros ainda é muito utilizada no Brasil, principalmente nas zonas agrícolas, onde se concentram as cooperativas e a agricultura familiar (GRILO, 2007).

Na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) foram desenvolvidos secadores solares de exposição direta, e que já são empregados na região. Contudo, esse tipo de secador não atende ao processo de secagem quando a quantidade do recurso solar, apenas na forma de energia solar térmica, é insuficiente para promover a secagem da banana.

Um dos objetivos do desenvolvimento do secador solar de exposição indireta está no fato da secagem do produto não estar diretamente exposto à irradiação solar, isso minimiza a descoloração e rachaduras na sua superfície. A câmara de secagem é utilizada para tornar

possível um melhor controle das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, tais como: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar. Uma das modificações implantadas neste sistema é a utilização da convecção forçada do ar de secagem.

O uso da energia solar fotovoltaica convertida em eletricidade permitiu acionar um *cooler*, que é responsável pela movimentação do ar de secagem, através do coletor solar e da câmara de secagem propiciando a ação da convecção forçada.

A secagem é uma operação de transferência de massa, por meio da qual ocorre a redução do teor de água do produto, mediante o fornecimento de energia. O transporte de água, do interior para a superfície do material, pode ocorrer na forma de líquido e/ou vapor, dependendo do tipo do produto e do percentual de água presente. O controle do processo de secagem e o conhecimento do mecanismo do movimento de água no produto são fundamentais, uma vez que com dados de simulação e/ou experimental, pode-se obter condições ótimas no processo, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia.

A banana passa apresenta valor agregado maior do que a banana *in natura*, principalmente se o processo de secagem ocorrer com equipamento de secagem solar. Dessa forma, um dos objetivos desse trabalho é apresentar resultados na secagem de banana, através de um secador solar de exposição indireta, de modo a comprovar a viabilidade técnica da utilização da energia solar nos processos de secagem de frutas e disseminar a cultura do aproveitamento das energias limpas nos equipamentos, que favoreçam um desenvolvimento regional mais sustentável.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e testar, experimentalmente, um secador solar de exposição indireta para secagem de frutas, utilizando-se como fontes para o processo de secagem a energia solar fotovoltaica e a energia solar térmica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um coletor solar acoplado a uma câmara de secagem que atenda a demanda necessária ao processo de secagem de banana;
- Dimensionar um mecanismo que permita o uso da convecção forçada do ar de secagem no interior do coletor solar e da câmara de secagem, utilizando um exaustor acionado por energia solar através de uma placa fotovoltaica;
- Construir e utilizar um sistema de aquisição de dados que permita medir/armazenar as propriedades termodinâmicas do ar de secagem, tais como: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar;
- Testar experimentalmente o sistema de secagem para obter e avaliar a cinética de secagem de banana, e relacionar os valores obtidos com o modelo matemático empírico de Page;
- Analisar a relação das condições termodinâmicas do ar de secagem com a intensidade da irradiação solar e demais dados meteorológicos;
- Analisar o efeito das condições termodinâmicas do ar de secagem sobre o teor de água do produto e sobre o tempo de secagem;
- Calcular a eficiência térmica do coletor solar, da câmara de secagem e do secador solar a partir dos dados de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar e da irradiação solar incidente, efetivamente medida, em cada equipamento;
- Comparar os resultados obtidos com os de outros secadores solares quanto à sua competitividade técnica, ressaltando suas vantagens e desvantagens.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAIS TEÓRICOS

CAPÍTULO 2

REFERENCIAIS TEÓRICOS

No mundo globalizado, os setores industriais, comerciais e de serviços estão cada vez mais compromissados com o desenvolvimento sustentável, focando seus processos em mecanismos que promovam a preservação das condições ambientais, sem abdicar de uma produção com redução de custos que favoreça uma maior rentabilidade.

Para determinar 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.

Nesse capítulo, serão apresentados os conceitos mais relevantes do secador solar desenvolvido com destaque para o processo (secagem), o produto a ser obtido (banana passa) e a fonte de energia utilizada (energia solar).

2.1 Secagem

A secagem tem por finalidade retirar parte da água contida em um produto. A secagem de um produto agrícola, como grãos, sementes e frutos, é um processo simultâneo de transferência de calor e massa utilizado para evitar o desenvolvimento de fungos, micro-organismos e insetos, que normalmente são as causas da deteriorização desses produtos (BROOKER et al., 1992; FIOREZE, 2004; CAVALCANTI-MATA et al., 2006; SILVA, 2008).

A secagem de produtos agrícolas é um processo importante pelos seus vários benefícios na produção e comercialização, como antecipação da colheita, redução da perda dos grãos ainda na lavoura pelos ataques das pragas, armazenamento por um período de tempo maior, mantendo excelência na qualidade do produto, além de impedir o desenvolvimento de micro-organismos

e insetos, permitindo a formação de estoques e propiciando ao produto melhores preços no período de entressafra (LIMA, 1999).

Como o fluido de trabalho utilizado nos processos de secagem solar é o ar aquecido, a avaliação das suas propriedades termodinâmicas (temperatura, umidade relativa, velocidade, dentre outras) é de extrema importância, de tal modo que, sob determinadas condições operacionais, seja possível proporcionar uma secagem uniforme do produto e reduzir o tempo de secagem do mesmo (GRILO, 2007).

A secagem natural é entendida como aquela em que o ar que promove a secagem do produto provem da ação dos ventos e a energia utilizada nesta secagem emana da incidência direta da energia solar.

Quando a secagem dos produtos agrícolas, tais como: milho, feijão e arroz, é feita em condições ideais, com temperatura, umidade relativa e teor de água controlados, são obtidos produtos com aparência adequada e qualidade nutritiva. Quando essas condições não são ideais, ou seja, quando se utiliza uma temperatura muito elevada, ocorre uma percentagem muito grande de grãos trincados que prejudica a estocagem (BROOKER et al., 1992).

Andrade (2006) define o processo de secagem de alimento como sendo um processo que, através do uso do calor ou métodos físicos, leva à redução da fração de água, como consequência, a atividade de água diminui, impedindo a contaminação microbiana e as reações químicas em geral, com exceção da oxidação lipídica. Este processo visa reduzir a quantidade de água a um nível inferior ao do crescimento de microrganismos, ficando entre 0,2 e 0,6, que também inibe as reações químicas, evitando assim a deterioração do produto. Os métodos de desidratação podem utilizar o calor para a redução da massa de água, levando à redução de peso e volume do alimento; como também pode utilizar a adição de solutos como açúcar e sal para diminuir a disponibilidade da água. A diminuição da deterioração do alimento através de ações por microrganismos faz da técnica de secagem uma das mais comuns e antigas como conservante de alimentos. A ação química e enzimática também pode ser reduzida, dependendo do nível de mobilidade da água que o processo de desidratação promove.

A secagem de produtos alimentares tem sido utilizada como forma de diminuir as perdas e agregar valor à matéria-prima, cujas técnicas adequadas de processamento são utilizadas visando a obtenção de produtos com qualidade e valor comercial. Quando seco, o alimento pode ser acondicionado, tornando-se disponível por um período maior de tempo quando comparado ao produto *in natura*. Uma das principais vantagens da secagem está na redução do volume final do produto, característica esta que proporciona uma conseqüente economia na embalagem, redução do custo de transporte e armazenamento (ANDREUCETTI et al., 2007).

A secagem de frutas é um dos processos mais antigos para sua preservação. No passado, era realizado exclusivamente por processos naturais, porém, somente nas regiões onde as condições climáticas o permitem, destacando-se a região do Mediterrâneo na produção de uva-passa (FIOREZE, 2004).

A secagem de alimentos 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).

Em vários trabalhos citados na literatura, somente os dados experimentais são apresentados (RODRIGUES, 2015). Porém, em outros trabalhos, modelos matemáticos são usados para uma descrição detalhada do transporte de água.

Os modelos empíricos de secagem apresentam uma relação direta entre o teor de água do produto e o tempo de secagem. Eles negligenciam os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros não têm qualquer significado físico. Desta forma, os modelos empíricos não fornecem informações sobre os importantes processos que ocorrem durante a secagem, embora, em alguns casos, possam descrever as curvas de secagem para determinadas condições experimentais (RODRIGUES, 2015).

Baini e Langrish (2007) compararam, em um estudo experimental de secagem contínua e intermitente de bananas, usando secadores solares, os dados experimentais obtidos com resultados oriundos de modelos empíricos e difusivos. Esses autores 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 consideraram que o modelo difusivo é adequado para prever o período de relaxação que ocorre na secagem intermitente. Eles ainda constataram que o teor de açúcar da banana, em diferentes graus de maturação, teve efeito insignificante sobre as curvas de secagem. Apesar das limitações, os modelos empíricos são tradicionalmente utilizados no estudo da cinética de secagem de produtos agrícolas e alimentos.

Os modelos empíricos e semi-empíricos são usados para descrever a secagem de uma partícula ou de uma camada fina de partículas. Os modelos empíricos consistem numa correlação direta entre o teor de água e o tempo de secagem, enquanto os semi-empíricos baseiam-se na hipótese da validade da Lei do resfriamento de Newton, assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de água do produto e seu respectivo teor de água de equilíbrio, para as condições de secagem especificada (BROOKER et al., 1992).

Para verificação da cinética de secagem, muitos autores observaram que a equação de Fick apresenta grandes limitações, quer seja pela necessidade de um grande número de termos, quer seja por não representar os dados experimentais em trechos das curvas. Dessa forma, para representar os processos de secagem de frutas, foi utilizado o modelo semi-teórico simplificado do modelo de Fick, o modelo de Page dado, pela (Eq. 1), (FARIAS, 2011).

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \text{Exp}(-kt^n) \quad (1)$$

onde,

RU = razão de umidade, [adimensional]

X= teor de água, [base seca]

X_e = teor de água de equilíbrio, [base seca]

X₀ = teor de água inicial, [base seca].

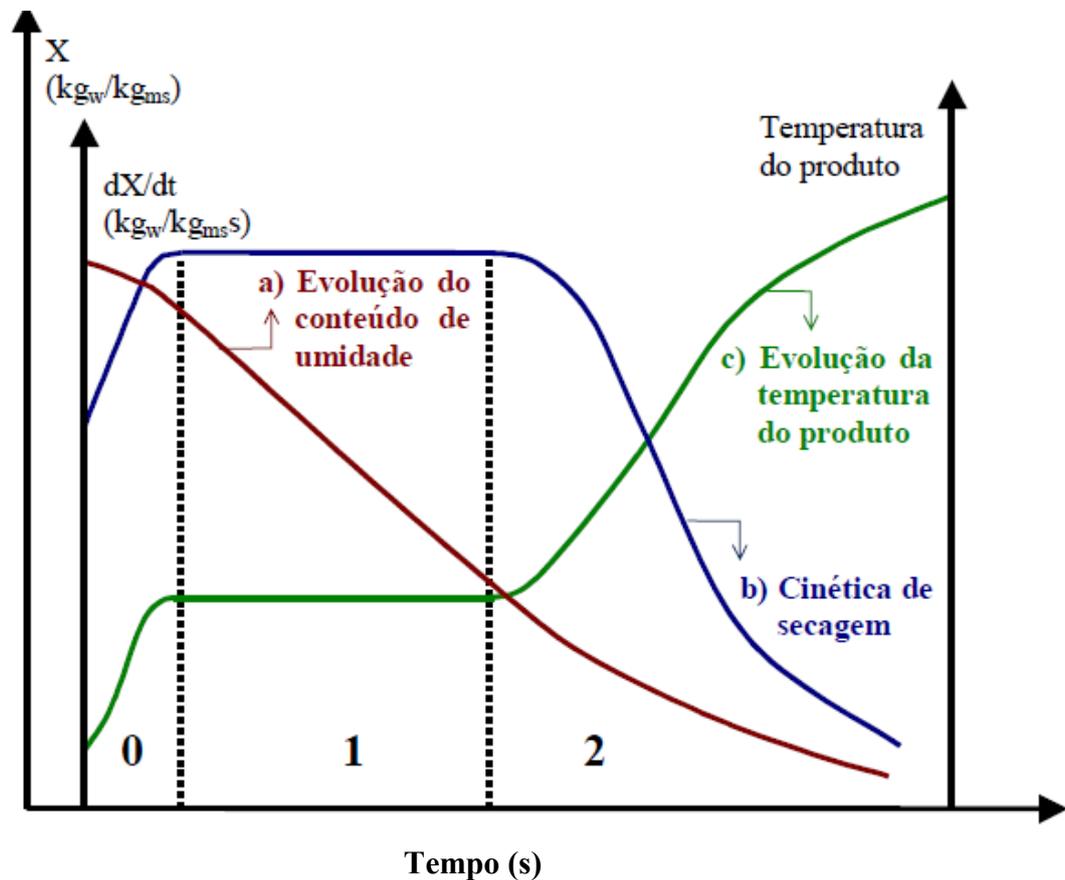
K = constante do modelo, [min⁻¹]

n = constantes do modelo

t = tempo, [minuto].

Segundo Alonso (2001), as transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida 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 cinética de secagem, ao longo do tempo, para um experimento utilizando ar de propriedades constantes.

Figura 2.1. Curva de secagem.



Fonte: Alonso (2001).

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (umidade 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 cinética de secagem do produto, dX/dt , obtida diferenciando a curva (a). A curva (c) representa a temperatura do produto durante a secagem.

Segundo os experimentos realizados por Silva et al. (2013), em uma estufa que utiliza energia elétrica, a secagem de banana inteira em camada delgada nas temperaturas de 40°C, 50°C, 60°C e 70°C ocorreu exclusivamente no período de taxa decrescente.

Diversos produtos agrícolas quando estão sendo secos individualmente ou em camada delgada, apresentam perda de água a uma taxa constante durante o período inicial de secagem, seguida por um período de secagem a uma taxa decrescente, como mostrado na curva (b) da Figura 2.1 (BROOKER et al., 1992; FIOREZE, 2004).

2.1.1 Determinação do teor de umidade

A determinação do teor de umidade pode ser feita de diversas formas e a escolha do método a ser utilizado vai depender, dentre outros fatores: da forma a qual a água está presente na amostra, da natureza da amostra e da rapidez desejada na determinação.

A água pode estar presente na amostra sob duas formas:

- Água livre: é a água que está simplesmente adsorvida no material, é a mais abundante. É perdida facilmente para o ambiente a temperatura em torno da temperatura de ebulição.
- Água ligada: é a água da constituição, que faz parte da estrutura do material, ligada a proteínas, açúcares e adsorvida na superfície de partículas coloidais, e necessita de níveis elevados de temperatura para sua remoção. Dependendo da natureza da amostra, requer temperaturas diferentes para a sua remoção, que frequentemente não é total e em alguns casos não é eliminada nem a temperaturas que carbonizem parcialmente a amostra.

Como o aquecimento da amostra pode causar sua caramelização ou decomposição dos açúcares, perda de voláteis ou ainda a oxidação dos lipídeos, é importante uma avaliação criteriosa e cuidadosa para a escolha do método mais adequado e conveniente à amostra.

As determinações de umidade são classificadas em métodos diretos e métodos indiretos.

Os métodos de determinação da água do produto podem ser classificados em diretos e indiretos. Nos métodos diretos, a água de uma amostra é removida e a determinação é feita pela pesagem, enquanto que nos métodos indiretos, as determinações são feitas mensurando características físicas do material relacionadas ao teor de água do produto (BROOKER et al., 1992; FIOREZE, 2004).

Métodos Diretos

Nos métodos diretos, a água é retirada do produto geralmente por processo de aquecimento, e o teor de umidade é calculado pela diferença de peso (medida da massa) das amostras no início e no fim do processo.

Devido a sua maior confiabilidade, os métodos diretos são empregados como padrão para a aferição de outros procedimentos (SILVA et al., 2008a). Como exemplos de métodos diretos para determinação dos teores de umidade de um produto, têm-se: estufa, infravermelho e destilação.

Por exigir um tempo relativamente longo para sua execução, às vezes representa uma desvantagem do método, por exemplo, quando se necessita de resposta imediata no controle de uma determinada operação.

Métodos Indiretos

Nos métodos indiretos, o teor de umidade é estimado em função das propriedades elétricas do produto em uma determinada condição.

São métodos práticos e rápidos, mas estão sujeitos a erros decorrentes da variação das propriedades físicas dos produtos, da temperatura ou da distribuição da umidade no interior do mesmo.

Os dois princípios empregados são o da resistência elétrica e o da medida da constante dielétrica (capacitância).

A quantidade de água removida durante o processo de secagem é calculada em função dos teores de umidade inicial e final do produto a ser desidratado e da massa total do produto antes de iniciar o processo. Teores esses, que podem ser expressos como a relação entre a massa de água contida no produto e a massa de matéria seca, como determina a Equação 2.

$$X_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \quad (2)$$

onde,

X_{bs} = teor de umidade, em base seca, [decimal];

m_{H_2O} = massa de água contida no produto, [kg];

m_{ms} = massa de matéria seca, [kg].

Outra forma de se expressar esses teores é através da relação entre a massa de água contida no produto e a massa total do mesmo, como mostrado na Equação 3.

$$X_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_t} \quad (3)$$

onde,

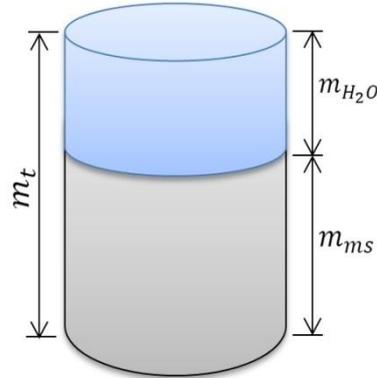
X_{bu} = teor de umidade, em base úmida, [%];

m_t = massa total do produto, [kg].

A Figura 2.2 representa o esquema da composição da massa de um produto agrícola, onde observa-se que a massa total desse produto é composta por uma fração de massa de matéria seca e outra de massa de água. Portanto:

$$m_t = m_{ms} + m_{H_2O} \quad (4)$$

Figura 2.2. Esquema da composição da massa de produtos biológicos.



Assim, é possível obter a determinação de teor de umidade em base seca ou em base úmida correlacionando as equações já citadas, obtendo-se as Equações 5 e 6.

$$X_{bu} = \frac{100X_{bs}}{1 + X_{bs}} \quad (5)$$

e,

$$X_{bs} = \frac{X_{bu}}{100 - X_{bu}} \quad (6)$$

Assumindo que apenas água seja removida durante o processo de secagem, tem-se que a quantidade de matéria seca se mantém constante e, relacionando a Eq. 4 com as Equações 5 e 6 obtém-se:

$$m_{msi} = m_{msf} = \frac{m_{ti}}{1 + X_{bsi}} \quad (7)$$

onde,

m_{msi} = massa inicial de matéria seca, [kg];

m_{msf} = massa final de matéria seca, [kg];

m_{ti} = massa inicial total do produto, [kg];

X_{bsi} = teor de umidade inicial, base seca, [decimal].

Logo, a quantidade de água removida é expressa por:

$$m_{H_2O_i} - m_{H_2O_f} = m_{ti} \frac{X_{bsi} - X_{bsf}}{1 + X_{bsi}} \quad (8)$$

onde,

$m_{H_2O_i}$ = massa de água contida no produto antes do processo de secagem, [kg];

$m_{H_2O_f}$ = massa de água contida no produto depois do processo de secagem, [kg];

X_{bsf} = teor de umidade final, base seca, [decimal].

A umidade dos produtos biológicos está diretamente relacionada com sua estabilidade, qualidade e composição, podendo afetar propriedades determinantes para a sua estocagem, embalagem e/ou processamento. Por isso, sua determinação é uma das medidas mais eficaz e utilizadas na análise de alimentos, sendo fundamental para o processo de secagem.

Pela Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 272, de 22 de setembro de 2005, que aprova o regulamento técnico para produtos vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis, são estabelecidos os requisitos específicos para determinação de frutas secas ou desidratadas (exceto frutas secas tenras), essas devem possuir umidade máxima de 25% (BRASIL, 2005).

Segundo Grilo (2007), são inúmeras as dificuldades enfrentadas na secagem de produtos agrícolas usando exclusivamente energia solar térmica em secadores solares de exposição direta. Existe variação nas quantidades produzidas de acordo com a situação do clima local (chuvas, nuvens, etc), além de que durante a noite praticamente não existe produção, as vezes chega a ocorrer a reidratação do produto agrícola.

Smitabhindu et al. (2008), desenvolveram um sistema otimizado que melhora a secagem de banana assistido por energia solar. A literatura apresenta poucos resultados a respeito da utilização de convecção forçada nos sistemas de secagem solar. Poucos trabalhos neste sentido têm sido usados para conduzir os pesquisadores, a simulação matemática e otimização dos sistemas de secagem alimentados por energia solar para frutas tropicais.

2.2 Banana

A banana é produzida em todas as regiões brasileiras, em diferentes condições edafoclimáticas e níveis de produção, com maior destaque nas regiões nordeste e sudeste. O Nordeste produz 40% da produção interna sendo a região de maior produção no país; esta posição se deve ao estado da Bahia que detém 1.152.483 toneladas de produção, (IBGE, 2013). No estado da Paraíba a produção ainda é incipiente com o total de 192.408 toneladas numa área plantada de 12.944 ha (IBGE, 2013).

A banana é fruta de consumo universal, comercializada por dúzia, por quilo e até mesmo por unidade. É rica em carboidratos e potássio, médio teor em açúcares e vitamina A, e baixo em proteínas e vitaminas B e C. A banana é apreciada por pessoas de todas as classes e de qualquer idade, que a consomem *in natura*, frita, assada, cozida, em calda, em passas, como doces caseiros ou em produtos industrializados.

Segundo Melo et al. (2005), o principal componente das frutas é a água, de 70 a 90%. Dos macros nutrientes, os carboidratos são os predominantes, geralmente na forma de açúcares (sacarose, glicose e frutose). Seu teor varia de 5 a 25% nas frutas frescas e as bebidas delas preparadas possuem, em média, teor de açúcares de 12%.

A banana é uma das frutas mais consumidas do mundo sendo cultivada na maioria dos países tropicais, além de constituir-se em uma fonte importante na alimentação humana pelo valor calórico, energético e, principalmente, pelo conteúdo mineral e vitamínico que ela apresenta (LIMA, 1999).

As qualidades alimentícias e comerciais da banana são influenciadas pelas condições de amadurecimento e armazenamento. Isso porque a banana (Figura 2.3) é um fruto climatérico (fruto sensível ao etileno, ou seja, amadurece pela ação do etileno) que apresenta alta taxa respiratória e alta produção de etileno após a colheita, o que a torna altamente perecível (NUNES et al., 2014).

Figura 2.3. Banana prata (*Musa spp.*)



Segundo Grilo (2013), devido ao rápido amadurecimento da banana, a sua vida de prateleira é muito curta, sendo este processo percebido pelas manchas escuras que aparecem na casca da fruta.

A banana madura, em geral apresenta 19% de açúcares e 1% de amido. O fruto é basicamente composto de: água (70%); proteína (1,2%); carboidrato rico em fósforo (27%), apresentando regular teor de cálcio, ferro, cobre, zinco, iodo, manganês e cobalto, vitamina A, tiamina, riboflavina, niacina e vitamina C (LIMA et al., 2000).

A banana apresenta uma alta higroscopicidade, ou seja, tem a propriedade de realizar trocas de água por meio de vapor ou líquido com o ar ambiente que a envolve através de adsorção ou dessorção. O conhecimento das isotermas de sorção é essencial para um projeto adequado de embalagens permeáveis e para estabelecer o teor de água que possibilite aumentar o tempo de armazenamento do produto (LIMA et al., 2000).

A banana apresenta teores de água inicial de, aproximadamente, 73% b.u., favorecendo o crescimento microbiano, o que causa a degradação das suas características organolépticas, levando a perda do valor nutricional e, por conseguinte, perda no valor comercial. A fim de evitar essa degradação, almeja-se que a fruta destinada a um tempo de armazenamento maior esteja com teores de água reduzido, em torno de 25-30% b.u., para isso, faz-se necessário que esse produto seja submetido a um processo de secagem (NUNES et al., 2014).

A técnica de processamento mais simples para banana é a obtenção da banana-passa, a típica banana seca brasileira. Assim é importante saber a influência dos parâmetros de secagem da banana para as condições ótimas do processo. Trata-se da banana que sofre um processo de secagem, até atingir um teor de umidade adequado, que, segundo Lima et al. (2000), deve ser em torno de 15 a 20%, em base úmida.

Bananas secas são estáveis à ação de micro-organismos, se o teor de umidade for menor que 23% (base úmida). Industrialmente, a secagem de banana é conduzida até que o teor de água em base úmida atinja o valor de 20 a 25% sendo o seu controle realizado de maneira prática, pela observação da cor, consistência e teor de água do produto final (MEDINA et al., 1978).

Segundo Borges et al. (2010), o branqueamento da banana prata cortada em formato cilíndrico sempre conduz a menores taxas de secagem, já quando cortada em forma de disco sua influência é mais acentuada a menores velocidades do ar.

A temperatura e o tempo de secagem são parâmetros importantes para alterar a cor dos produtos agrícolas durante a secagem, principalmente das frutas. Devido a esta importância vários pesquisadores vêm estudando os fenômenos de alteração de cor e textura da banana durante o processo de secagem (JIANG et al., 2010; PAN et al., 2008; NGUYEN e PRICE 2007).

2.3 Utilização da energia solar

O aproveitamento da energia gerada pelo sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, como fonte de calor e de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para se enfrentar os desafios do novo milênio. Quando se fala em energia, deve-se lembrar que o sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia. É inclusive a partir da energia do sol que se dá a evaporação, origem do ciclo hidrológico, que possibilita o represamento e conseqüente geração de eletricidade nas usinas hidrelétricas.

É também por causa da energia solar que a matéria orgânica, como a cana-de-açúcar, é capaz de se desenvolver através da fotossíntese, para posteriormente ser transformada em energia na forma de açúcar ou etanol, podendo ainda ser utilizada como combustível através do seu resíduo cada vez mais nobre, o bagaço.

Segundo Grilo (2007), a principal fonte de energia no nosso planeta é o sol: diretamente pela luz e pelo calor; indiretamente porque é a energia solar que alimenta parte da vida na terra, ela é responsável pela chuva, pelo vento e até pela formação dos combustíveis fósseis que são energia solar transformada em energia química.

Lima et al. (2006) citam alguns exemplos de fontes de energia que derivam da energia solar, como as hidrelétricas, que a utilizam na evaporação da água que causa as chuvas e enche as represas, para mover as pás dos geradores elétricos.

Neste século XXI, a utilização combinada dos vários tipos e fontes de energia, com ênfase nas energias renováveis é o caminho para construção de uma sociedade equilibrada que utiliza de forma eficiente os recursos energéticos proporcionando qualidade de vida elevada e promovendo o desenvolvimento sustentável.

O Brasil é uma potência energética. O Nordeste brasileiro tem uma incidência solar especial e pouco se aproveita essa energia, limpa e gratuita. A natureza nos deu fartos territórios com elevada incidência do recurso solar, terras agriculturáveis para produção de biomassa energética, recursos hídricos com elevado potencial energético e agora, com as recentes descobertas do pré-sal, nos colocou definitivamente como líder mundial na área dos recursos energéticos. É preciso estarmos 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, 2013; PRAKASH e ANILKUMAR, 2013; SAVICKI, 2007).

Segundo Trigueiro (2012), vinte e cinco cidades e nove estados brasileiros já aprovaram leis que tornaram obrigatória a instalação de coletores solares para certos tipos de edificação. Ao todo, 2,2 milhões de domicílios já usam coletores para aquecer a água. Isso representa 3,2%

de todos os lares do país. Setenta e dois por cento do mercado de aquecimento solar está concentrado no uso domiciliar.

Segundo Savicki (2007), pesquisadores de várias universidades brasileira, já utilizam a energia solar em diversas aplicações como: processos de secagem de frutas e grãos, aquecimento de água, calefação de ambiente, refrigeração por ciclo de absorção e adsorção, destiladores solares por efeito térmico, entre outras.

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 (PENEIRO et al., 2010).

Segundo Joshi et al. (2005), a eficiência de sistemas de secagem com energia solar é afetada pelas condições ambientais, irradiação solar, temperatura, umidade relativa, velocidade e pressão atmosférica do ar ambiente. Testando 12 secadores diferentes, a eficiência térmica máxima encontrada foi 22,1% para o secador de gabinete, 21,4% para o secador de rack e 21,7% para o secador de túnel.

2.4 Os secadores solares

O desenvolvimento de secadores de baixo custo que utilizam como fonte energética a irradiação solar, apresenta uma importância cada vez maior nos dias atuais, porque é uma alternativa para os produtores que não têm acesso aos secadores convencionais que operam com energia elétrica que têm elevado custo de aquisição e operação (BARBOSA, 2011).

Devido ao grande desperdício de alimentos, principalmente no setor da fruticultura, um número cada vez maior de pesquisadores vem direcionando sua atenção na busca de alternativas para favorecer os pequenos agricultores, os seja, a agricultura familiar. O foco principal é a construção de secadores solares com materiais de baixo custo, com boa eficiência e que tenham

algum tipo de controle das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, principalmente temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem (GRILO et al., 2009; SOUZA et al., 2012; PRAKASH e ANILKUMAR, 2013; TUNDE-AKINTUNDE, 2011).

De acordo com Ferreira et al. (2008), secadores solares usam fontes de energia livres e renováveis, reduzem as perdas de secagem (em comparação com a secagem direta ao sol) e apresentam custos operacionais mais baixos do que a secagem elétrica.

As atividades na UFCG para o desenvolvimento de secadores que utilizam a energia solar iniciaram-se a cerca dez anos e vários protótipos foram construídos e testados nas mais diversas situações. Com o pensamento investigativo dos processos de transferência de calor e massa e o espírito inovador de aproveitar os recursos energéticos da região para promover o desenvolvimento sustentável, o estágio atual das pesquisas demonstra que o caminho está sendo positivo e a cada novo passo são incorporadas inovações que contribuem para aumentar a eficiência do secador solar.

Com o trabalho multidisciplinar que é desenvolvido, as perspectivas são cada vez mais animadoras, pois já se encontra em execução estudos com alunos da graduação, pós-graduação (mestrado e doutorado) nas áreas de Engenharia, Matemática e Desenho Industrial que viabilize o desenvolvimento de um sistema que tenha, além de elevada eficiência energética, um design moderno e compatível com suas funções.

No secador solar, o ar ambiente é aquecido pela irradiação solar e percorre de forma natural ou forçada, retirando a água do produto que se quer secar. O material pode ser colocado diretamente no coletor, secagem direta, ou em uma câmara de secagem, secagem indireta (SOUZA et al., 2012).

O secador solar de exposição direta (Figura 2.5), é um equipamento muito simples, de fácil construção, operação e manutenção, sendo composto basicamente de três elementos: o corpo, que é uma caixa retangular construída de madeira; duas bandejas, onde o produto, é colocado para ser desidratado; e a cobertura do secador, que lhe dá a característica de estufa. Neste secador a irradiação solar é diretamente incidente sobre o produto a ser seco. No secador existem duas aberturas que realizam um papel muito importante para o sucesso do processo de

secagem. Estas duas aberturas são posicionadas com níveis diferentes: uma mais baixa, para entrada do ar frio e outra mais elevada, para saída do ar aquecido. Já no secador de exposição indireta (neste trabalho) o produto a ser desidratado não está diretamente exposto à irradiação solar, para minimizar a descoloração e rachaduras na sua superfície. A câmara de secagem é utilizada para manter o produto na bandeja, neste secador a irradiação solar não é diretamente incidente sobre o produto a ser seco. O ar é aquecido em um coletor solar e, em seguida, conduzido para uma câmara de secagem onde se encontra o produto a ser seco.

Segundo Park et al. (2007), existe uma grande variedade de produto a ser seco usando diferentes métodos de secagem, como também existem diversos modelos de secadores projetados para atender a uma demanda específica. Os critérios de classificação dos secadores são variados e atende as diferentes necessidades do processo, por isso, o conhecimento do material a ser seco é a primeira exigência para o dimensionamento de um bom secador solar.

Os secadores solares, a exemplo de outros tipos de secadores, também podem ser classificados quanto a passagem do fluido aquecido: secadores de camada estacionária, fluxo cruzado e fluxo concorrente. Nos secadores de camadas estacionárias não existe movimentação do produto durante a secagem, enquanto os de fluxos cruzados caracterizam-se por fazer com que o ar passe perpendicularmente à camada do produto entre duas chapas perfuradas. Já os de fluxos concorrentes caracterizam-se pelo escoamento do produto por quatro pirâmides invertidas, sendo direcionada por um duto central (SILVA et al., 2008; CAVALCANTI-MATA et al., 2006; FIOREZE, 2004; BROOKER et al., 1992).

Segundo Ferreira et al. (2007), estudando secadores artificial e híbrido com cobertura de vidro, concluíram que as características térmicas do ar de secagem do secador híbrido são estáveis e proporciona um produto final de qualidade semelhante ao obtido em um secador artificial, além de gerar uma economia de energia em torno de 38% e reduzir o tempo de secagem.

2.5 Estado da arte para secadores solares

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.

Foram realizadas pesquisas sobre secadores solares nos endereços mais recomendados e no portal periódico CAPES, em especial nos específicos da área, catalogados no nível, *qualis* A e B. Desses foram selecionados cerca de uma centena de artigos. Ao estudar cada um desses, são apresentados, em ordem decrescente de data de publicação, um resumo com as principais características e conclusões dos artigos que guardam maior identidade com o secador solar em desenvolvido na LEMT/UFCG.

Fudholi et al. (2014) testaram experimentalmente e analisaram o desempenho de um secador solar usado na secagem de pimentão vermelho durante 33 horas. Neste estudo a primeira lei da termodinâmica foi usada para estimar a energia útil adquirida 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/m^2 e uma taxa de fluxo de massa de ar de $0,07 \text{ kg/s}$.

Mustapha et al. (2014) construíram e testaram 5 secadores solares, usados na secagem de peixe e concluíram que os secadores solares estão entre os melhores dispositivos, quanto a qualidade do produto, economia do processo e do ponto de vista ambiental. Concluíram também que, devido ao baixo custo e menor tempo de retorno, os secadores solares são importantes para a economia de países em desenvolvimento, particularmente nas áreas rurais, onde o acesso à energia elétrica ainda é insipiente.

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 $55,6^\circ\text{C}$ e $19,9\%$, respectivamente. A eficiência global do secador solar foi de $12,37\%$, o que é típico para secadores solares de convecção natural.

Stiling et al. (2012) fizeram uma comparação de desempenho entre dois secadores solares 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 fotovoltaico 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 observado 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. Mostraram que os secadores 1 e 2 têm a vantagem de serem simples e de baixo custo, sendo a desvantagem sua a 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.

Fudholi et al. (2010) 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 fotovoltaica de 53 W para secar bananas (cerca de 300 kg), a fim de investigar o seu desempenho. Verificaram que a eficiência média diária do processo de secagem foi 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. Verificaram 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 diminuiu mesmo com o

aumento da irradiação solar. Neste caso, a eficiência instantânea foi de 35% e 27%, respectivamente, para 570 W/m² e 745 W/m² de irradiação solar.

Al-Juamily et al. (2007) construíram e testaram um secador solar com (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). Observaram que o fator mais eficaz na taxa de secagem é a temperatura do ar no interior da câmara de secagem. Mediram o efeito da variação da velocidade do ar de secagem 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%, portanto, não há 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 câmara, ambos em camada fina.

Madhlopa e Ngwalo(2007) construíram, com materiais simples, e testaram em três modos de operação (solar, híbrido e fóssil), um secador solar de exposição indireta, na secagem de 20 kg abacaxi fresco (*Ananas comosus*). Os valores médios da eficiência foram 15%, 11% e 13% nos modos de operação, solar, híbrido e fóssil, respectivamente. E assim, concluíram que o secador solar é adequado para a preservação dos abacaxis e outros alimentos frescos.

Exemplos de alguns secadores solares.

A seguir são mostrados exemplos de secadores solares que foram objeto de estudo em algumas universidades do Brasil.

Na Figura 2.4 pode-se ver um secador termosolar construído na Universidade Federal de Sergipe (UFS). O protótipo foi construído com cantoneiras de ferro e alumínio. Observa-se que foi utilizado o vidro no coletor solar e na câmara de secagem. Este secador termosolar também utiliza o gás liquefeito de petróleo (GLP) como fonte de energia auxiliar. A câmara de secagem apresenta um volume muito grande quando comparado com o volume do coletor solar, isso dificulta a secagem do produto.

Figura 2.4. Secador solar construído na Universidade Federal de Sergipe, UFS.



Na Figura 2.5 são mostrados dois protótipos de secador solar de exposição direta desenvolvidos na UFCG, em Campina Grande, por Nunes et al. (2014) e que atualmente são largamente utilizados na secagem de frutas, mas que não permite o controle do ar de secagem. O fluxo do ar de secagem do equipamento ocorre através de convecção natural e sua movimentação depende do efeito termossifão.

Figura 2.5. Secador solar construído na UFCG.



Fonte: Secador solar de exposição direta construído por Nunes et al. (2013).

Na Figura 2.6 pode-se ver um secador solar construído por Silva et al. (2006) na UFV. Observe que o secador imita uma secagem em terreiro, a diferença é que o secador solar fica a alguns centímetros do chão e assim protege o produto da ação de animais, mas não apresenta

mecanismo de controle contra uma possível reumidificação noturna e nem controle do ar de secagem.

Figura 2.6. Secadores em telas suspensas, para secagem solar construído na UFV.



Fonte: Silva et al. (2006).

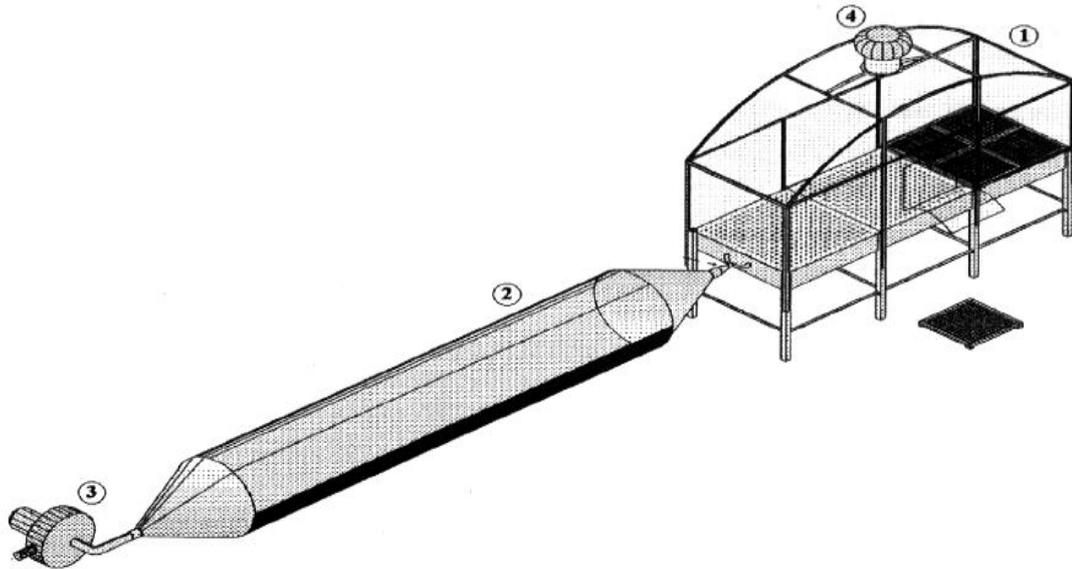
A Figura 2.7 mostra um secador solar com base de madeira construído na Universidade Federal do Paraná, é um secador rústico com bandejas de alumínio que não é recomendado, devido a sua oxidação que pode contaminar o produto a ser desidratado.

Figura 2.7. Secador Solar construído na UFPR.



A Figura 2.8 é um sistema projetado por Costa (2008), na UFRN para secagem de frutas tropicais utilizando energia solar e eólica. Secador tipo foguete feito de ferro e alumínio com câmara de secagem. A cobertura do secador tem o formato de uma superfície parabólica com um exaustor eólico que serve para ajudar na retirada do ar de secagem.

Figura 2.8. Sistema projetado para secagem utilizando energia solar e eólica.



Legenda: 1 Câmara de secagem, 2. Coletor solar, 3. Ventilador e 4. Exaustor.

Fonte: Costa (2008).

O secador da Figura 2.9 foi desenvolvido na UFCG, por Grilo e Lacerda, (2013). É um secador solar de exposição direta com um formato diferente dos secadores solares tradicionais. Este secador tem um *design* inovador e foi utilizado para secagem de banana. A partir do projeto e testes deste secador foi escrito uma cartilha que tem sido utilizada para divulgar o uso de energia solar na secagem de banana.

Figura 2.9. Secador solar hexagonal.



Fonte: Grilo e Lacerda (2013).

Os secadores solares de exposição indireta apresentam vantagens quando comparado com os secadores de exposição direta, porque no primeiro tipo é possível realizar o controle das

principais propriedades termodinâmicas do ar de secagem, tais como, temperatura, umidade relativa e velocidade.

2.6 Utilização da energia solar fotovoltaica

Energia fotovoltaica é a energia elétrica produzida a partir de luz solar, e pode ser produzida mesmo em dias nublados ou chuvosos. Quanto maior for a irradiação solar maior será a quantidade de eletricidade produzida. A geração de energia fotovoltaica a muito tempo é vista como uma tecnologia de energia limpa e sustentável, que se baseia na fonte renovável de energia mais abundante e amplamente disponível no planeta, o Sol. Os sistemas fotovoltaicos possuem baixo impacto ambiental, produzem energia através de uma fonte renovável e de maneira silenciosa. Esta tecnologia, já utilizada em países desenvolvidos desde o início dos anos 80, pode ser amplamente aplicada no Brasil, um país ensolarado por natureza e de grande extensão territorial, onde a geração distribuída tem muito a contribuir. Uma das vantagens dos sistemas fotovoltaicos é a possibilidade de aplicação em meios urbanos, onde é grande o consumo da energia gerada de forma convencional, podendo ser instalados em edifícios, condomínios residenciais, casas isoladas, indústrias e comércios.

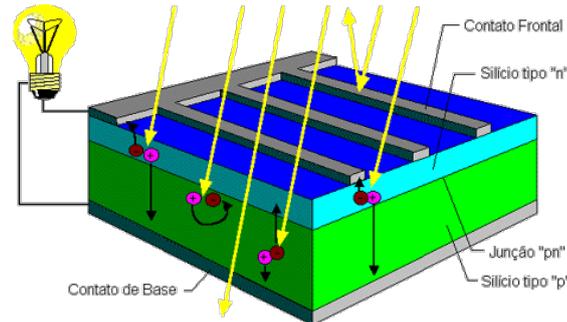
A primeira vez que foi verificada a conversão direta de luz em energia elétrica foi em 1839, pelo físico Edmond Becquerel, onde se observou que, quando exposto à luz, ocorria uma diferença de potencial nas extremidades de um material semicondutor.

Com o advento dos programas espaciais, os investimentos em sistemas fotovoltaicos impulsionaram essa tecnologia e, associado à crise mundial de energia, possibilitou a utilização deste mecanismo não apenas para os programas espaciais, mas para suprir o fornecimento energético no meio terrestre.

Os módulos fotovoltaicos consistem na interligação de células solares que, por sua vez, são compostas de uma fina camada de silício tipo N (material resultado do acréscimo de fósforo ao cristal de silício puro) e outra mais espessa de silício tipo P (silício puro acrescido de boro), que separadamente são eletricamente neutras, mas juntas geram um campo elétrico.

Ao incidirem sobre as células fotovoltaicas, os fótons que integram a luz solar se chocam com os elétrons do silício energizando-os e transformando-os em condutores. Por meio de outro condutor externo à célula, conecta-se a camada negativa à positiva, gerando-se, assim, um fluxo de elétrons na conexão, ou seja, uma corrente elétrica, como é possível observar na representação esquemática mostrada na Figura 2.10.

Figura 2.10. Representação esquemática de uma célula fotovoltaica.



Fonte: <http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-o-efeito-fotovoltaico/>.

Como a tecnologia utilizada para fabricação de módulos fotovoltaicos demanda investimentos elevados, a utilização dessa forma de energia ainda está avançando lentamente.

No entanto, com a disseminação dessa tecnologia, novas empresas estão investindo no setor e os custos para implantação dos sistemas interligados na rede começam a ganhar aceitabilidade comercial. Outro ponto a destacar, são as configurações desses sistemas com a retirada de elementos de armazenamento da energia excedente, o que também tem contribuído na diminuição dos preços de sistemas fotovoltaicos mais simples.

2.7 Posicionamento dos secadores e o movimento aparente do sol

O posicionamento adequado do secador solar é responsável direto pela maximização da eficiência do equipamento e conseqüentemente do processo de secagem. Por isto é importante compreender a movimentação aparente do sol para uma localidade na superfície da Terra em relação ao dia e ao longo do ano.

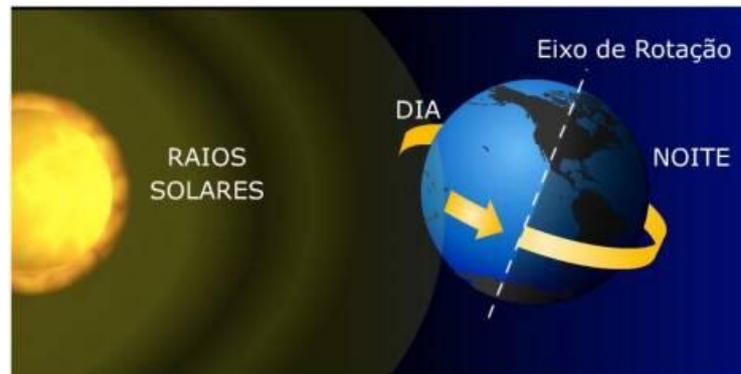
A fim de se obter um melhor aproveitamento da irradiação solar incidente, os coletores solares devem ser posicionados de forma que a incidência da irradiação ocorra o mais

perpendicularmente possível ao plano da superfície coletora. Como é inviável economicamente construir equipamentos de secagem indireta que funcionem como superfície heliostática. No hemisfério sul, o secador solar deve estar voltado para o norte, privilegiando a captação de energia solar durante a estação inverno.

Desse modo, necessita-se observar a movimentação relativa do sol em relação a um observador na terra. O movimento de translação e de rotação da Terra em relação ao sol são determinantes para estabelecer o melhor posicionamento dos sistemas de aproveitamento da energia solar na superfície terrestre.

O movimento da Terra em torno de um eixo imaginário que passa pelo seu próprio centro é denominado de rotação, tem duração de 24 (vinte e quatro) horas e é responsável pela divisão do tempo em dia e noite, como mostrado na representação esquemática da Figura 2.11.

Figura 2.11. Representação do movimento de rotação da Terra.



Fonte: http://www.escolamaxima.com.br/universomx/hmpgs/joaopa_luis/rotacao.htm.

Já o movimento de translação da Terra em torno do sol dura, aproximadamente, 365 (trezentos e sessenta e cinco) dias e determina a divisão do ano em estações; outono, inverno, primavera e verão, como mostrado na representação esquemática da Figura 2.12. Por isto, a quantidade e o ângulo de incidência da irradiação solar sobre a superfície terrestre, para uma determinada localidade, variam ao longo do ano.

Em março inicia-se a primavera no hemisfério Norte e o outono no hemisfério Sul. Em seguida, em junho, ocorre o início do verão no hemisfério Norte e do inverno no hemisfério Sul. Em setembro, têm-se o início do outono no hemisfério Norte e da primavera no hemisfério

Sul. Por fim, no mês de dezembro, acontece o início do inverno no hemisfério Norte e do verão no hemisfério Sul, Figura 2.12.

Figura 2.12. Representação do movimento da Terra em torno do sol.



Fonte: <http://www.sobiologia.com.br/conteudos/Universo/sistemasolar2.php>.

Outra particularidade em relação aos movimentos terrestres diz respeito ao eixo de rotação terrestre, que tem uma inclinação de $23,45^\circ$ em relação à linha imaginária do Equador. Logo, durante o movimento de translação da terra em torno do sol o eixo de rotação da terra varia de $-23,45^\circ$ a $23,45^\circ$, o que se denomina de declinação solar da terra.

Em razão do movimento de translação e da declinação solar da Terra, cada hemisfério fica, alternadamente, mais exposto aos raios solares durante um período do ano. Nos meses de dezembro a março, o hemisfério Sul fica mais exposto ao sol. É quando os raios solares incidem perpendicularmente sobre pelo menos alguns pontos do hemisfério Sul. É verão nesse hemisfério.

Para localidades posicionadas no hemisfério sul, caso da cidade de Campina Grande-PB, uma superfície heliostática deveria se movimentar continuamente para receber a incidência da irradiação solar perpendicular à sua superfície. Isto demandaria um investimento elevado. O que geralmente se faz é posicionar a superfície coletora de energia solar voltada para o norte geográfico na posição de receber a irradiação solar com melhor ângulo de incidência no período de inverno, quando a demanda energética é maior. Por isso, os coletores de energia solar na

cidade de Campina Grande, PB são voltados para o Norte com um ângulo de aproximadamente 17° a 22° que corresponde à soma da latitude do local (7° sul) mais um ângulo de 10° ou 15° (GRILO, 2007). Nesta pesquisa o secador solar ficou posicionado a uma inclinação de 22° virado para o norte, ou seja, 15° mais 7° .

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Informações Gerais

Como se trata de uma tese experimental que envolve o desenvolvimento de um novo equipamento utilizado na secagem de frutas, neste capítulo a metodologia utilizada e os materiais empregados serão relatados separadamente utilizando-se a sequência:

- O produto a ser desidratado (banana);
- O equipamento (secador solar é um coletor solar e uma câmara de secagem)
- A fonte de energia utilizada (energia solar térmica e solar fotovoltaica);
- O processo de secagem da banana;
- Análise energética do sistema de secagem.

As atividades foram realizadas no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT), da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM), do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em Campina Grande, PB, mostrado na Figura 3.1. O laboratório possui dois *solarium*, posicionados no 2º e 3º pavimentos, mostrados na Figura 3.2, onde foi testado o secador solar desenvolvido.

Figura 3.1. Fotos do LEMT, UFCG.



Figura 3.2. Fotos do solarium do LEMT, UFCG.



3.2 O produto a ser desidratado (banana)

A variedade de banana utilizada nos experimentos foi a banana tipo prata (*Musa spp.*), adquirida na região de Campina Grande. Esta variedade foi escolhida por ser a de maior consumo na região.

As bananas adquiridas foram selecionadas no estágio de maturação próprio para consumo imediato, como mostrado na Figura 3.3. Isto indica um tempo de prateleira de aproximadamente 7 a 10 dias sob pena de ficarem impróprias para consumo. Este fato foi constatado por uma degustação e por uma análise visual da banana ainda com casca. A medição do teor de água, neste caso a banana já descascada, apresentou-se em torno de 71% em base úmida.

Figura 3.3. Banana prata (*Musa spp.*) *in natura* com casca, própria para consumo.



3.3 O equipamento de secagem (coletor solar com câmara de secagem)

Um dos objetivos desta tese foi desenvolver um secador solar de frutas que utilize apenas a energia solar como fonte de energia. Por isto, um grande desafio foi projetar uma câmara de secagem do sistema com características especiais, capaz de manter a temperatura do ar de secagem no interior da câmara sem grandes variações e de preferência com temperatura entre 40°C e 60°C ao longo de cada dia.

A manutenção da temperatura do ar de secagem em valores constantes no interior da câmara de secagem em um equipamento tradicional de secagem de banana é obtida com o uso intensivo da energia elétrica. Esses equipamentos, em geral, apresentam a necessidade de um investimento inicial elevado e um consumo de energia elétrica, quando em operação, também muito grande, porque, no caso, ocorre uma conversão de energia elétrica em energia térmica.

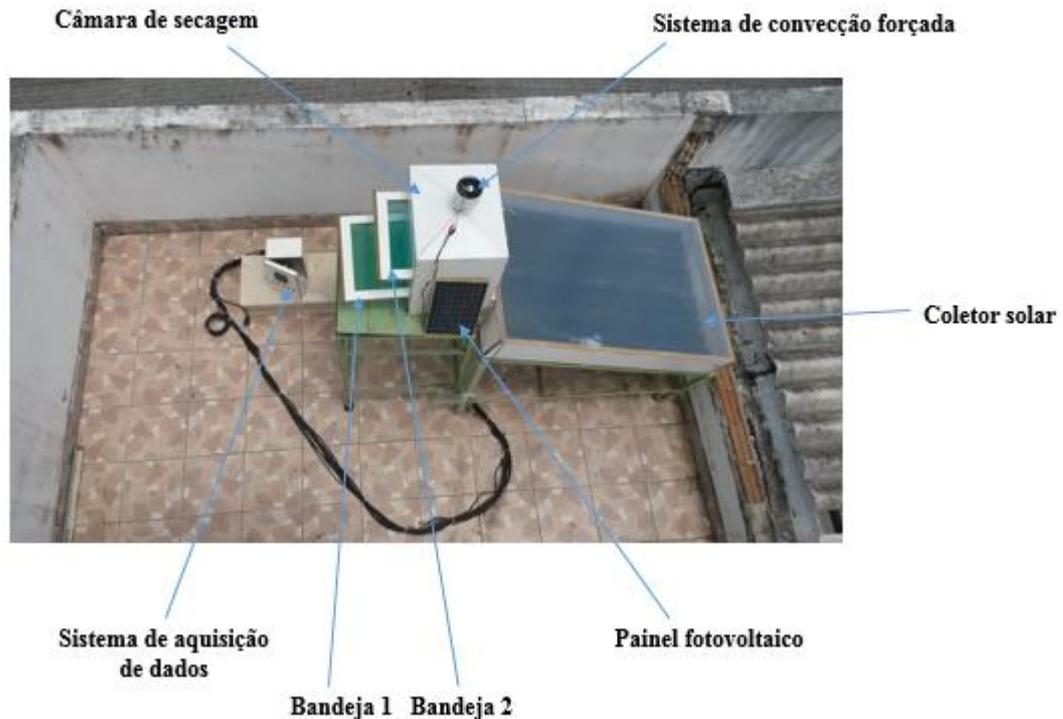
Para descrever com detalhes a metodologia utilizada e os materiais utilizados no secador solar desenvolvido foram relatadas separadamente as características do coletor solar, da câmara de secagem e do sistema de medição de dados/ou de parâmetros que foram construídos especificamente para esta tese. A Figura 3.4 mostra uma foto do sistema de secagem solar desenvolvido, que permite uma visão do conjunto e da integração entre os componentes.

Figura 3.4. Vista panorâmica e de cima do protótipo do sistema de secagem solar.



A Figura 3.5 mostra a posição das bandejas 1 e 2, do mini painel fotovoltaico e outros componentes do sistema de secagem.

Figura 3.5. Vista de cima do protótipo do sistema de secagem solar, indicando cada componente.



3.3.1 Dimensionamento do sistema de secagem

3.3.1.1 Coletor solar

Num sistema de secagem de exposição indireta, o coletor solar tem um dimensionamento diferente do coletor solar de exposição direta, porque no sistema de exposição indireta, a função do coletor solar, além de aquecer o ar de secagem, é também manter a temperatura no interior do coletor elevada o mais constante possível, disponibilizando e entregando à câmara de secagem um ar de secagem com quantidade e qualidade térmica capaz de promover o processo de secagem da banana na câmara de secagem.

A obtenção destas características foi conseguida com o uso de uma telha de fibrocimento pintado de preto fosco, como inovação, que funciona como capacitor térmico no interior do coletor solar, mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6. Telha de fibrocimento pintada de preto fosco utilizada como capacitor térmico.



A Figura 3.7 mostra o secador solar com e sem cobertura e a câmara de secagem em teste no *solarium* do LEMT/UFCG. Os números de 1 a 10 representam a localização dos termopares distribuídos no secador solar.

Figura 3.7. Fotos do sistema de secagem solar no solarium do LEMT/UFCG.



3.3.1.2 Materiais utilizados no sistema de secagem

Os materiais empregados na construção do secador solar foram os seguintes:

- **Base de fibras de média densidade conhecido comercialmente como *Medium Density Fiberboard (MDF)***: material fabricado com fibras de madeiras selecionadas de pinus ou eucalipto de reflorestamento, aglutinadas com resina sintética termo fixa, sob

a ação conjunta de calor e pressão. Aplicado em toda a estrutura do secador solar. O MDF Ultra apresenta dupla proteção contra umidade e cupins, o que lhe garante um prolongamento de vida útil, principalmente quando o equipamento está exposto as ações de intempéries;

- **Cobertura de policarbonato alveolar:** material elaborado à base de resina, que oferece transmissividade elevada à irradiação solar incidente e alto nível de segurança. Foi utilizado como cobertura transparente para captação da luz solar no coletor solar, em substituição ao vidro transparente de 4 mm, permitindo a obtenção do efeito estufa e facilitador da visualização do processo de secagem; o uso do policarbonato é uma inovação dos secadores construídos na UFCG;
- **Velcro:** dispositivo de fixação composto por duas tiras de tecido composta de ganchos e loops. Empregado para conectar o policarbonato ao MDF, bem como, na fixação de MDF com MDF. O velcro permite o desmonte de alguns componentes removíveis, o que facilita a locomoção e limpeza do equipamento;
- **Tela de nylon:** material de fibra têxtil sintética que apresenta ótima resistência ao desgaste e à tração. Usada nas bandejas onde se deposita o material a ser desidratado. A tela de nylon permite a circulação do ar no interior da câmara e apresenta facilidade para limpeza de resíduos das frutas, entre dois processos de secagem;
- **Telha de fibrocimento:** placa absorvedora de energia solar (uma telha de fibrocimento pintado de preto fosco) com espessura de 4 mm. Utilizado como refletor e absorvedor de calor posicionado no interior do coletor solar, a telha pintada de preto fosco apresenta elevada capacidade absorptiva e emissiva, o que facilita o processo de transferência de calor ao ar de secagem. Funciona também como capacitor térmico.

Além desses, ainda foram utilizados na construção do equipamento de secagem alguns componentes eletrônicos, que viabilizaram o sistema de exaustão do ar de secagem, tais como:

- **Coolers:** ventoinha, equipamento largamente empregado no sistema de resfriamento do interior dos gabinetes de computadores desktop. No sistema de secagem o *cooler* foi

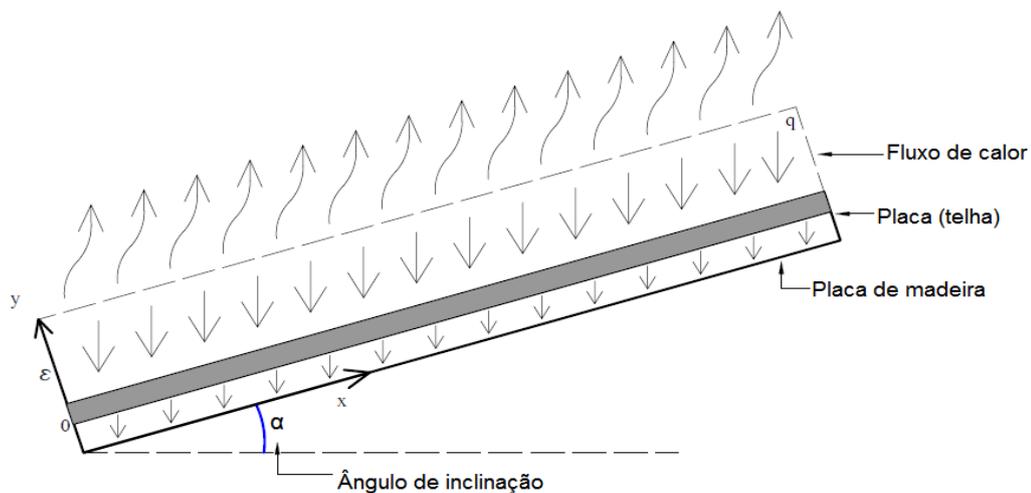
utilizado para forçar a circulação de ar para no interior da câmara de secagem. Seu acionamento ocorre através do uso da energia solar fotovoltaica;

- **Mini painel solar fotovoltaico:** módulo de conversão direta da energia solar em energia elétrica através de células fotovoltaicas, utilizado para fornecimento de eletricidade aos *coolers*, neste caso o sistema fotovoltaico utilizado não tem bateria/acumulador, ou seja, seu funcionamento é contínuo em tempo real;
- **Termopares tipo K:** sensores de temperatura simples, robustos e de baixo custo, amplamente utilizados nos mais variados processos de medição de temperatura.

Além desses materiais utilizados, o sistema de secagem solar tem as seguintes características: possui uma câmara de secagem, duas bandejas de secagem onde são posicionadas as bananas, base de apoio e uma chaminé por onde sai o ar do interior da câmara. A área de entrada do ar de secagem no coletor solar é de 60.000 mm² (com dimensões de 600 mm por 100 mm) e a área de saída do ar de secagem de 24.000 mm² (com dimensões de 400 mm por 60 mm) acoplada à câmara de secagem.

A Figura 3.8 representa o modelo físico da transferência de calor na placa absorvedora do coletor solar. A placa adsorve a irradiação solar que atravessa a cobertura de policarbonato, mantendo a temperatura no interior do coletor acima da temperatura ambiente e transferindo, esse calor ao ar de secagem, que escoo ao longo do seu comprimento.

Figura 3.8. Modelo físico da transferência de calor na placa absorvedora do coletor solar.



A velocidade do ar de secagem é medida na saída do *cooler* e a umidade relativa do ar de secagem foi medida apenas na entrada do coletor solar nos experimentos de 1 a 4. Nos experimentos 5 e 6, realizados nos meses de fevereiro e março de 2016, foram medidos a umidade relativa do ar de secagem e a temperatura do ar de secagem nas entradas e saídas do coletor solar e da câmara de secagem.

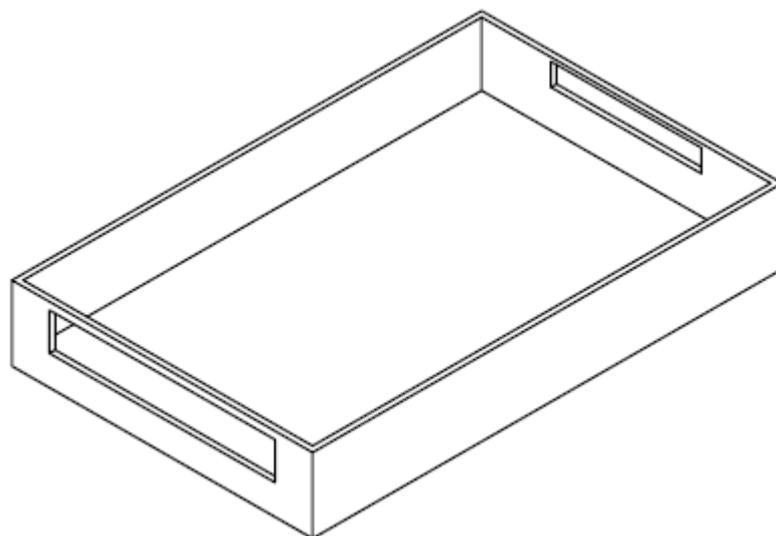
3.3.1.3 Dimensionamento do coletor solar

O dimensionamento do coletor solar levou em consideração a necessidade de seu volume interno ser maior do que o volume interno da câmara de secagem (aproximadamente 3 vezes maior), isto é importante para garantir um grande volume de ar de secagem com as características termodinâmicas ensejadas na câmara. Para isto as dimensões características do coletor são mostradas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1. Principais características construtivas do coletor solar.

Componente	Observação	Volume [L]	Área [m²]
Coletor solar	Interior	176	---
Entrada do ar	Interna	---	0,060
Saída do ar	Interna	---	0,024
Superfície transparente	---	---	1,000

Figura 3.9. Desenho esquemático do coletor solar desenvolvido.



A Figura 3.9 mostra um desenho esquemático do coletor solar que foi desenvolvido, e no Apêndice B, são apresentados os desenhos resultantes do dimensionamento, com as respectivas dimensões

3.3.1.4 A câmara de secagem

A câmara de secagem do sistema é um equipamento muito importante no equipamento desenvolvido. Projetar e construir este aparato foi um desafio uma vez que a fonte de energia utilizada é fortemente variável ao longo do dia e ao longo do ano, e pretende-se que o ar de secagem tenha valores de temperatura constante, ou com pequenas variações, no interior da câmara.

Desenvolver estratégias para manter as propriedades termodinâmicas do ar de secagem no interior da câmara com valores adequados ao processo de retirada de água das frutas, envolve criatividade e conhecimento de várias áreas da engenharia.

A seguir serão relatadas as providências adotadas para o dimensionamento adequado, com uso de matérias simples e facilmente encontrados no comércio local, e a metodologia utilizada para verificação dessas propriedades do ar de secagem, principalmente sua temperatura e umidade relativa.

A Figura 3.10, mostra uma foto da câmara de secagem em funcionamento durante um dia de experimento.

Figura 3.10. Câmara de secagem em funcionamento no *solarium*.



Os materiais empregados na construção da câmara de secagem foram os seguintes:

A câmara de secagem mede 430 mm x 335 mm na base, altura de 500 mm na parte de trás e de 500 mm na frente mais uma pirâmide de 430 mm x 335 mm de base e altura de 40 mm, além de um *cooler* (ventoinha), equipamento largamente empregado no sistema de resfriamento do interior dos gabinetes de computadores *desktop*. No sistema de secagem o *cooler* foi utilizado para forçar a circulação de ar no interior da câmara de secagem, seu acionamento ocorre através do uso da energia solar fotovoltaica; acoplado na chaminé e ligado em um mini painel solar fotovoltaico de 12 volts e 6 Watts.

No interior da câmara são dispostas duas bandejas numeradas de 1 e 2 (Figura 3.5), na ordem da mais baixa a mais alta onde são colocados os frutos a serem secos, além de quatro termopares usados para medir a temperatura nas bandejas e no interior da câmara de secagem.

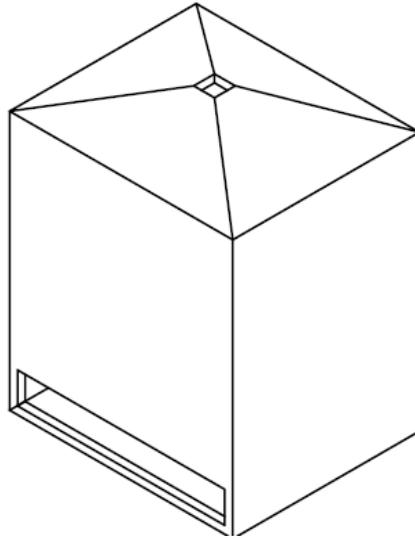
O dimensionamento da câmara de secagem solar levou em consideração a necessidade de seu volume interno ser menor do que o volume interno do coletor solar, isto é importante para garantir que as características termodinâmicas do ar de secagem sejam adequadas ao processo de retirada da água das frutas, promovendo a sua secagem nos níveis desejados. Para isto as dimensões características da câmara de secagem são mostradas na Tabela 3.2:

Tabela 3.2. Principais características construtivas da câmara de secagem.

Componente	Observação	Volume [L]	Área [m²]
Câmara de secagem	Interior	67	---
Entrada do ar vindo do coletor	Interna	---	0,024
Saída do ar quente	Interna	---	0,016

A Figura 3.11 mostra um desenho esquemático da câmara de secagem desenvolvida. No Apêndice B estão os desenhos com as dimensões reais e os cortes necessários a visualização da câmara.

Figura 3.11. Desenho esquemático da câmara de secagem desenvolvida.



A chaminé consiste num dispositivo de exaustão onde é promovida a retirada forçada do ar de secagem, por meio de um *cooler* *MUHUA FAN-TECH* de 12 volts e 0,23 Ampères do tipo usado em computador, acionado por um painel fotovoltaico, mostrado nas Figura 3.12.

Figura 3.12. Cooler e o mini painel fotovoltaico.



3.3.1.5 Desenvolvimento do sistema de medição de temperatura

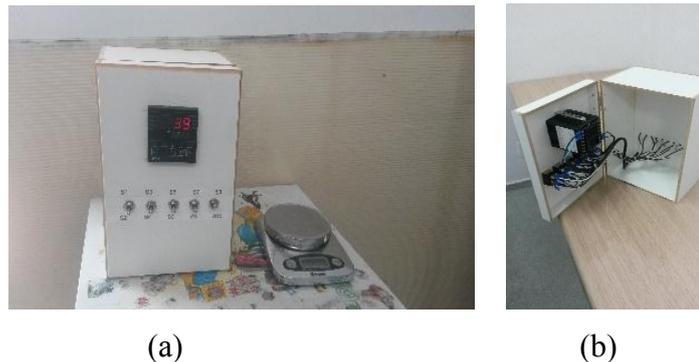
A medida da temperatura do ar de secagem é fundamental para observar sua variação ao longo do dia e ensejar seu controle para as condições de otimização do processo de secagem.

Para isto é necessário medi-la em várias posições do secador solar, como por exemplo: na entrada, no interior e na saída do coletor solar. No interior da câmara de secagem e no ambiente.

Para realizar estas medições e permitir um controle da variável ar de secagem foi construído um sistema de medição de temperatura e de umidade relativa do ar, desenvolvido especificamente para este sistema de secagem e que é parte dos objetivos desta tese.

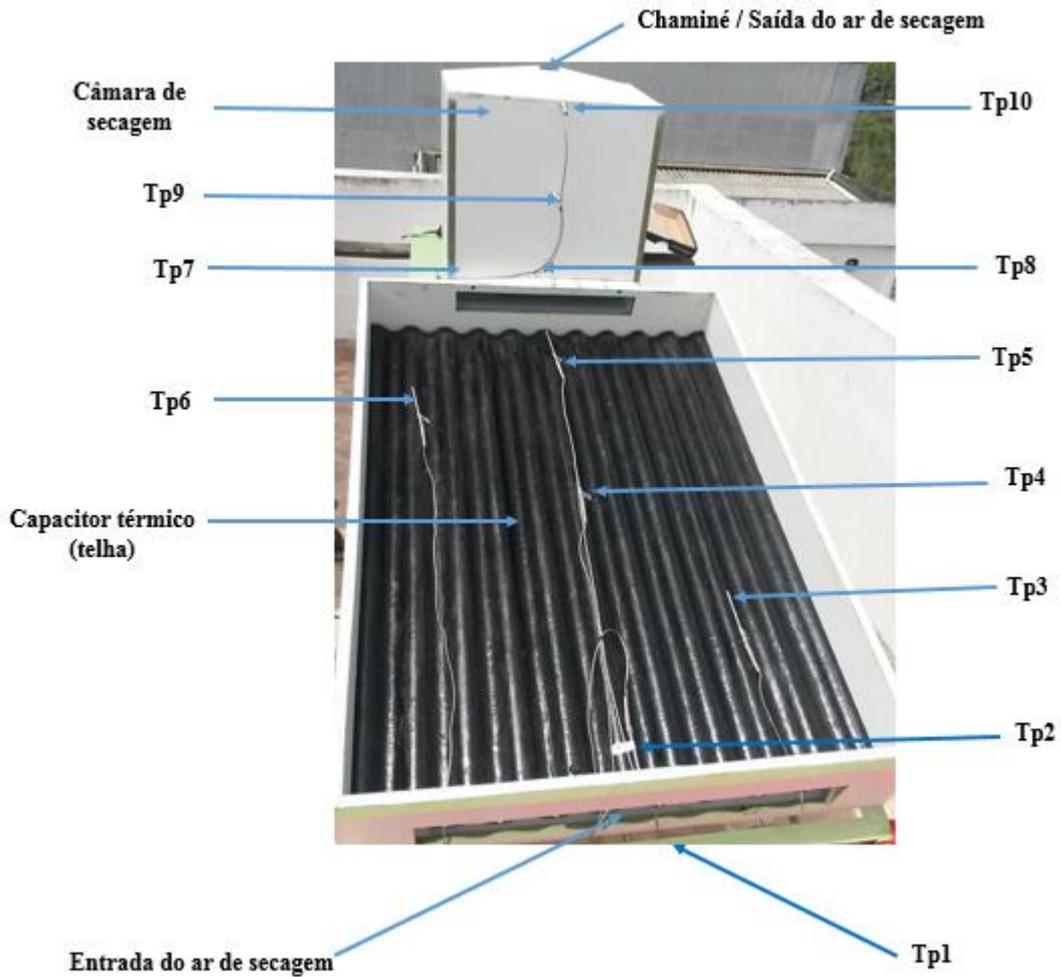
O sistema de medição de temperatura é constituído por dez (10) termopares do tipo K e um painel de observação e registro das medições efetuadas, mostrado nas Figuras 3.13a e 3.13b. Este sistema de medição foi utilizado nos experimentos de 1 a 4, em 2015. Para os experimentos 5 e 6, realizados em 2016, foi desenvolvido um sistema de medição da umidade relativa e da temperatura do ar usando Arduino.

Figura 3.13. Sistema de medição de temperatura do ar.



A temperatura do ar de secagem medida, nas diversas posições do coletor solar de interesse (são seis termopares Tp1 a Tp6), ao longo do dia, é registrada em uma tabela do tipo mostrado na Figura 3.15 para cada termopar especificamente. A Figura 3.14 mostra a localização dos 10 termopares distribuídos no coletor solar e da câmara de secagem. Cada termopar será representado por Tp seguido do número.

Figura 3.14. Distribuição dos sensores de temperatura no coletor solar e na câmara de secagem.



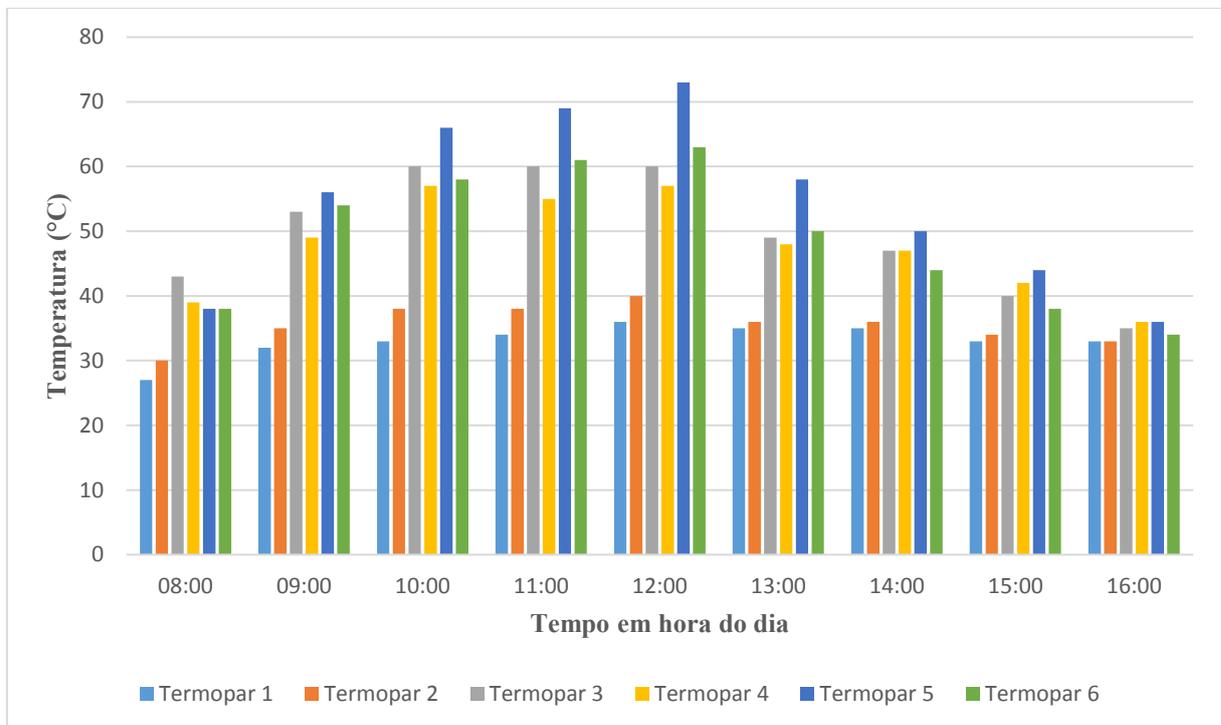
onde,

- Tp1 mede a temperatura do ar ambiente;
- Tp2 mede a temperatura do ar na entrada do coletor solar;
- Tp3 mede a temperatura do ar no interior do coletor solar;
- Tp4 mede a temperatura do ar no centro do coletor solar;
- Tp5 mede a temperatura do ar no interior do coletor solar;
- Tp6 mede a temperatura do ar na saída do coletor solar;
- Tp7 mede a temperatura do ar na entrada da câmara de secagem;
- Tp8 mede a temperatura do ar na bandeja 01 da câmara de secagem;
- Tp9 mede a temperatura do ar na bandeja 02 da câmara de secagem;
- Tp10 mede a temperatura do ar na saída da câmara de secagem .

Figura 3.15. Modelo de tabela de registro de temperatura no coletor usado nos experimentos de 1 a 4.

Tempo (min)	Horas	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6
0	08:00						
60	09:00						
120	10:00						
180	11:00						
240	12:00						
300	13:00						
360	14:00						
420	15:00						
480	16:00						

Os valores de temperatura do ar medidos e apresentados nas tabelas podem ser plotados em gráficos que permitem observar a variação da temperatura medida por cada termopar, ao longo de um dia de experimento. A Figura 3.16, mostra como são esses tipos de gráficos para a temperatura do ar de secagem no coletor solar.

Figura 3.16. Distribuição de temperatura do ar de secagem no coletor solar para um dia de teste experimental.

Para garantir a qualidade dos dados obtidos, eventualmente, as temperaturas medidas com o sistema de medição automatizado, eram verificadas com o uso do termômetro infravermelho, como o mostrado na Figura 3.17 ou com uso de um multímetro digital, modelo ET 1400 - Minipa.

Figura 3.17. Termômetro infravermelho modelo TI – 890.



Para os experimentos de 1 a 4 a medida da umidade do ar de secagem foi realizada com uso de um termo-higrômetro, como o mostrado na Figura 3.18, um Termo-higrômetro de fabricação da ICEL. Modelo HT 208.

Para os experimentos 5 e 6, realizados em 2016, os dados da umidade relativa do ar nas entradas e saídas do coletor solar e da câmara de secagem foram obtidos com o arduino.

Figura 3.18. Termo-Higrômetro usado para medir a umidade relativa do ar nos experimentos de 1 a 4.



Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica criada com o objetivo de permitir o desenvolvimento de controle de sistemas interativos, de baixo custo, e com interface

amigável. A plataforma é composta de duas partes: o hardware, que é a placa de circuito contendo o microcontrolador, e o software que é o ambiente de programação.

Um microcontrolador, também denominado MCU (*Multipoint Control Unit*) é um computador *on-chip*, que contém processador, memória e periféricos de entrada/saída. É um computador que pode ser programado para funções específicas, em contraste com outros microprocessadores de propósito geral (como os utilizados nos computadores). Eles são embarcados no interior de algum outro dispositivo, no caso do Arduino, para que possam controlar suas funções ou ações.

Pela própria definição de computador como um dispositivo capaz de receber um sinal de entrada, processar e gerar um sinal de saída, um microcontrolador é um dispositivo que, associado a determinado tipo de sensor consegue interpretar uma grandeza física, processá-la e acionar algum dispositivo na saída.

Um ambiente de programação, mais conhecido como IDE (*Integrated Development Environment*) é uma aplicação que engloba um editor de texto capaz de identificar a sintaxe de uma determinada linguagem de programação, um compilador que transforma o texto em linguagem de máquina (zeros e uns) e um *debugger* que é um software que auxilia o desenvolvedor a avaliar o programa que ele está escrevendo.

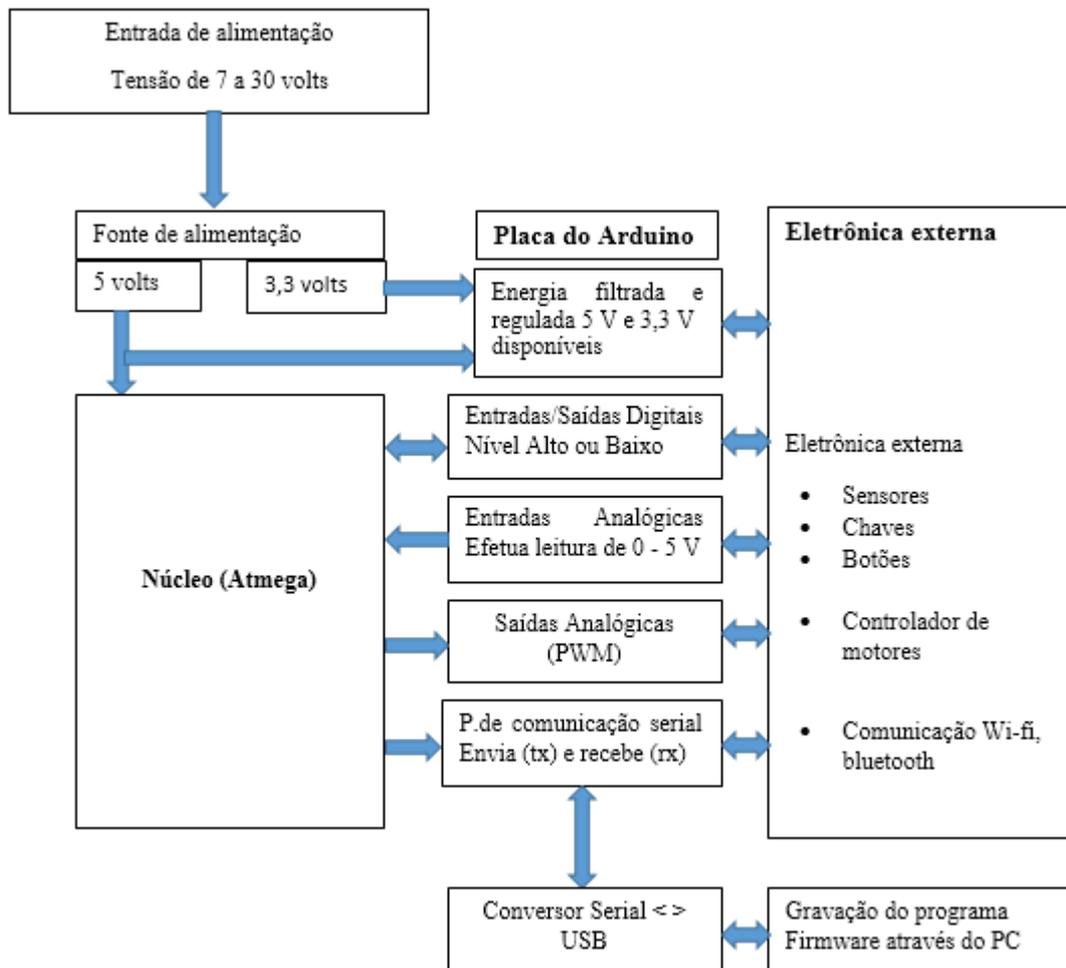
Além do *hardware*, a comunidade Arduino desenvolveu uma IDE para facilitar o desenvolvimento das aplicações usando uma versão própria de C/C++ e com um grande acervo de bibliotecas de funções para diversos sensores e aplicações específicas.

Existem diversas versões do Arduino para múltiplas aplicações, no caso proposto foi empregado a versão do Arduino UNO (arduino de uma única placa) que é uma das versões mais popular da plataforma e é dotada de um ATmega328 como processador.

Na placa existem 14 pinos de E/S digitais (6 destas capazes de funcionar como PWM (*Pulse Width Modulation*)), 6 pinos de E/S analógicas, um oscilador de 16 MHz, conector USB (*Universal Serial Bus - Porta universal*), conector ICSP (*In-Circuit Serial Programming*), conector de fonte externa e reguladores de tensão para 5 V e 3 V que alimentam o processador e boa parte dos sensores que podem ser conectados às portas.

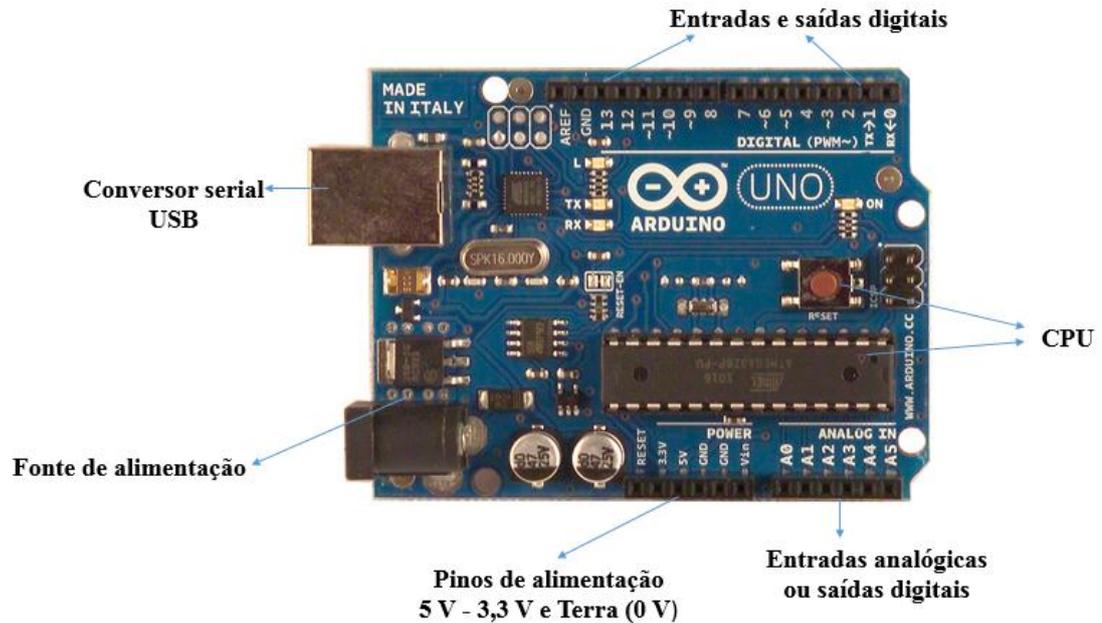
Ao contrário de outras plataformas, o Arduino pode ser programado diretamente pela interface USB. Em outros dispositivos é necessária a utilização de um programador conectado a interface JTAG (*Joint Test Access Group*). A Figura 3.19 apresenta a forma esquematizada de alguns blocos na placa.

Figura 3.19. Esquema da placa em forma de blocos.



A Figura 3.20 mostra uma foto com a configuração de alguns dos blocos na placa.

Figura 3.20. Foto da placa utilizada.



É apresentada algumas características de cada um desses blocos e algumas de suas características individuais mais relevantes.

a) Fonte de alimentação: Como o próprio nome sugere, essa parte da placa de prototipagem é responsável por receber tensões de alimentação entre 5 V e 12 V e através de dispositivos reguladores de tensão, prover as tensões de entrada para a alimentação dos dispositivos da placa.

b) CPU (Unidade Central de Processamento): Parte responsável pelo processamento das entradas e geração das saídas do circuito. É o controlador propriamente dito, possuindo as partes componentes de um computador. A especificação dos controladores varia de acordo com a versão da placa. No Arduino UNO, a CPU funciona a 16 MHz com 2 kB de memória RAM (Memória de Acesso Randômico) e 32 kB de memória flash (memória secundária).

c) Entradas e saídas: De acordo com o bloco apresentado, o Arduino UNO apresenta dezenove pinos de entrada e saída de dados. Todos podem ser configurados como entrada e saída de acordo com a vontade do desenvolvedor. Os pinos nomeados de A0 a A5 são pinos de entrada analógica/saída digital, ou seja, são pinos capazes de ler valores de tensão entre 0-5 V. Como uma saída digital é um valor entre 0 V e 5 V, essas entradas também podem ser usadas como entrada/saída digital.

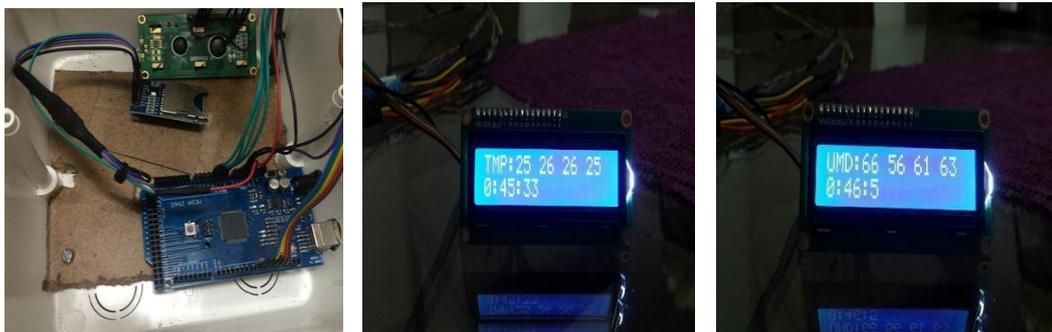
Os pinos de 0 a 13 são pinos de E/S digitais que assim como os pinos analógicos podem ser configurados tanto para leitura como para escrita digitais. Vale lembrar que os pinos 0 e 1 são usados para comunicação serial e que, caso esteja usando esse recurso, as portas não estarão disponíveis.

Para este trabalho, optou-se por um periférico de armazenamento dos dados tipo cartão de memória micro SD (*Secure Digital*). Esta tecnologia foi escolhida para permitir que a aquisição dos dados de secagem, principalmente a temperatura e a umidade relativa do ar fosse contínua e de forma autônoma.

Para os experimentos 5 e 6, a programação foi para leitura e amostragem dos dados a cada minuto, com os dados gravados em forma de média numa amostragem de 10 minutos. Esses intervalos de medição e registro podem ser modificados pelo programador atendendo a interesses específicos.

Na Figura 3.21 é apresentado o Arduino utilizado no experimento, conectado a sensores do tipo TH11, que mede a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem, com os respectivos displays LCD (*Liquid Crystal Display*) alfanumérico, mostrando os valores medidos.

Figura 3.21. Sistema de aquisição de dados (ARDUINO), usado para medir umidade relativa e temperatura do ar de secagem.



3.3.1.6 A fonte de energia utilizada (energia solar térmica e solar fotovoltaica)

A utilização de energia solar como fonte de energia em processos termodinâmicos tem grandes vantagens comparativas ao uso da energia elétrica. O incentivo ao uso dessa fonte de

energia primária e fundamental decorre de sua grande disponibilidade. Porém a energia solar tem características particulares que são desafios para sua aplicação, sendo a maior delas a sua irregularidade ao longo do dia, e ao longo do ano.

Nossa região é privilegiada por ter uma grande incidência da irradiação solar, mas também apresenta problemas referentes à sua regularidade, aqui também ocorre a variação de sua intensidade em função de características meteorológicas locais. Por exemplo, em 2015, em Campina Grande, os meses de junho e julho apresentaram características meteorológicas singulares que impediram a realização de vários experimentos já programados.

Uma alternativa é utilizar essa fonte de energia acoplada com outras fontes para ensejar um máximo controle na regularidade do recurso energético. Por isto observa-se cada vez mais a utilização combinada de sistemas híbridos do tipo: solar com GLP ou gás natural, solar com eletricidade, solar com eólica, etc.

Para os experimentos de 1 a 4 a determinação da irradiação solar incidente, e consequentemente da potência solar por unidade de área (W/m^2), foram utilizados dados obtidos na estação meteorológica do LEMT/UFCG, através do piranômetro, modelo CM21, fabricado pela Kipp & Zonen mostrado na Figura 3.22, já para os experimentos 5 e 6, a irradiação solar foi obtida pela estação meteorológica modelo HD32MT.1, SN 11031486 e FW 0714141114, mostrado na Figura 3.23, recentemente instalada no laboratório.

Figura 3.22. Piranômetro instalado no LEMT/UFCG.

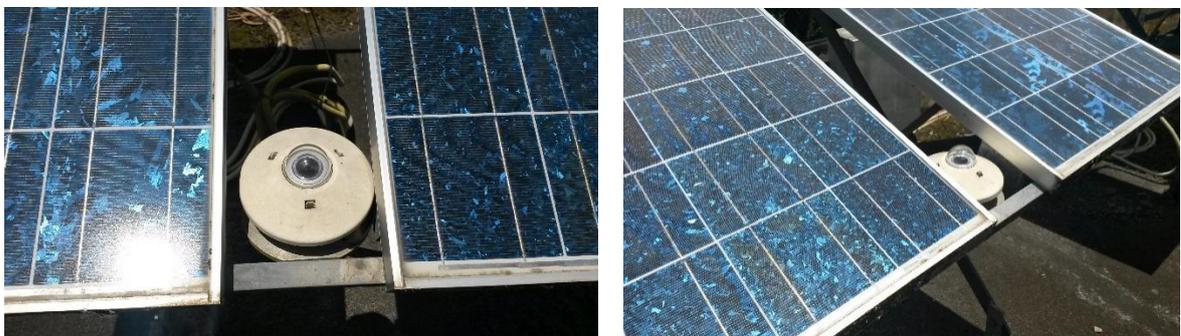
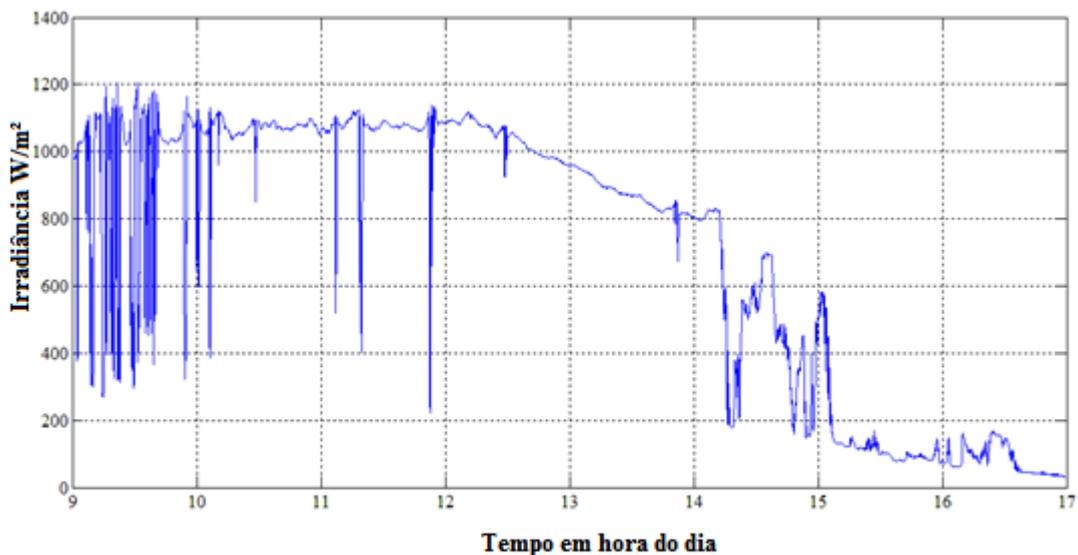


Figura 3.23. Estação meteorológica modelo HD32MT.1, SN 11031486 e FW 0714141114.



Com os dados da irradiação solar incidente para cada instante obtidos na estação solarimétrica é possível plotar gráficos, como mostrado na Figura 3.24, onde é possível observar a variação dessa irradiância em função do tempo.

Figura 3.24. Variação da irradiação solar incidente em função do tempo, para um dia.



Para obter, a irradiação solar média, calculada como determina a Equação 28, obtém-se o gráfico mostrado na Figura 3.25. A vantagem desse tipo de gráfico é que ele permite observar a variação, a cada hora, ao longo do dia mostrando a interferência de nuvens e de outros fenômenos climáticos que acaba se refletindo na variação de temperatura do ar de secagem.

$$\overline{Rad} = \frac{\sum Rad}{n} \quad (9)$$

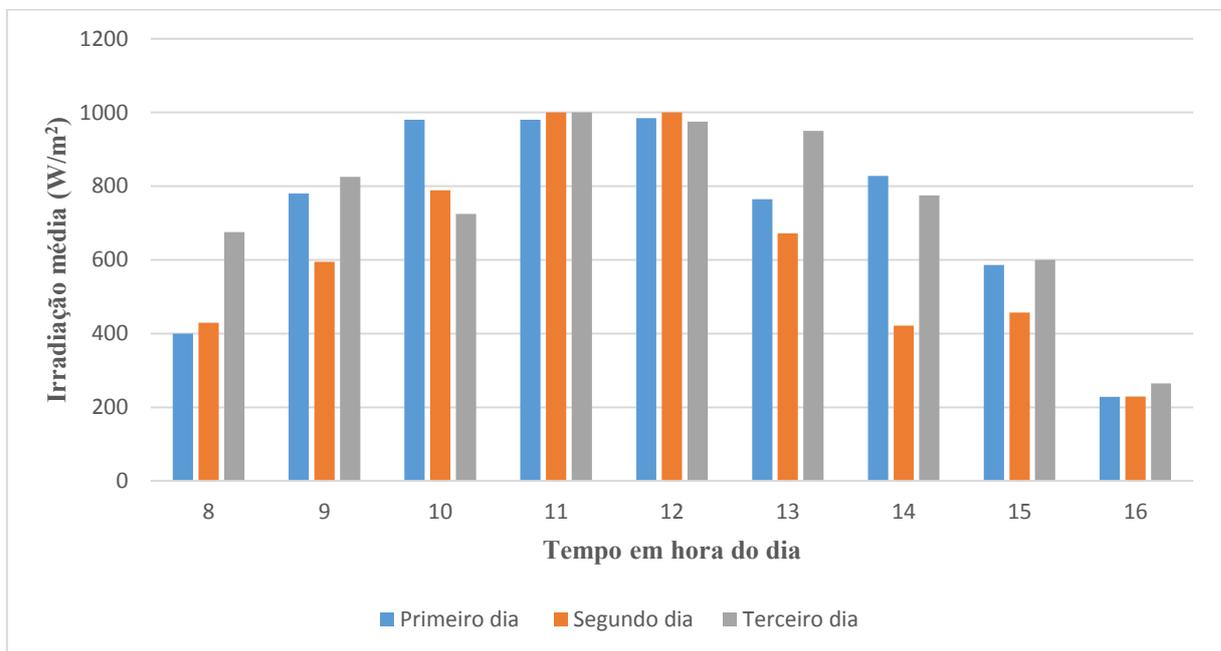
onde,

\overline{Rad} = irradiação solar média [W/m^2];

Rad = irradiação solar verificada [Wh/m^2];

n = número de verificações [h].

Figura 3.25. Intensidade média de irradiação solar medida em um dos experimentos.



A vazão mássica (\dot{m}) do ar de secagem, foi obtida através da medição da velocidade do ar que passa pelo *cooler* instalado na saída da câmara de secagem e através da seção da ventoinha, verificada por meio de um anemômetro digital portátil, mostrado na Figura 3.26, modelo VEC-GM 8901, marca Vectus, sendo calculada pela Equação 10.

$$\dot{m} = v_{ar} \cdot A_2 \cdot \rho \quad (10)$$

onde,

v_{ar} = velocidade do ar [m/s];

A_2 = área da seção transversal da chaminé (ventoinha) [m^2];

ρ = massa específica do ar [kg/m^3].

Figura 3.26. Anemômetro usado para medir a velocidade do ar.



A diferença de temperatura nos diversos pontos de interesse, dado pela Equação 11, foram medidas por um sistema de aquisição de dados, especificamente construído para esta tese, com a utilização de termopares tipo K.

$$\Delta T = T_{t+\Delta t} - T_t \quad (11)$$

onde,

$T_{t+\Delta t}$ = Temperatura num instante $t + \Delta t$ [K];

T_t = Temperatura num instante t [K].

Na Figura 3.27 é apresentada uma tabela com o resumo das principais as características construtivas e dimensionais do protótipo do sistema de secagem desenvolvido no LEMT/UFCG.

Figura 3.27. Características construtivas e dimensionais do protótipo do sistema de secagem.

Coletor Solar	Características
Material da base (laterais e fundo)	MDF Ultra
Espessura do MDF Ultra	15 mm
Dimensões (largura, comprimento e altura em mm)	1,235 x 0,77 x 0,185
Dimensões de entrada de ar (largura e altura em mm)	600 x 100
Dimensões de saída de ar (largura e altura em mm)	400 x 60
Material de cobertura (1 m ²)	Policarbonato
Capacitor térmico no interior do coletor	telha pintada de preto

Volume interno (litros)	176
Área de entrada (mm ²)	60.000
Área de saída (mm ²)	24.000
Fixação do policarbonato no MDF	velcro dupla face 10 m
Câmara de Secagem	
Material da base (laterais, fundo e cobertura)	MDF Ultra
Dimensões (largura, comprimento e altura em mm)	43 x 35 x 50
Entrada de ar (mm)	400 x 60
Saída de ar (mm)	40 x 40
Material das bandejas	MDF ultra de 15 mm e tela de nylon verde
Volume interno (litros)	67
<i>Cooler</i> de computador usado na chaminé	12 V e 0,23 A
Área da chaminé (m ²)	0,007

Fonte: Próprio autor.

3.4 O processo de secagem da banana

Foram validados seis experimentos, nomeados como Experimento 1 (EXP1), Experimento 2 (EXP2), Experimento 3 (EXP3), Experimento 4 (EXP4), Experimento 5 (EXP5), Experimento 6 (EXP6), nos dias:

- EXP1 – dias 12, 13 e 14 de março de 2015, verão de 2015;
- EXP2 – dias 26 e 27 de março de 2015, outono de 2015;
- EXP3 – dias 28 e 29 de abril de 2015, outono de 2015;
- EXP4 – dias 26 e 27 de maio de 2015, outono de 2015.
- EXP5 – dias 25 e 26 de fevereiro de 2016, verão de 2016.
- EXP6 – dias 21 e 22 de março de 2016, outono de 2016.

Os dados coletados na realização de cada um desses experimentos podem ser visualizados nas Tabelas do capítulo 4 e do Apêndice A. Em cada teste experimental são

avaliadas as condições necessárias para efetivação do processo de secagem, capaz de produzir um produto final de qualidade.

O experimento 1 (EXP1) foi realizado em três dias enquanto os demais ocorreram em dois dias, isto ocorreu porque no EXP1 o fluxo do ar de secagem através do coletor solar e da câmara de secagem ocorreu através da convecção natural, ou seja, neste primeiro teste o *cooler* responsável pela convecção forçada do ar ainda não estava instalado. Essa característica singular vai propiciar a comparação do desempenho do processo de secagem com e sem convecção forçada, inferindo-se a vantagem do processo com convecção forçada obtida com uso da energia solar fotovoltaica.

A montagem do protótipo e os testes experimentais ocorreram no LEMT em Campina Grande, PB, que tem latitude de 7° Sul, longitude de 36° Oeste e uma altitude de 600 m.

3.4.1 Determinação das curvas de secagem

As curvas de secagem, também conhecidas como curvas de cinética de secagem são plotadas em gráficos do tipo mostrado na Figura 3.32, que indicam a relação entre a razão de umidade em função do tempo de secagem. Para obtenção das curvas experimentais de secagem em cada experimento foram calculadas a Razão de Umidade, através da Equação 12.

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (12)$$

onde,

RU = razão de umidade, [base seca];

X = teor de umidade, [base seca];

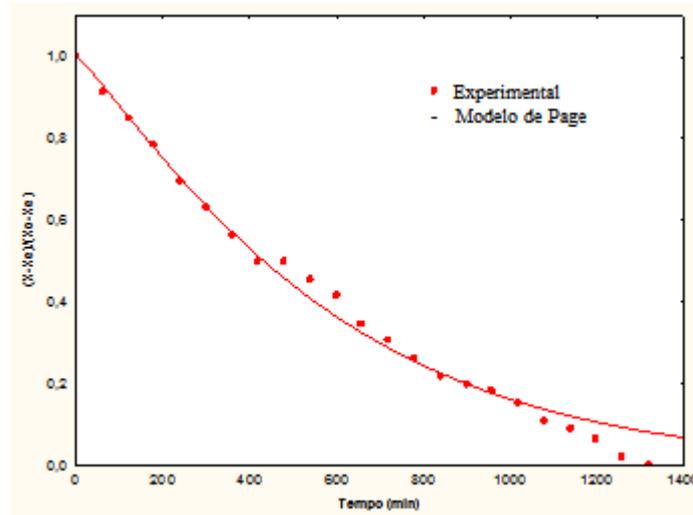
X_e = teor de umidade de equilíbrio, [base seca];

X_0 = teor de umidade inicial, [base seca].

Segundo Cano-Chuca et al. (2004), as curvas de secagem permitem prever o momento do processo no qual se atinge o teor de umidade desejado e desta forma obter produto de boa qualidade. A Figura 3.28 mostra o modelo da curva de secagem obtida e ajustada pelo modelo

matemático de Page, onde os pontos na curva representam os valores reais obtidos experimentalmente para a razão de umidade, e a linha cheia representa o ajuste dos pontos.

Figura 3.28. Modelo de curva de secagem ou curva de cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page.



Para realizar cada um dos experimentos foram utilizadas bananas cortadas longitudinalmente. As bananas eram descascadas, lavadas e tratadas com gotas de limão para deixá-las com uma coloração mais dourada e impedir o seu escurecimento após a secagem.

A Figura 3.29 mostra algumas bananas cortadas nesta configuração, antes do experimento, e a banana-passa obtida após a secagem realizada no LEMT/UFCG

Figura 3.29. Bananas cortadas longitudinalmente *in natura*.



Em um dos experimentos, as bananas foram encaminhadas antes e depois do processo de secagem para as análises físico-químicas das bananas *in natura* e das bananas-passas. As

análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em João Pessoa. O laudo emitido encontra-se no Apêndice C. A metodologia empregada nas análises físico-químicas das bananas *in natura* e das bananas-passa obtidas foram os métodos físico-químicos para Análise de Alimentos do Instituto Adolf Lutz, edição IV, 2005.

Para determinar a massa seca da banana foi utilizada a estufa da UAEM/UFCG, adquirida com recursos do CNPq, com circulação mecânica, fabricada pela FANEM modelo 320E, com controlador digital de temperatura e mostrada na Figura 3.30.

Figura 3.30. Estufa de secagem com circulação de ar forçada, mod. 320E.



Os dados experimentais referentes à variação da massa do produto durante o processo de secagem, foram obtidos em intervalos regulares de 01 (uma) hora, com início às 9:00 h da manhã, retirando-se a banana da câmara de secagem e medindo-se sua massa com uso de uma balança digital, modelo KC 01, marca Western.

A medida da massa observada em cada instante, é registrada numa tabela, como a mostrado mostrada na Figura 3.31, em que constam para cada experimento, o tempo em que ocorre a medição e a respectiva massa. Nesta mesma tabela, a partir desses registros iniciais, é possível calcular o teor de água em base seca e em base úmida e a razão de umidade. Sendo a parte superior da tabela utilizada para registrar os valores das bananas na bandeja de baixo da câmara de secagem e a parte inferior da tabela utilizada para registrar os valores das bananas na bandeja de cima da câmara de secagem.

Figura 3.31. Modelo de tabela usada para registrar e calcular valores obtidos em cada experimento.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU adim
0	08:00					
60	09:00					
120	10:00					
180	11:00					
...	...					
...	...					
...	...					
Última medição	Última medição					

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU (adim.)
0	08:00					
60	09:00					
120	10:00					
180	11:00					
...	...					
...	...					
...	...					
Última medição	Última medição					

A avaliação do processo de secagem obtido experimentalmente foi realizada comparando-se os valores experimentais com os modelos matemáticos descritos na literatura. Com a coleta de dados realizada, os parâmetros necessários à determinação das curvas de secagem (razão de umidade e tempo) foram calculados por meio do *software Microsoft Excel* versão 2010 e ajustado ao modelo matemático de Page, dado pela Equação 1, mostrado na Tabela 3.3, utilizando-se o programa computacional *Statistica* versão 7.0, onde se determina o coeficiente de determinação (R^2) para verificar a predição do processo.

Tabela 3.3. Modelo matemático empregado para ajustes das curvas de secagem.

Modelo	Equação	Nº	Referência
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	1	Orikasa et al. (2008)

Onde,

k = constante do modelo;

n = parâmetro do modelo;

t = tempo de secagem [min].

3.5 Análise Energética dos sistemas e processos de secagem

3.5.1 Conceitos termodinâmicos

São apresentados os conceitos básicos de termodinâmica e da transferência de calor e massa aplicadas ao secador solar desenvolvido. A partir do balanço de energia no coletor solar e na câmara de secagem, aplicando-se as equações de continuidade (conservação da massa) e da primeira lei da termodinâmica, será possível obter a equação usada para calcular a eficiência térmica em cada componente do sistema de secagem e conseqüentemente no coletor solar.

Para obter os valores da eficiência térmica real é necessário medir a temperatura, a umidade relativa e a velocidade do ar de secagem na entrada e na saída de cada componente. Com os valores destas propriedades termodinâmicas é possível calcular a entalpia (h) em cada ponto de interesse (estado termodinâmico) e conseqüentemente obter a eficiência térmica do componente.

Os conceitos apresentados serão analisados via volumes de controle, visto que os dispositivos trabalham com fluxo de massa e de energia.

3.5.2 Conservação da massa

A lei da conservação da massa estabelece que a taxa temporal de variação de massa contida no interior do volume de controle em um instante t é igual à taxa temporal de fluxo de massa através da entrada (e) no instante t , menos a taxa temporal de fluxo de massa através da saída (s), no instante t . Sua equação é dada pela expressão 13:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (13)$$

onde:

$\frac{dm_{vc}}{dt}$ = taxa temporal da variação da massa contida no interior do volume de controle, [J];
 \dot{m}_e e \dot{m}_s = são as vazões mássicas instantâneas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, dada pela Equação 14.

$$\dot{m} = \rho_e v_e A_e = \rho_s v_s A_s \quad (14)$$

onde,

v_e e v_s = velocidade do ar na entrada e saída do volume de controle [m/s];

A_e e A_s = área de entrada e da saída do ar do volume de controle [m²];

ρ_e e ρ_s = massa específica do ar na entrada e na saída do volume de controle [kg/m³].

3.5.3 Primeira lei da termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica, também conhecida como lei da conservação da energia, estabelece que: “A taxa temporal de variação da energia contida no interior do volume de controle no instante t , é igual a taxa líquida na qual a energia está sendo transferida para dentro do volume de controle por transferência de calor no instante t , menos a taxa líquida na qual a energia está sendo transferida para fora do volume de controle por trabalho no instante t , mais a taxa líquida da energia transferida para o volume de controle juntamente com fluxo de massa.”

Aplicando o princípio da conservação da energia ao volume de controle, pode-se representar matematicamente este enunciado pela Equação 15:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (15)$$

onde:

$\frac{dE_{vc}}{dt}$ = taxa temporal da variação da energia contida no interior do volume de controle, [J];

\dot{Q}_{vc} = taxa de transferência de calor ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle, [J];

\dot{W}_{vc} = taxa de transferência por trabalho ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle [J];

\dot{m}_e e \dot{m}_s = são as vazões mássicas instantâneas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, [kJ/kg].

$\frac{v_e^2}{2}$ e $\frac{v_s^2}{2}$ = são as energias cinéticas específicas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, [J];

gz_e e gz_s = são as energias potenciais específicas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, [J];

h = é a propriedade termodinâmica entalpia específicas; ($h = u + pv$), [kJ/kg];

h_e e h_s = são as entalpias na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, [kJ/kg].

3.5.4 Cálculo da eficiência do sistema de secagem

A eficiência do sistema de secagem desenvolvido foi obtida calculando-se o desempenho do processo de secagem e a eficiência térmica do equipamento. O desempenho do sistema de secagem proposto deve avaliar duas características: o equipamento propriamente dito e o processo ao qual se destina.

Segundo Barbosa (2011), a eficiência do secador solar está relacionada com seu rendimento térmico, enquanto que a eficiência do processo de secagem pode ser avaliada pela diferença entre a massa inicial e a massa final da banana, em relação à massa inicial de água presente no produto.

3.5.4.1 Cálculo do rendimento térmico do equipamento

A partir do conceito básico de rendimento termodinâmico, como sendo a razão entre a potência entregue pelo sistema e a potência disponível no mesmo, Guerra e Varella (2014) afirmam que o rendimento de um coletor solar pode ser determinado pela Equação 16.

$$\eta_t = \frac{P_u}{A_1 \cdot \bar{G}} \cdot 100 \quad (16)$$

onde,

η_t = rendimento do secador solar [%];

P_u = potência transferida ao fluido de trabalho [W];

A_1 = área de cobertura transparente [m²];

\bar{G} = média de irradiação solar incidente [W/m²].

A potência transferida ao fluido de trabalho, também chamada de potência útil, é determinada pela Equação 17, e representa a quantidade de energia transferida ao fluido de trabalho, neste caso, o ar ambiente:

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (17)$$

onde,

\dot{m} = vazão mássica do fluido de trabalho [kg/s];

c_p = calor específico do fluido de trabalho [J/kgK];

ΔT = diferença de temperatura [K].

Dessa forma, o rendimento térmico de um coletor solar, quando não se tem os valores da umidade relativa e da temperatura do ar na entrada e saída do equipamento, é expresso em função da potência útil, da irradiação solar incidente, da área de cobertura transparente e, conseqüentemente, da vazão do fluido de trabalho, do calor específico do mesmo e da variação de temperatura obtida. Que foi o caso dos experimentos de 1 a 4, realizados em 2015.

3.5.5 Rendimento termodinâmico do equipamento

O rendimento térmico do equipamento pode ser obtido através da equação geral da eficiência ($\eta_t = \frac{P_u}{A \cdot \bar{G}} \cdot 100$), quando não se dispõe dos dados de medição da umidade relativa do ar e temperatura, na entrada e saída de cada componente do sistema de secagem, como foi o caso nos experimentos EXP1 a EXP4. Para os experimentos EXP5 e EPX6 é possível calcular o rendimento térmico pelas duas formas, usando a expressão geral dada pela Equação (17) e a partir da aplicação do balanço de energia em cada equipamento.

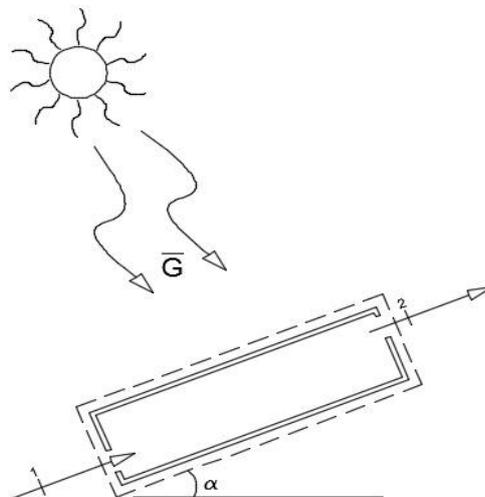
3.5.5.1 Cálculo das eficiências

Neste parágrafo é mostrado a sequência e as equações utilizadas para calcular a eficiência real em cada componente do sistema de secagem partir do balanço de energia aplicado ao coletor solar e câmara de secagem.

a) Coletor Solar

A Figura 3.32 mostra uma representação esquemática do volume de controle aplicado ao coletor solar.

Figura 3.32. Representação do volume de controle para o coletor solar



Aplicando a Primeira Lei da Termodinâmica, dada pela sua equação geral (15), e considerando que a energia cinética e a energia potencial na entrada e saída do coletor solar são iguais, o que é perfeitamente aceitável, dado as características construtivas e operacionais do coletor solar ($EC_e = EC_s$ e $EP_e = EP_s$). Com estas considerações a equação (15) fica apresentada na forma dada pela equação (18):

$$\dot{Q}_{1-2} + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{W}_{1-2} \quad (18)$$

Como o coletor solar é um equipamento térmico e não uma máquina térmica, o trabalho realizado pelo coletor solar é nulo, isto é:

$$\dot{W}_{1-2} = 0 \quad (19)$$

Como a massa que entra no coletor é igual a massa que sai ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2$), tem-se:

$$\dot{Q}_{1-2} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (20)$$

onde, \dot{Q}_{1-2} é o \dot{Q}_{real} , ou seja, é a energia realmente transferida para o ar, que neste caso, é o fluido de trabalho.

Aplicando o conceito de eficiência térmica, pela 1ª da Termodinâmica para um volume de controle chega-se a expressão que representa o rendimento térmico do coletor solar dado pela Equação 21:

$$\eta_{coletor} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{m}(h_2 - h_1)}{\dot{Q}_{solar}} \quad (21)$$

onde:

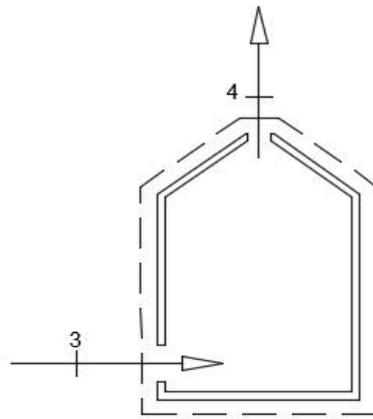
$$\dot{Q}_{solar} = \int_t^{t+\Delta t} \bar{G} dt \quad (22)$$

onde \bar{G} é o valor que representa a média da irradiação solar incidente sobre o coletor solar no intervalo de tempo entre o início do processo as $t_i = 9 h$ e seu término diário que ocorre às $t_f = 16 h$.

b) Câmara de Secagem.

A Figura 3.33 mostra uma representação esquemática do volume de controle aplicado a câmara de secagem.

Figura 3.33. Representação do volume de controle para câmara de secagem.



Aplicando o balanço de energia na câmara de secagem, e considerando que a energia cinética e a energia potencial na entrada e saída da câmara de secagem são iguais, o que é perfeitamente aceitável, dado as características construtivas e operacionais do coletor solar ($EC_e = EC_s$ e $EP_e = EP_s$). Considerando também que o trabalho é nulo, porque a câmara é um aparelho térmico e não uma máquina térmica ($\dot{W} = 0$). Com estas considerações a equação (12) fica apresentada na forma dada pela Equação (23):

$$\dot{Q}_{3-4} + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{E}_b \quad (23)$$

Assim,

$$\dot{Q}_{3-4} = \dot{m}_4 h_4 + \dot{E}_b - \dot{m}_3 h_3 \quad (24)$$

Lembrando que, neste caso a massa que sai é maior do que a massa que entra, uma vez que sai a massa de ar que entrou, vindo do coletor solar, mais a massa de água que é retirada da fruta durante o processo de secagem.

$$\begin{cases} \dot{m}_3 \neq \dot{m}_4 \\ \dot{m}_4 > \dot{m}_3 \end{cases} \quad (25)$$

Ou seja:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{\text{água da banana}} \quad (26)$$

Lembrando mais uma vez que a vazão mássica do fluido de trabalho, o ar de secagem, é dada pela equação (14):

Aplicando o conceito de eficiência térmica, pela 1ª da Termodinâmica para um volume de controle, chega-se a expressão que representa o rendimento térmico da câmara de secagem dado pela Equação (27):

$$\eta_{\text{câmara}} = \frac{\dot{m}_4 h_4 + \dot{E}_b}{\dot{m}_3 h_3} \quad (27)$$

Onde \dot{E}_b representa a vazão mássica da energia retirada da fruta durante o processo de secagem, dada pela Equação 28:

$$\dot{E}_b = h_v \dot{m}_{\text{água retirada da banana}} \quad (28)$$

Onde:

h_v é a entalpia da água saturada como vapor saturado na temperatura média de saída, em [kJ/kg];

$\dot{m}_{\text{água da banana}}$ é a massa de água retirada do fruto no período de tempo, dado em [kg/s].

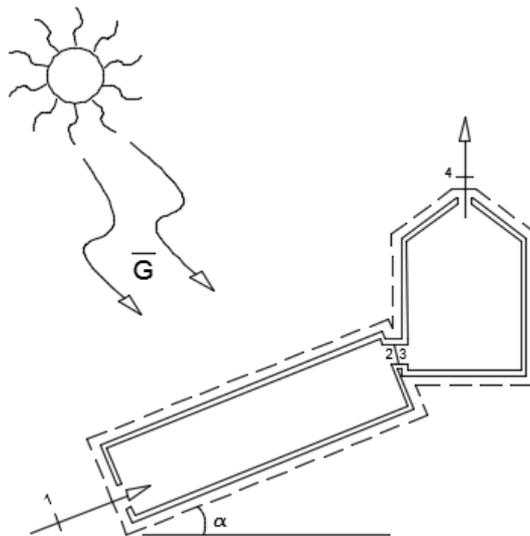
c) Eficiência média do secador solar (sistema de secagem)

Aplicando o balanço de energia no secador solar, e considerando que a energia cinética e a energia potencial na entrada e saída do secador solar são iguais, o que é perfeitamente aceitável, dado as características construtivas e operacionais do secador solar ($EC_e = EC_s$ e $EP_e = EP_s$). Considerando também que o trabalho é nulo, porque o secador solar é um aparelho térmico e não uma máquina térmica ($\dot{W} = 0$). Com estas considerações o rendimento do sistema de secagem ($\eta_{secador}$), é obtido pelo produto de cada parte do sistema, composto pelo coletor solar e pela câmara de secagem, Equação (29):

$$\eta_{secador\ solar} = \eta_{coletor} \times \eta_{câmara} \quad (29)$$

A Figura 3.34 mostra uma representação esquemática do volume de controle aplicado ao secador solar.

Figura 3.34. Representação do volume de controle do secador solar.



3.5.6 Eficiência mássica do processo de secagem

A eficiência mássica do processo de secagem foi avaliada através da medição da variação das massas do produto a ser seco, através da Equação 30, que apresenta os parâmetros necessários a essa determinação.

$$\eta_p = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{total\ de\ água}} \cdot 100 \quad (30)$$

onde,

η_p = eficiência mássica do processo [%];

$m_{inicial}$ = massa inicial do produto [kg];

m_{final} = massa final do produto [kg];

$m_{total\ de\ água}$ = massa total de água presente no produto a ser secado [kg].

Serão apresentados os dados obtidos em seis testes experimentais, portanto, será apresentada numa mesma tabela os valores de rendimento térmico do equipamento e do desempenho do processo de secagem para cada experimento, permitindo a comparação entre eles, como mostrado nas Figuras 3.35 e 3.36.

Figura 3.35. Potência útil e rendimento do coletor solar para cada processo.

Experimentos	Datas do Processo	$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$ [W]	$\eta_t = \frac{P_u}{A_1 \cdot G} \cdot 100$ [%]
1	12 a 15 / 03 / 2015		
2	26 a 27 / 03 / 2015		
3	28 a 29 / 04 / 2015		
4	26 a 27 / 05 / 2015		
5	25 a 26 / 02 / 2016		
6	21 a 22 / 03 / 2016		

Para os experimentos 5 e 6, além dos cálculos das eficiências, dado pela Equação 14, foram calculadas também as eficiências térmicas, do coletor solar, da câmara de secagem e do secador solar, dadas pelas Equações 18, 24 e 25, respectivamente.

Figura 3.36. Resumo das eficiências dos processos de secagem para cada experimento.

Experimentos	Datas do Processo	X_{buf} [%]	$m_{inicial}$ [g]	m_{final} [g]	m_{H_2O} [g]	η_p [%]
1	12 a 15 / 03 / 2015					
2	26 a 27 / 03 / 2015					
3	28 a 29 / 04 / 2015					
4	26 a 27 / 05 / 2015					
5	25 a 26 / 02 / 2016					
6	21 a 22 / 03 / 2016					

Também será apresentada uma tabela, do tipo mostrada na Figura 3.37, que permita observar os custos e os respectivos investimentos em cada componente do sistema de secagem em desenvolvimento.

Figura 3.37. Planilha de custos para fabricação de um sistema de secagem secador solar de frutas.

Item	Unidade	Quantidade	Valor (R\$)
MDF Ultra	m ²		
Policarbonato	m ²		
Telha	m ²		
Velcro	m		
Tela de Nylon	m ²		
Outros Materiais	unid.		
<i>Coolers</i>	unid.		
Painel Fotovoltaico	unid.		
Termopares	unid.		

Fonte: Próprio autor.

CAPÍTULO 4
RESULTADOS E DISCUSSÕES

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Experimental

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos testes experimentais EXP1, EXP2, EXP3 e EXP4 realizados em 2015, mais os EXP5 e EXP6 realizados em 2016, seguindo-se a análise dos resultados.

Para cada experimento realizado, os valores obtidos para variação de massa dos frutos de banana prata (*Musa spp.*) e para variação das demais características do ar de secagem estão apresentados em tabelas do Apêndice A. No caso dos experimentos de 1 a 4, quando ainda não estava sendo medida a umidade relativa do ar, na entrada e na saída do coletor solar e da câmara de secagem, as análises são mais direcionadas para variação da temperatura do ar de secagem. Para os experimentos 5 e 6 as análises contemplam a temperatura e a umidade do ar que são os dois parâmetros mais importantes para o processo de secagem.

A partir desses valores obtidos, são calculados e apresentados os demais parâmetros necessários à construção das respectivas curvas de secagem, do cálculo do rendimento térmico do secador solar, da câmara de secagem e do sistema de secagem completo. Também é apresentada e discutida os resultados da eficiência mássica do processo de secagem de todos os experimentos realizados.

As análises físico-químicas das bananas foram feitas antes e depois do processo de secagem, ou seja, com a banana *in natura* e com a banana seca (banana passa), no Apêndice C é possível observar o laudo emitido pelo Laboratório de Tecnologia de Alimentos (LTA) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

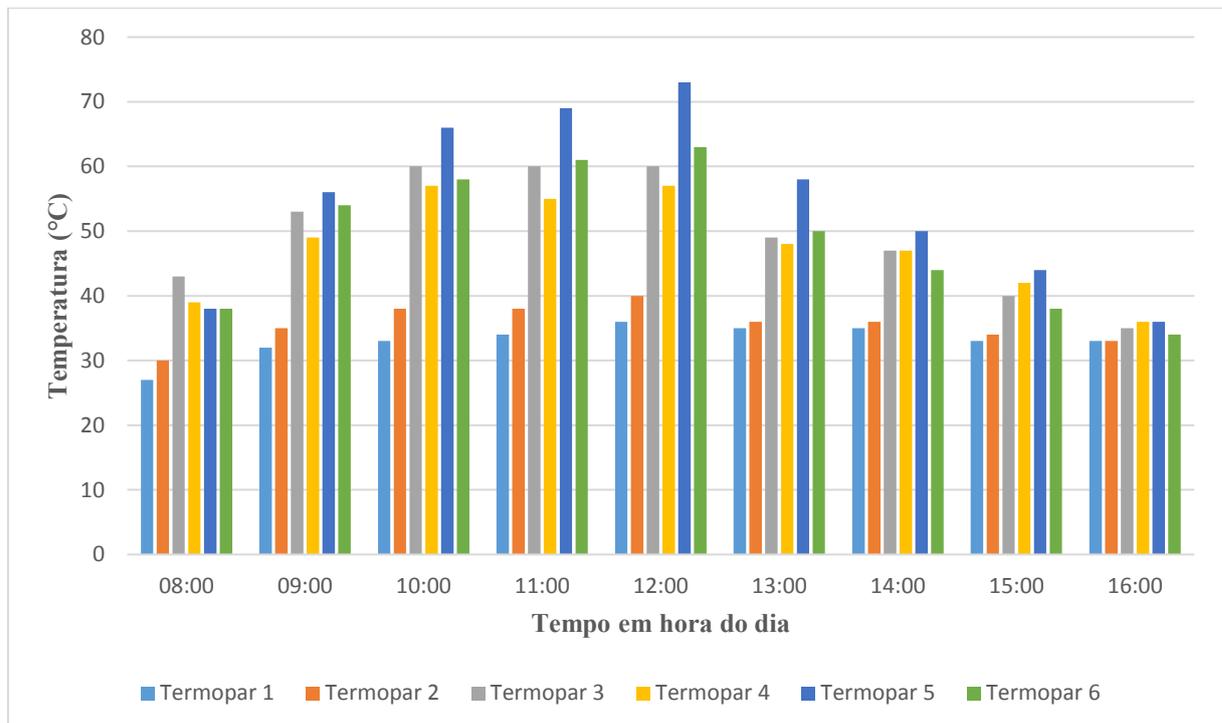
4.1.1 Experimento 1, realizado nos dias 12, 13 e 14 de março de 2015

Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 são mostrados os valores de temperatura do ar de secagem obtidos pelos 10 termopares localizados no secador solar e na câmara de secagem.

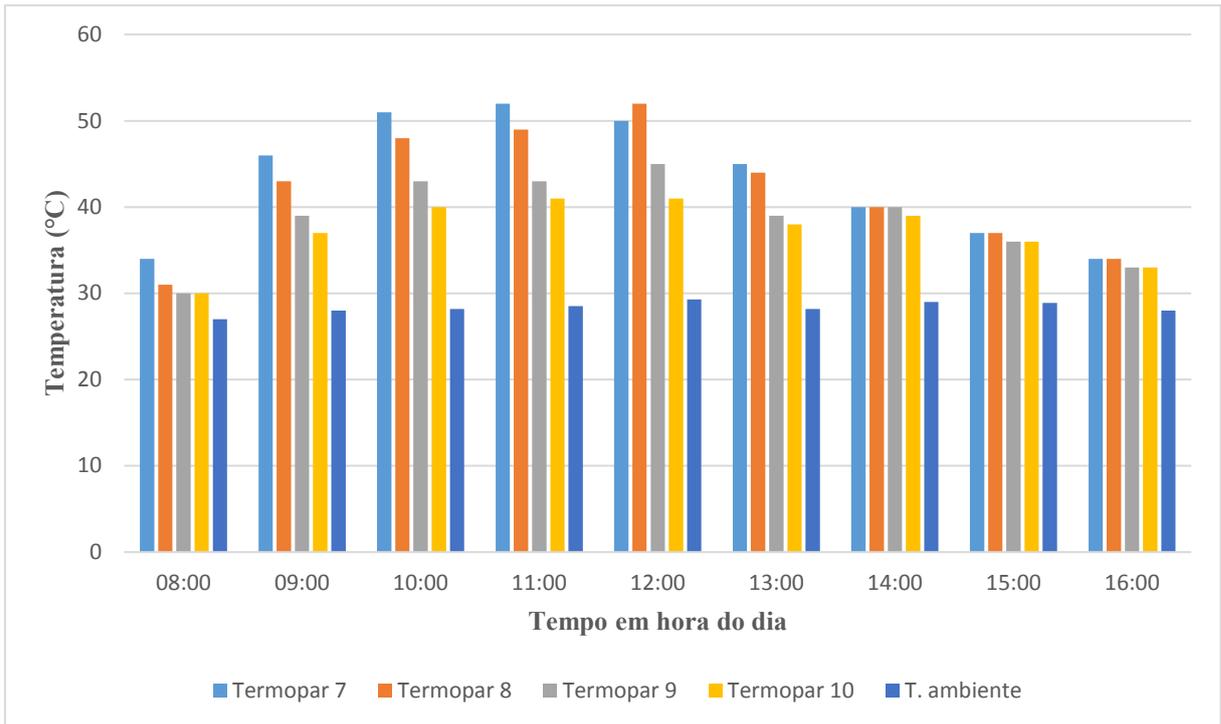
O que se obteve foram temperaturas para o ar de secagem no interior da câmara de secagem em torno de $45^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, ou seja, temperaturas entre 40°C e 50°C . E temperaturas para o ar de secagem no interior do coletor solar em torno de $50^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, ou seja, temperaturas entre 40°C e 60°C . Nos secadores de frutas atualmente em uso comercial, estas temperaturas normalmente são conseguidas com o uso intensivo de energia elétrica. A economia de energia elétrica resultante do uso da energia solar também será utilizada para demonstrar a viabilidade técnica do equipamento em desenvolvimento.

Neste EXP1 o *cooler* ainda não estava instalado, portanto a movimentação do ar de secagem ocorreu através da convecção natural, como já mostrado na Figura 3.14.

Figura 4.1. Distribuição de temperatura do ar de secagem: (a) no coletor solar e (b) na câmara de secagem no dia 12/03/2015.

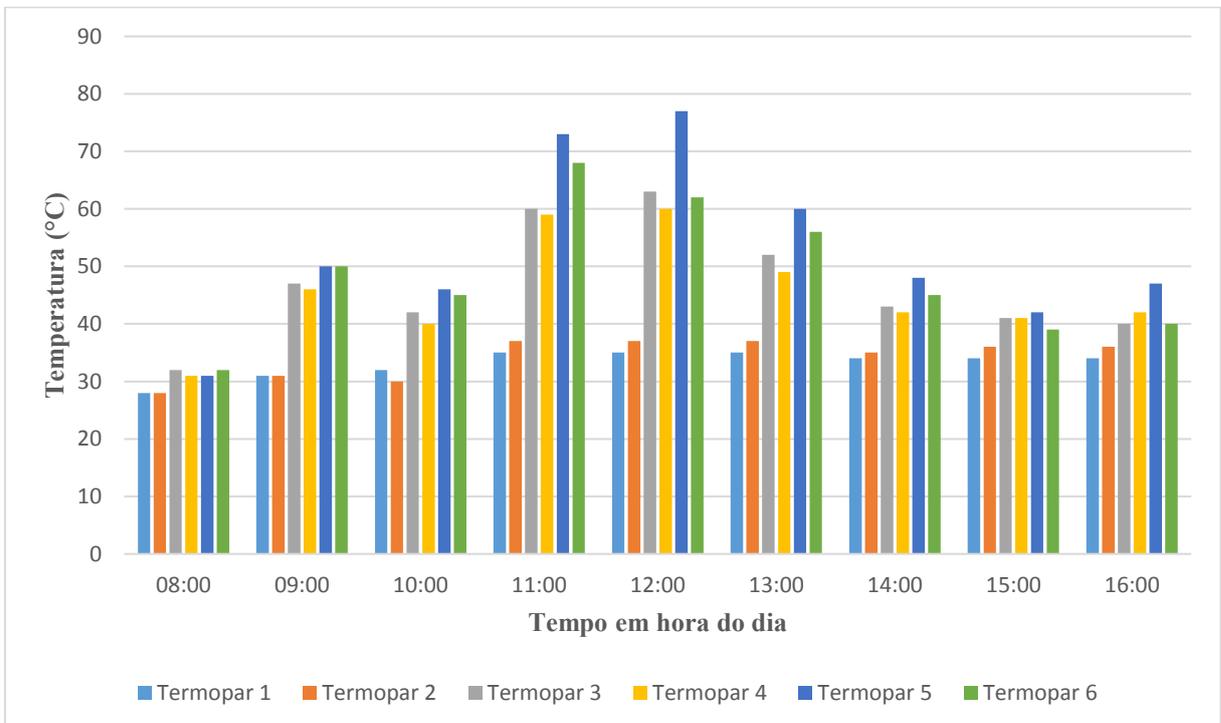


(a)

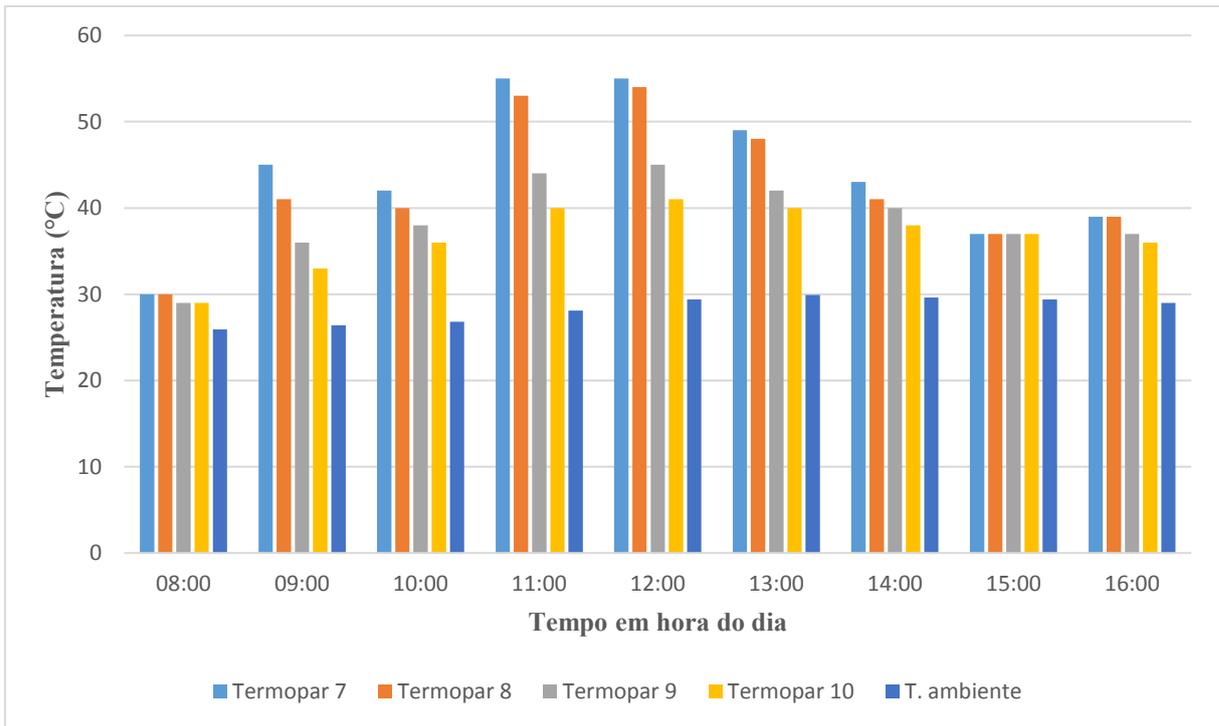


(b)

Figura 4.2. Distribuição de temperatura do ar de secagem (a) no coletor solar e (b) na câmara de secagem no dia 13/03/2015.

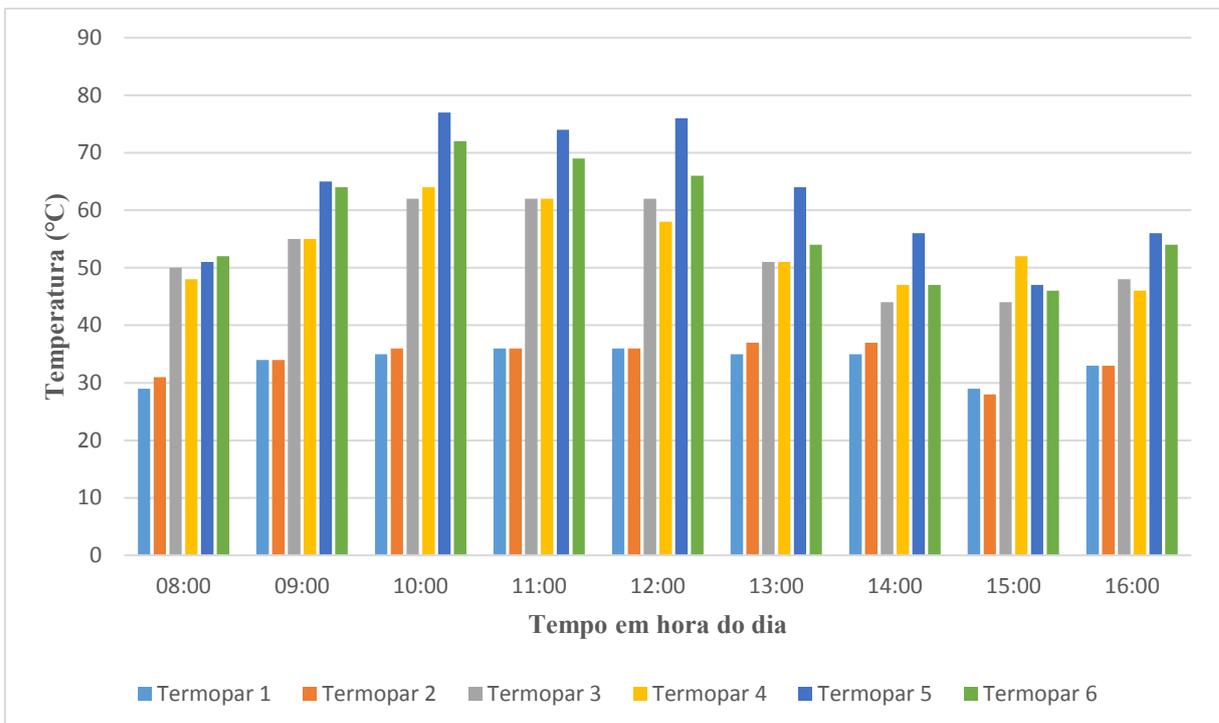


(a)

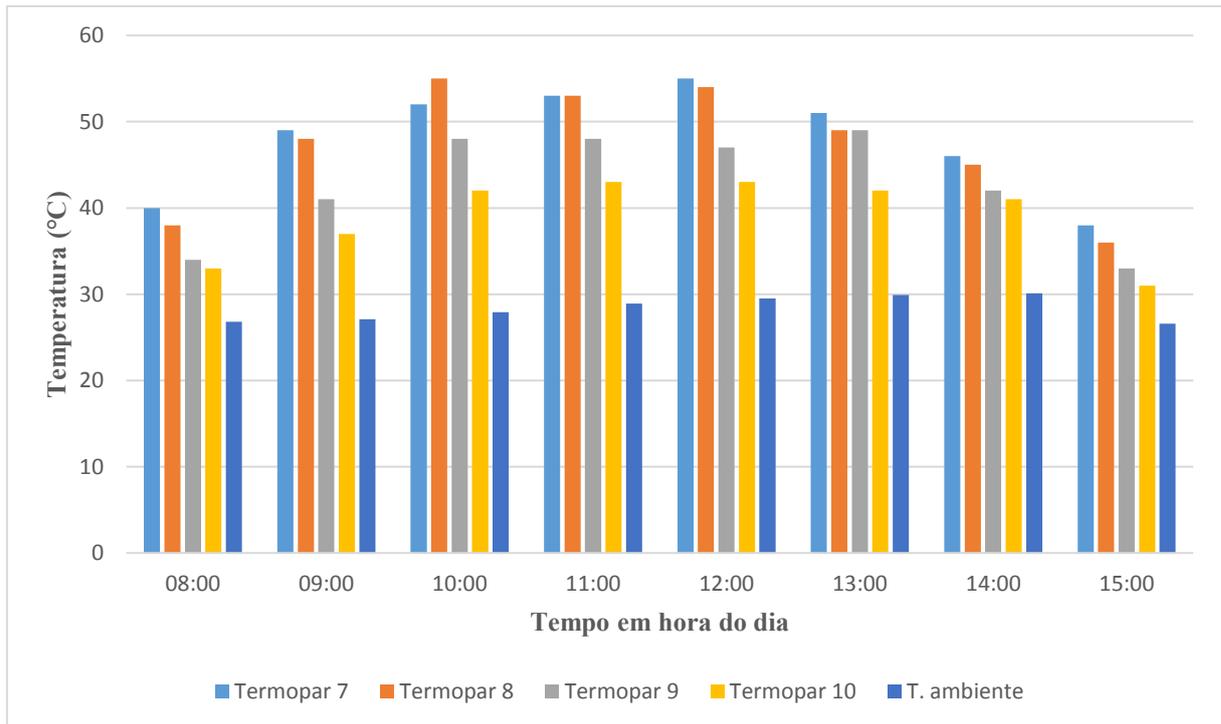


(b)

Figura 4.3. Distribuição de temperatura do ar de secagem: (a) no coletor solar e (b) na câmara de secagem no dia 14/03/2015.



(a)

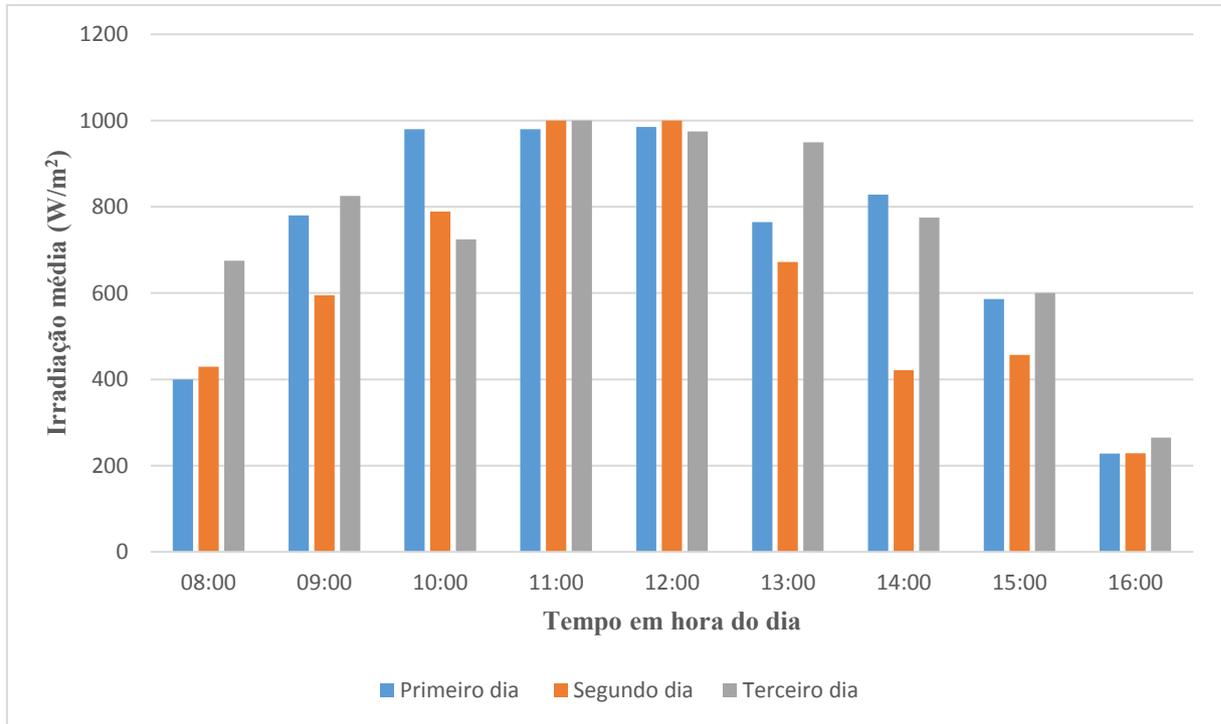


(b)

Observando-se os valores obtidos e mostrados nos gráficos das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, percebe-se que a temperatura do ar no interior da câmara de secagem esteve na maior parte dos testes entre 40°C e 50°C, exceto nas primeiras medições realizadas as 7:00 h e 8:00 h e nas últimas medições do dia, geralmente realizada as 17:00 h. Isto indica que o sistema de secagem, em nossa região, trabalha com maior eficiência entre as 9:00 h e 16:00 h, o que já era esperado, uma vez que a intensidade de irradiação solar também tem um comportamento equivalente a este, principalmente em cidades como Campina Grande que tem uma elevada altitude, em torno de 600 m, e um clima típico de brejo de altitude onde a presença de nuvens é intensa no início e no final do dia.

A Figuras 4.4 mostra a média horária da intensidade de irradiação solar nos dias em que foram feitos os testes experimentais EXP1 e comprovam que a média dessas intensidades é baixa nas primeiras e últimas horas do dia.

Figura 4.4. Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 12, 13 e 14 de março de 2015 na UFCG.



Observa-se que a temperatura ambiente, medida pelo termopar 1, apresenta uma variação de seu valor diretamente proporcional a intensidade da irradiação solar, como já era esperado. No dia 12/03/2015 a diferença térmica diária para temperatura ambiente foi de 9°C, sendo a máxima de 36°C as 12:00 horas e a mínima de 27°C as 8:00 horas.

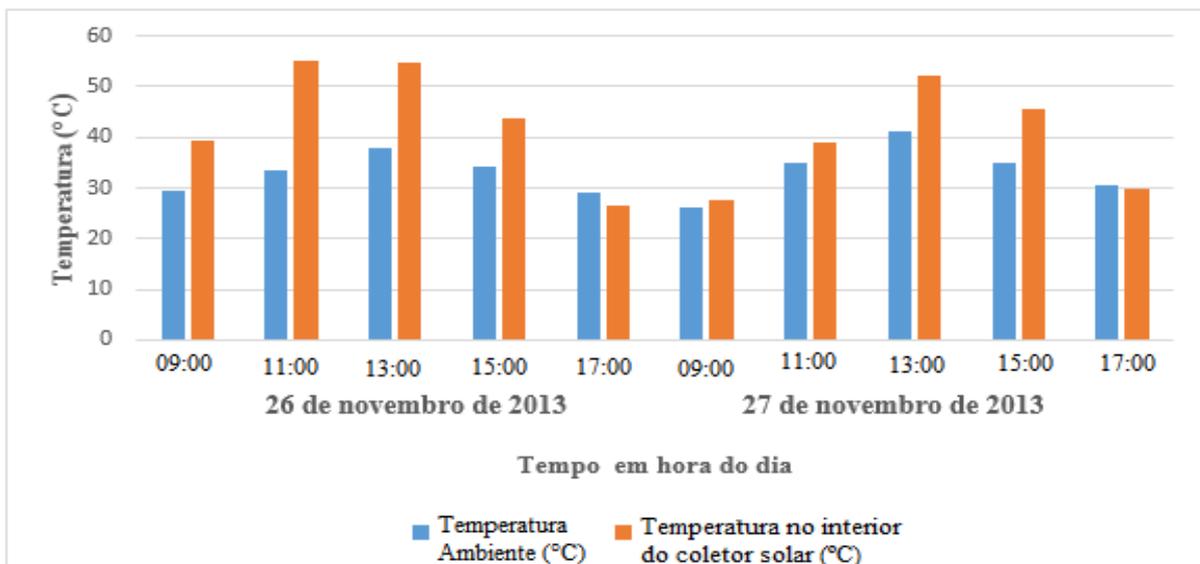
Com relação à média da temperatura no interior do coletor solar, medida pelo termopar 4, observa-se no dia 12/03/2015 que a máxima obtida foi de 57°C, e a mínima obtida foi de 36°C, e que ao longo deste dia e dos dias 13 e 14 de março de 2015 a temperatura média se manteve entre 40°C e 60°C. Isto foi obtido graças a ação da presença da telha de fibrocimento pintada de preto fosco no interior do coletor solar que, neste caso, tem a função de capacitor térmico, para manter a massa de ar no interior do coletor solar em valor acima da média da temperatura ambiente. Nos gráficos de temperatura do ar de secagem no coletor solar, para cada um dos dias de teste observa-se claramente este efeito quando se compara os valores de temperatura do termopar 1 com os do termopar 4.

Com relação as temperaturas obtidas no interior da câmara de secagem, observa-se que os valores registrados nos gráficos para os dias 12, 13 e 14 de março de 2015 apresentam um

valor médio de 40°C e uma variação pouco significativa ao longo do dia. O fato de não ocorrer a convecção forçada neste experimento EXP1, pode justificar essa baixa temperatura média do ar dentro da câmara e como consequência a necessidade de três dias de experimentos para se atingir na banana, valores de teor de água em base úmida em torno de 25%. De fato, como será observado nos experimentos seguintes, EXP2, EXP3, EXP4, EXP5 e EXP6, dois dias serão suficientes para obtenção na banana de valores de teor de água em base úmida em torno de 25%. Isto será analisado oportunamente, mas desde já mostra a importância da utilização da convecção forçada no sistema de secagem desenvolvido.

Com a utilização da câmara de secagem, as condições do ar foram mais uniformes, o que favorece a realização da secagem de fruta com a obtenção de um produto de qualidade elevada. Essa é uma característica que diferencia o secador solar de exposição direta (sem câmara de secagem) do secador solar de exposição indireta. No secador com câmara de secagem o controle da variação da temperatura é mais eficiente, isto é claramente observado quando se comparam os valores das temperaturas nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 usando-se um secador solar indireto, com os valores mostrados na Figura 4.5, que foram obtidos no secador solar de exposição direta, relatados por Nunes et al. (2014), também ocorrida na cidade de Campina Grande, PB.

Figura 4.5. Valores de temperaturas obtidos para o secador solar de exposição direta.



Fonte: Nunes et al. (2014).

A Figura 4.5 mostra que temperatura máxima no interior do secador de exposição direta foi de 55,2°C às 11:00 h do dia 26 de novembro de 2013 enquanto a mínima foi de 26,7°C às 9:00 h do dia seguinte, isso dá uma amplitude de 28,5°C. Essa amplitude térmica elevada para o ar de secagem pode, eventualmente, provocar irregularidades no produto que está sendo secado.

Nas Tabelas 4.1 e 4.2, são apresentados os valores obtidos para massa de banana a cada hora, sendo a primeira medição as 8:00 h e a última do dia as 17:00 h. Observando-se a mesma sequência no dia seguinte. Nas mesmas tabelas são apresentados os valores calculados para as variáveis: massa seca (M_s), teor de umidade em base seca (X_{bs}), teor de umidade em base úmida (X_{bu}) e razão de umidade (RU) nas bandejas 1 e 2, respectivamente, nos experimentos realizados nos dias 12, 13 e 14 de março de 2015 (EXP1). O valor da massa seca foi obtido em testes realizados na estufa da UFCG.

Tabela 4.1. Dados obtidos no experimento realizado nos dias 12, 13 e 14 de março de 2015, bandeja 1.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa Seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$
	08:00	66,0	17	0,7424	2,8824	1,0000
	09:00	63,0	17	0,7302	2,7059	0,9318
	10:00	59,0	17	0,7119	2,4706	0,8409
	11:00	56,0	17	0,6964	2,2941	0,7727
12/03/15	12:00	52,0	17	0,6731	2,0588	0,6818
	13:00	47,0	17	0,6383	1,7647	0,5682
	14:00	45,0	17	0,6222	1,6471	0,5227
	15:00	44,0	17	0,6136	1,5882	0,5000
	16:00	43,5	17	0,6092	1,5588	0,4886
	08:00	41,0	17	0,5854	1,4118	0,4318
	09:00	39,0	17	0,5641	1,2941	0,3864
	10:00	37,0	17	0,5405	1,1765	0,3409
	11:00	34,0	17	0,5000	1,0000	0,2727
13/03/15	12:00	32,0	17	0,4688	0,8824	0,2273
	13:00	30,0	17	0,4333	0,7647	0,1818
	14:00	29,0	17	0,4138	0,7059	0,1591
	15:00	29,0	17	0,4138	0,7059	0,1591
	16:00	27,0	17	0,3704	0,5882	0,1136
14/03/15	08:00	26,0	17	0,3462	0,5294	0,0909
	09:00	25,0	17	0,3200	0,4706	0,0682

1200	10:00	24,0	17	0,2917	0,4118	0,0455
1260	11:00	23,0	17	0,2609	0,3529	0,0227
1320	12:00	22,0	17	0,2273	0,2941	0,0000

Tabela 4.2. Dados obtidos no experimento realizado nos dias 12, 13 e 14 de março de 2015, bandeja 2.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa Seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$
0	08:00	70,0	18	0,7429	2,8889	1,0000
60	09:00	66,0	18	0,7273	2,6667	0,9130
120	10:00	63,0	18	0,7143	2,5000	0,8478
180	11:00	60,0	18	0,7000	2,3333	0,7826
12/03/16 240	12:00	56,0	18	0,6786	2,1111	0,6957
300	13:00	53,0	18	0,6604	1,9444	0,6304
360	14:00	50,0	18	0,6400	1,7778	0,5652
420	15:00	47,0	18	0,6170	1,6111	0,5000
480	16:00	47,0	18	0,6170	1,6111	0,5000
540	08:00	45,0	18	0,6000	1,5000	0,4565
600	09:00	43,0	18	0,5814	1,3889	0,4130
660	10:00	40,0	18	0,5500	1,2222	0,3478
720	11:00	38,0	18	0,5263	1,1111	0,3043
13/03/16 780	12:00	36,0	18	0,5000	1,0000	0,2609
840	13:00	34,0	18	0,4706	0,8889	0,2174
900	14:00	33,0	18	0,4545	0,8333	0,1957
960	15:00	32,5	18	0,4462	0,8056	0,1848
1020	16:00	31,0	18	0,4194	0,7222	0,1522
1080	08:00	29,0	18	0,3793	0,6111	0,1087
1140	09:00	28,0	18	0,3571	0,5556	0,0870
14/03/16 1200	10:00	27,0	18	0,3333	0,5000	0,0652
1260	11:00	25,0	18	0,2800	0,3889	0,0217
1320	12:00	24,0	18	0,2500	0,3333	0,0000

Para este experimento, observa-se que o teor de umidade inicial da banana em base úmida era de 74,24% e 74,29 que, depois de 22:00 h (vinte duas) horas de secagem, quase três dias, o teor de umidade final foi de 22,73 e 25,00% nas bandejas 1 e 2, respectivamente.

As curvas de secagem mostradas nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8, são obtidas através dos dados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, onde os pontos representam os valores de razão de umidade

obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page.

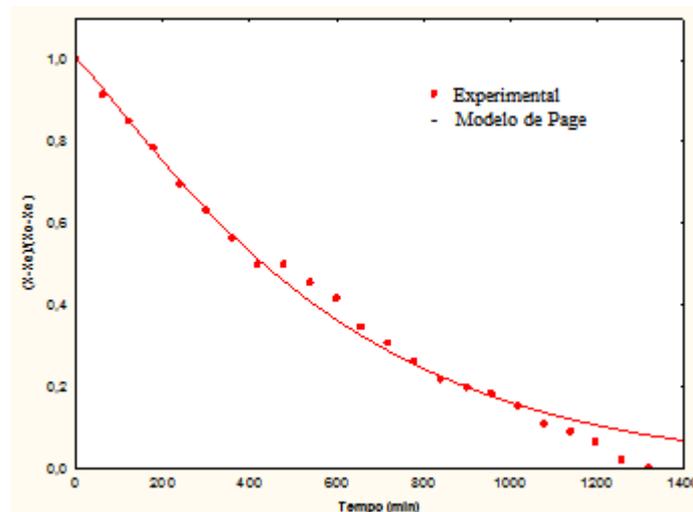
Como esta pesquisa foi realizada apenas com energia solar, a temperatura do ar é variável. Assim, o teor de umidade de equilíbrio da banana foi comparado com a média dos teores de umidade de equilíbrio, calculado para cada intervalo de tempo, usando a Equação 31 (Equação de Henderson Modificada) do trabalho de Phoungchandang e Woods (2000), onde observou-se uma diferença pouco significativa entre a média dos teores de umidade de equilíbrio calculado em cada intervalo de tempo da banana e o teor de umidade de equilíbrio final da banana durante o processo de secagem:

$$X_e = \left[\frac{\ln(1-RH)}{-C_4(T+C_5)} \right]^{1/C_6} \quad (31)$$

Os valores das constantes, C_4 , C_5 e C_6 ($C_4 = 0,02805$, $C_5 = -187,44$, $C_6 = 0,6937$), são conhecidos, RH representa a umidade relativa do ar de secagem. Estes dados foram considerados para todos os experimentos desta pesquisa, onde foi considerada uma temperatura média constante na câmara de secagem.

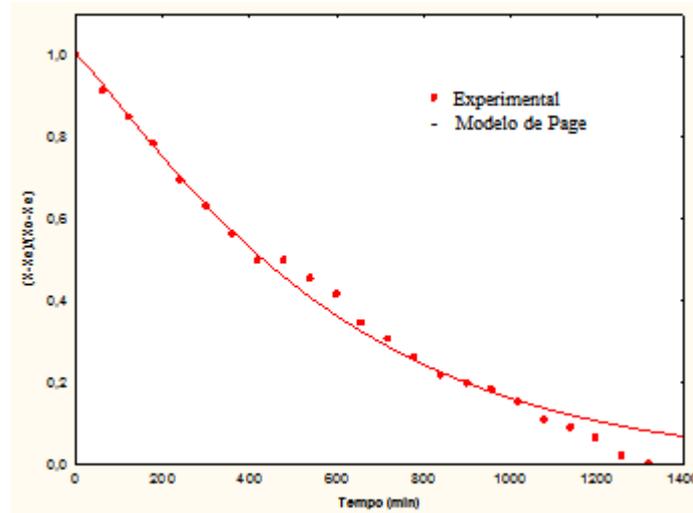
A Figura 4.6 mostra a cinética de secagem da banana contida na primeira bandeja (inferior) ajustada pelo modelo de Page, para o experimento realizado nos dias 12, 13 e 14 de março de 2015.

Figura 4.6. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, primeira bandeja.



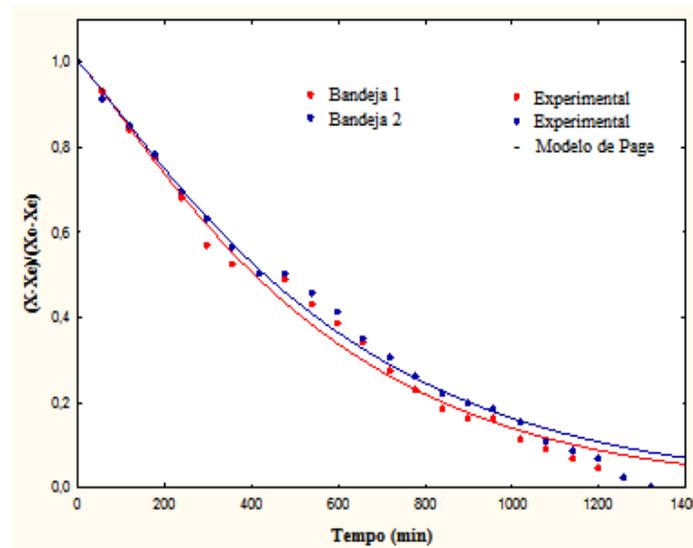
A Figura 4.7 mostra a cinética de secagem da banana contida na segunda bandeja (superior) ajustada pelo modelo de Page, do experimento realizado nos dias 12,13 e 14 de março.

Figura 4.7. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, segunda bandeja.



A Figura 4.8 mostra as cinéticas de secagem das bandejas 1 e 2. Observa-se que a cinética de secagem da segunda bandeja ocorre de forma mais lenta devido ao ganho de umidade da banana da primeira bandeja.

Figura 4.8. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, das bandejas 1 e 2.



Nota-se que os valores experimentais obtidos no primeiro dia do experimento se encontram acima ou próximos da linha do modelo matemático (modelo de Page), enquanto que

os do segundo dia se encontram abaixo da linha. Isto indica que a taxa de secagem no primeiro dia é maior, pois no primeiro dia foram retiradas mais gramas de água da banana, enquanto no segundo dia foram retirados menos gramas de água da banana. Isto ocorreu devido a facilidade de remoção da água no início do processo, quando o teor de umidade ainda está muito elevado. Observa-se também, na Figura 4.8, que a cinética de secagem da segunda bandeja ocorreu de forma mais lenta, devido ao ganho de umidade da banana da primeira bandeja por parte do ar de secagem o que diminui o potencial de secagem do mesmo. As discrepâncias verificadas no gráfico, são devido à variação de temperatura no sistema de secagem durante o experimento. Isso ocorre em razão da intermitência da irradiação solar, e com isso, o sistema de secagem solar opera de forma não uniforme.

Para calcular a eficiência mássica do processo de secagem em EXP1, deve ser utilizada a Equação 30. Substituindo-se os valores da massa inicial e final da banana no numerador e a massa total de água da banana no denominador. Para bandeja inferior, se obtém (η_{p1}), dada por:

$$\eta_p = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{total\ de\ água}} \cdot 100$$

$$\eta_{p1} = \frac{66 - 22}{49} = 89,8\%$$

Obter essa elevada eficiência mássica no processo de secagem demonstra que a utilização da energia solar como fonte energética é competitiva, sendo compatível com eficiências equivalentes a de processos de secagem que usam eletricidade ou GLP.

Para calcular o rendimento térmico do coletor solar serão utilizadas as Equações 14, 16 e 17. Para o experimento 1, tem-se:

$$\dot{m}_1 = 0,0098 \text{ kg/s}$$

$$c_p = 1,0048 \text{ kJ/kg.K, a } 300 \text{ K (INCROPERA et al., 2008)}$$

$$\overline{\Delta T_{7-2}} = 10,50 \text{ K}$$

$\overline{\Delta T_{7-2}}$ representa a variação de temperatura entre os termopares 7 e 2.

Assim, substituindo os valores obtidos na Equação 17, a potência útil para EXP1 (P_{u1}) é dada por:

$$P_{u1} = 0,0098 \frac{kg}{s} \cdot 1,0048 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 10,5 K = 0,10394 \frac{kJ}{s} = 103,394 W$$

Como a área de incidência da irradiação solar sobre a cobertura transparente é $1,0 m^2$ e a média da intensidade da irradiação solar para os dias 12, 13 e 14 de março de 2015 foi de $607 W/m^2$, tem-se, substituindo esses valores na Equação 16, o rendimento térmico do coletor solar obtido no experimento 1 (η_{t1}), dado por:

$$\eta_{t1} = \frac{103,394 W}{1 m^2 \cdot 607 W/m^2} \cdot 100 = 17,03\%$$

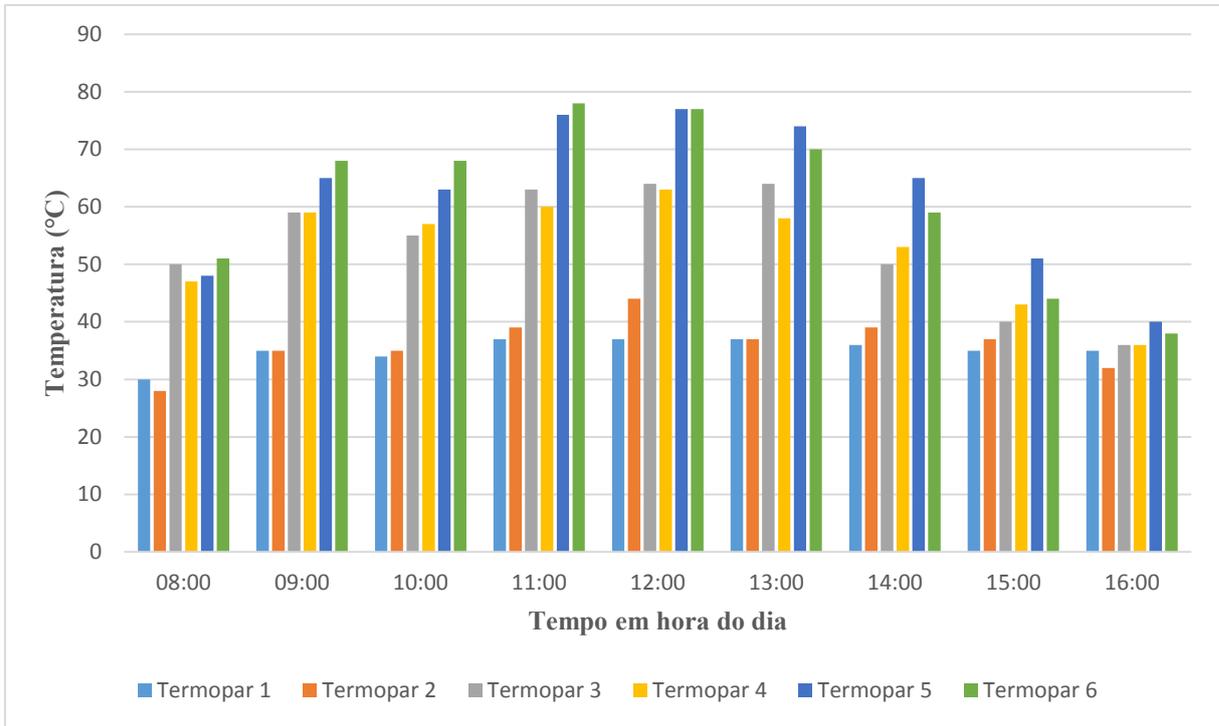
Para os experimentos 2, 3 e 4, as análises do desempenho do processo de secagem e do rendimento do coletor solar seguem o mesmo roteiro aqui descrito, lembrando que nos experimentos 2, 3 e 4 o fluxo de massa é maior do que o obtido no experimento 1, uma vez que no experimento 1 foi utilizado convecção natural.

No final deste capítulo será apresentada uma tabela resumo, com os valores das propriedades/parâmetros obtidos em todos experimentos.

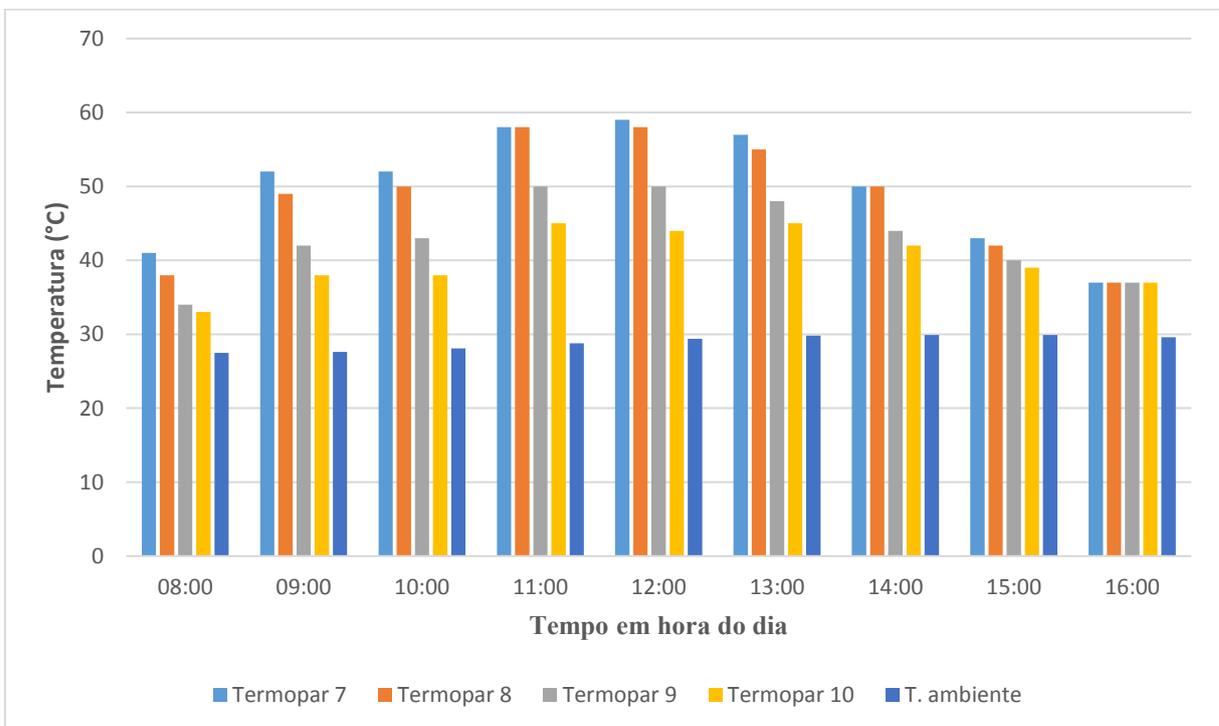
4.1.2 Experimento 2, realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015.

Neste experimento 2 foi instalado um sistema de convecção forçada (*cooler*) na saída do ar de secagem da câmara de secagem (Figura 3.5), acionado por um mini painel fotovoltaico, que é responsável pela movimentação do ar através do sistema desenvolvido. Nas Figuras 4.9 e 4.10, podem-se observar os valores obtidos para as temperaturas do ar de secagem no coletor solar e na câmara de secagem, que serão analisadas a seguir.

Figura 4.9. Distribuição de temperatura do ar: (a) no coletor solar e (b) na câmara de secagem em 26/03/2015.

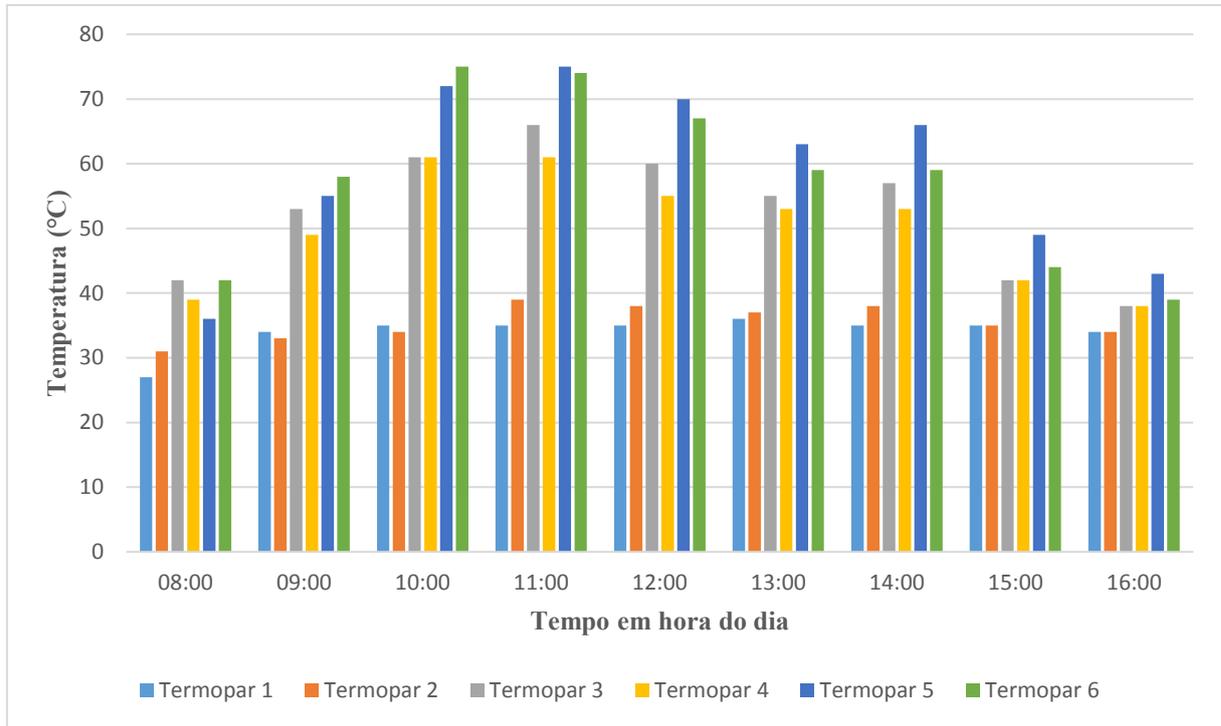


(a)

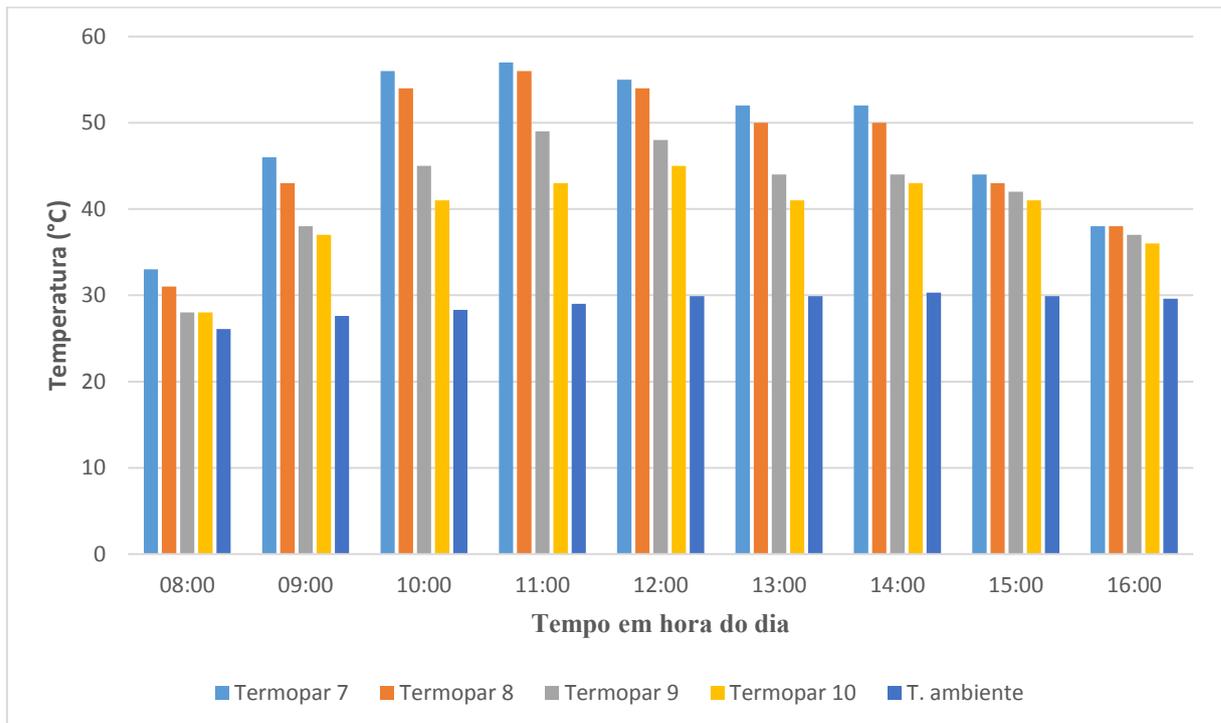


(b)

Figura 4.10. Distribuição de temperatura do ar: (a) no coletor solar e (b) na câmara de secagem em 27/03/2015.



(a)



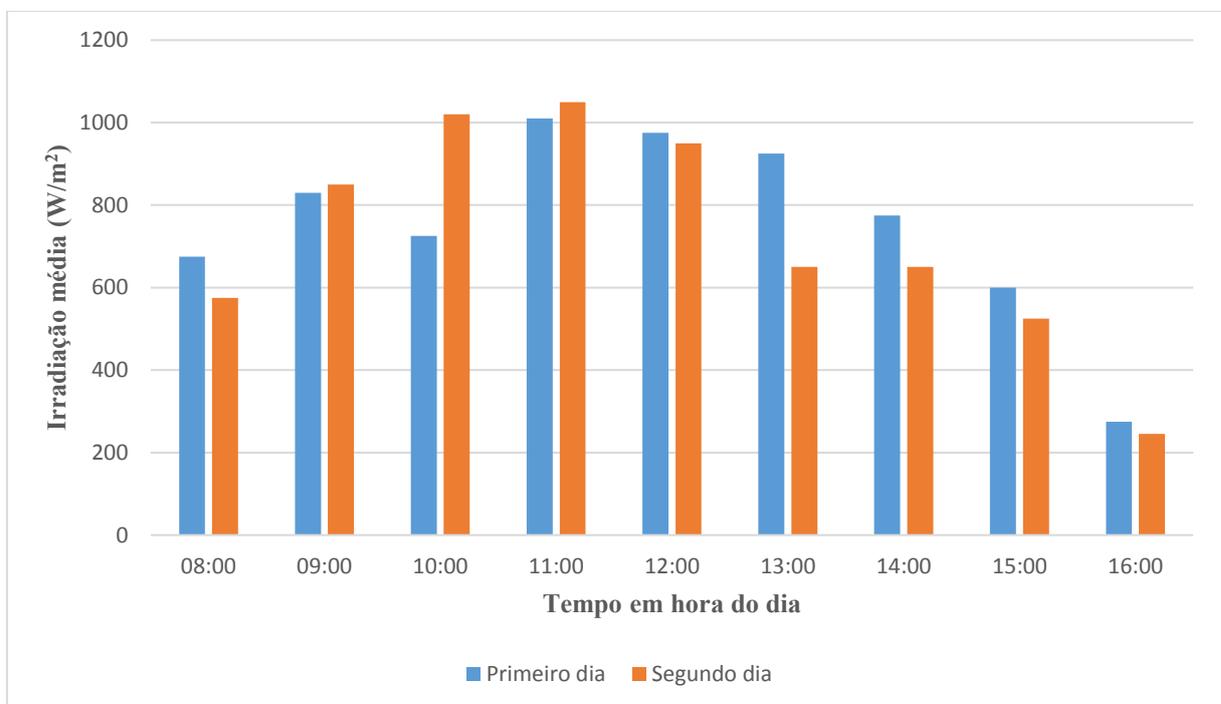
(b)

Observando-se os valores obtidos e mostrados nos gráficos das Figuras 4.9 e 4.10, percebe-se que a temperatura do ar no interior da câmara de secagem esteve na maior parte dos testes entre 40°C e 50°C, o que é muito importante para o processo de secagem. Próximo ao meio dia quando esse valor passa de 50°C, isto ocorreu porque, nos dias 26 e 27 de março, a intensidade de irradiação solar incidente chegou a ser superior a 1.000 W/m², próximo ao meio dia, (situações meteorológicas atípicas nesta época do ano, quando o verão já havia terminado).

Com relação à média da temperatura no interior do coletor solar, medida pelo termopar 4, observa-se no dia 26/03/2015 que a máxima obtida foi de 63°C, e a mínima obtida foi de 36°C, e que ao longo deste dia e do dia 27/03/2015, a temperatura média se manteve entre 40°C e 60°C. Isto foi obtido devido ao uso ação da telha de fibrocimento pintada de preto fosco no interior do secador solar que, neste caso, tem a função de capacitor térmico, para manter a massa de ar no interior do secador em valor acima da média da temperatura ambiente.

A Figuras 4.11 mostra as curvas da média horária da intensidade da irradiação incidente em Campina Grande, nos dias 26 e 27 de março, medidas pelo piranômetro do LEMT/UFCG.

Figura 4.11. Intensidade média de irradiação solar medida em 26 e 27 de março de 2015 na UFCG



A seguir, são apresentadas as Tabelas 4.3 e 4.4 com os dados de parâmetros de secagem obtidos e calculados para o experimento 2 (EXP2), referentes às bandejas 1 e 2.

Tabela 4.3. Dados obtidos no experimento realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015, bandeja 1.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa Seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$	
26/03/15	0	08:00	87	26	0,7011	2,3462	1,0000
	60	09:00	80	26	0,6750	2,0769	0,8679
	120	10:00	75	26	0,6533	1,8846	0,7736
	180	11:00	68	26	0,6176	1,6154	0,6415
	240	12:00	61	26	0,5738	1,3462	0,5094
	300	13:00	57	26	0,5439	1,1923	0,4340
	360	14:00	53	26	0,5094	1,0385	0,3585
	420	15:00	51	26	0,4902	0,9615	0,3208
	480	16:00	49	26	0,4694	0,8846	0,2830
27/03/15	540	08:00	45	26	0,4222	0,7308	0,2075
	600	09:00	43	26	0,3953	0,6538	0,1698
	660	10:00	40	26	0,3500	0,5385	0,1132
	720	11:00	38	26	0,3158	0,4615	0,0755
	780	12:00	36	26	0,2778	0,3846	0,0377
	840	13:00	36	26	0,2778	0,3846	0,0377
	900	14:00	35	26	0,2571	0,3462	0,0189
	960	15:00	34	26	0,2353	0,3077	0,0000

Tabela 4.4. Dados obtidos no experimento realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015, bandeja 2.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$	
26/03/15	0	08:00	82	24	0,7073	2,4167	1,0000
	60	09:00	77	24	0,6883	2,2083	0,9000
	120	10:00	71	24	0,6620	1,9583	0,7800
	180	11:00	65	24	0,6308	1,7083	0,6600
	240	12:00	58	24	0,5862	1,4167	0,5200
	300	13:00	54	24	0,5556	1,2500	0,4400
	360	14:00	51	24	0,5294	1,1250	0,3800
	420	15:00	48	24	0,5000	1,0000	0,3200
	480	16:00	46	24	0,4783	0,9167	0,2800
27/03/15	540	08:00	43	24	0,4419	0,7917	0,2200
	600	09:00	40	24	0,4000	0,6667	0,1600
	660	10:00	38	24	0,3684	0,5833	0,1200
	720	11:00	36	24	0,3333	0,5000	0,0800
	780	12:00	35	24	0,3143	0,4583	0,0600
	840	13:00	33	24	0,2727	0,3750	0,0200
	900	14:00	33	24	0,2727	0,3750	0,0200
	960	15:00	32	24	0,2500	0,3333	0,0000

Para este experimento, observa-se que o teor de umidade inicial da banana era de aproximadamente 70% e que, depois de 16 (dezesseis) horas de secagem, o teor de umidade final foi de 23,53% e 25,00%, nas bandejas 1 e 2, respectivamente.

Nota-se que a variação de massa obtida entre o início e término das medições (primeira bandeja) do experimento 2 foi de 53 g. Esta foi, portanto, a massa total de água retirada da banana prata. Considerando que a massa total de água da banana prata, no início da secagem era de 61 gramas, a eficiência do processo de secagem é obtida pelo quociente entre a massa total de água retirada durante a secagem pela massa de água inicial, dada pela Equação 27.

Portanto, substituindo-se os valores obtidos no experimento 2, na Equação 30, tem-se a eficiência do processo de secagem para o experimento 2 (η_{p2}), dada por:

$$\eta_{p2} = \frac{87 - 34}{61,0} = 86,89\%$$

Essa elevada eficiência do processo demonstra que com o uso da energia solar é possível obter eficiências equivalentes a de processos de secagem usando eletricidade ou GLP, sendo que o insumo energético solar tem, significativamente investimentos bem menores.

Para calcular o rendimento térmico do coletor solar serão utilizadas as Equações 14 e 17. Para o experimento 2, a Equação 17 apresenta os seguintes valores:

$$\dot{m}_1 = 0,01071 \text{ kg/s}$$

$$c_p = 1,0048 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\overline{\Delta T_{7-2}} = 13,17 \text{ K}$$

Assim, substituindo os valores obtidos na Equação 17, a potência útil para o experimento 2 (P_{u2}) é dada por:

$$P_{u2} = 0,01071 \frac{kg}{s} \cdot 1,0048 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 13,17 K = 0,141728 \frac{kJ}{s} = 141,723 W$$

Como a área de incidência da irradiação solar sobre a cobertura transparente é $1 m^2$ e a média da intensidade da irradiação solar para os dias 26 e 27 de março de 2015 foi de $677 W/m^2$, tem-se, substituindo esses valores na Equação 16, o rendimento térmico do equipamento obtido no experimento 2 (η_{t2}), dado por:

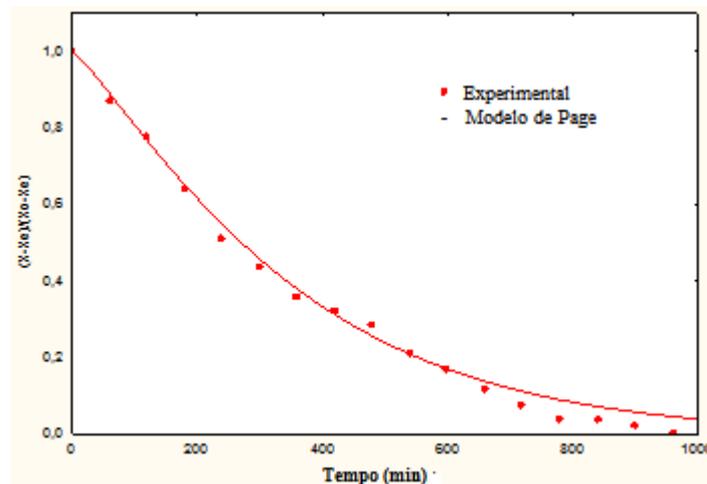
$$\eta_{t2} = \frac{141,723 W}{1 m^2 \cdot 677 W/m^2} \cdot 100 = 20,93\%$$

Comparando os experimentos 1 e 2 observa-se que o experimento 1 teve um tempo de secagem maior, ou seja, 6 (seis) horas a mais, este fato se dá pela ausência da convecção forçada do ar de secagem e uma diferença na temperatura do ar de secagem, em torno de 3 graus, no interior da câmara de secagem, como pode ser visto no Apêndice A.

As curvas de secagem mostradas nas Figuras 4.12, 4.19 e 4.13, são obtidas através dos dados apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem obtida pelo modelo de Page.

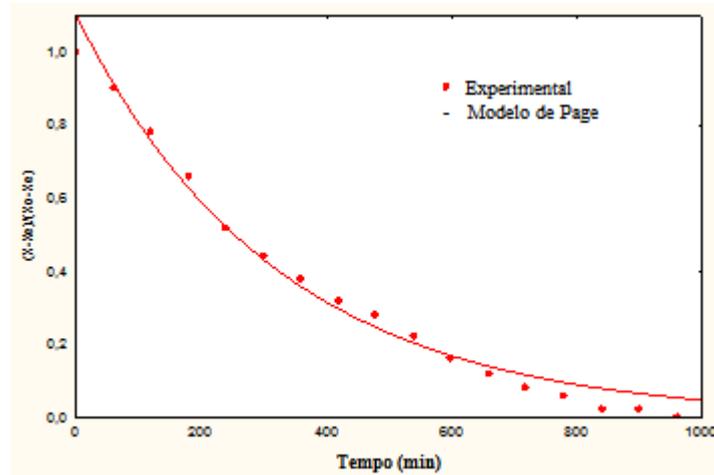
A Figura 4.12 representa a cinética de secagem da banana contida na primeira bandeja ajustado pelo modelo de Page, do experimento realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015.

Figura 4.12. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, primeira bandeja.



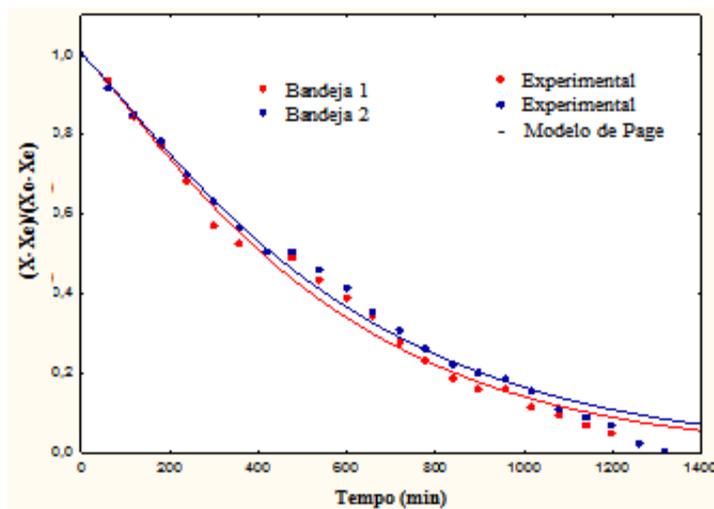
A Figura 4.13 representa a cinética de secagem da segunda bandeja ajustado pelo modelo de Page, do experimento realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015.

Figura 4.13. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, segunda bandeja.



A Figura 4.14 mostra as cinéticas de secagem das bandejas 1 e 2. Observa-se que a cinética de secagem da segunda bandeja ocorre de forma mais lenta devido ao ganho de umidade da banana da primeira bandeja

Figura 4.14. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, das bandejas 1 e 2.



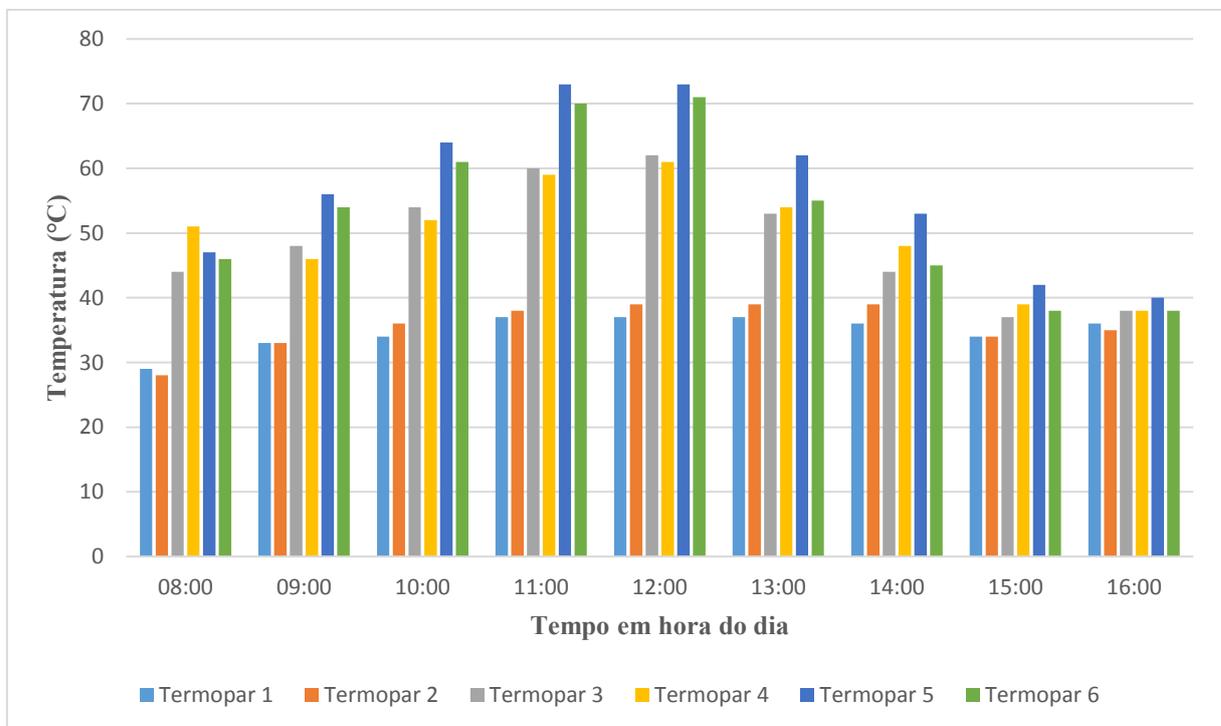
Na Figura 4.14, nota-se que os valores experimentais obtidos no primeiro dia do experimento se encontram acima ou próximos da linha do modelo matemático (modelo de

Page), enquanto que os do segundo dia se encontram abaixo da linha. Isto indica que a taxa de secagem no primeiro dia é maior, pois no primeiro dia foram retiradas mais gramas de água da banana, enquanto no segundo dia foram retirados menos gramas de água da banana. Isto ocorre devido a facilidade de remoção da água no início do processo, quando o teor de umidade ainda está muito elevado. Observa-se também que a cinética de secagem da segunda bandeja ocorreu de forma mais lenta devido ao ganho de umidade da banana da primeira bandeja por parte do ar de secagem o que diminui o potencial de secagem do mesmo. As discrepâncias verificadas no gráfico são devido a variação de temperatura no sistema de secagem durante o experimento. Isso ocorre em razão da intermitência da irradiação solar, e com isso, o sistema de secagem solar opera de forma variada.

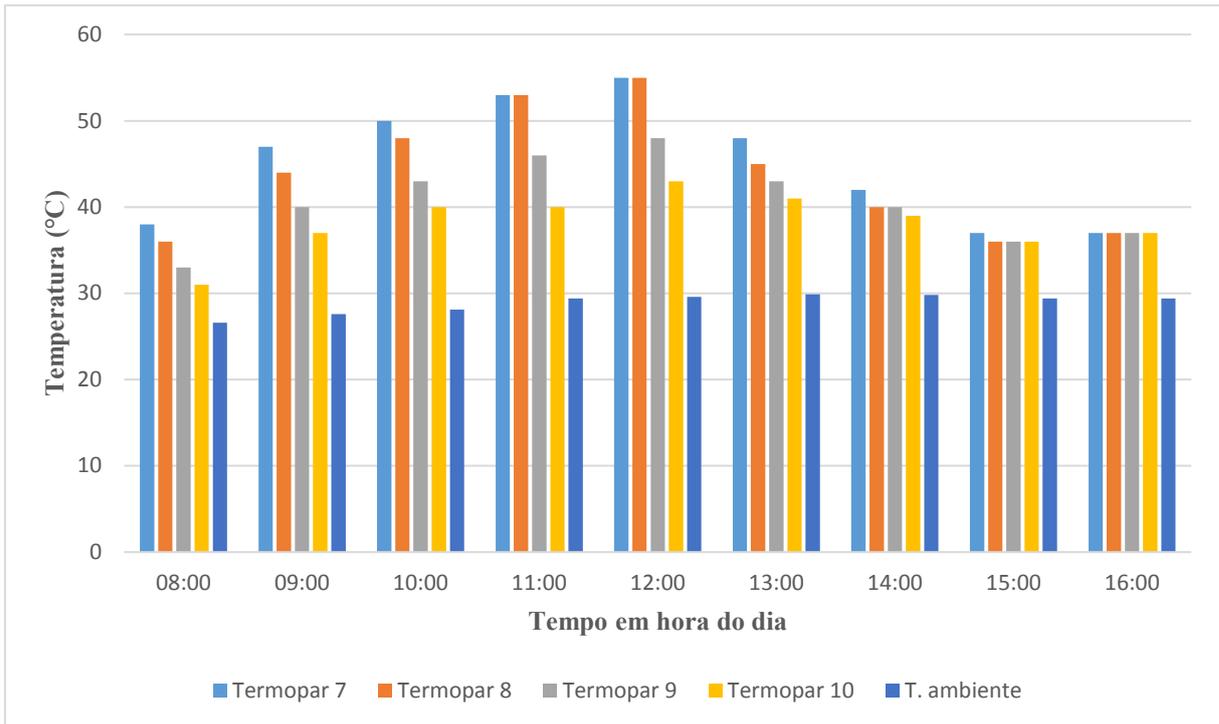
4.1.3 Experimento 3, realizado nos dias 28 e 29 de abril de 2015

Nas Figuras 4.15 e 4.16, podem-se observar os valores obtidos para as temperaturas do ar de secagem no coletor solar e na câmara de secagem desenvolvida.

Figura 4.15. Distribuição de temperatura do ar: (a) no coletor solar e (b) na câmara de secagem no dia 28 de abril de 2015.

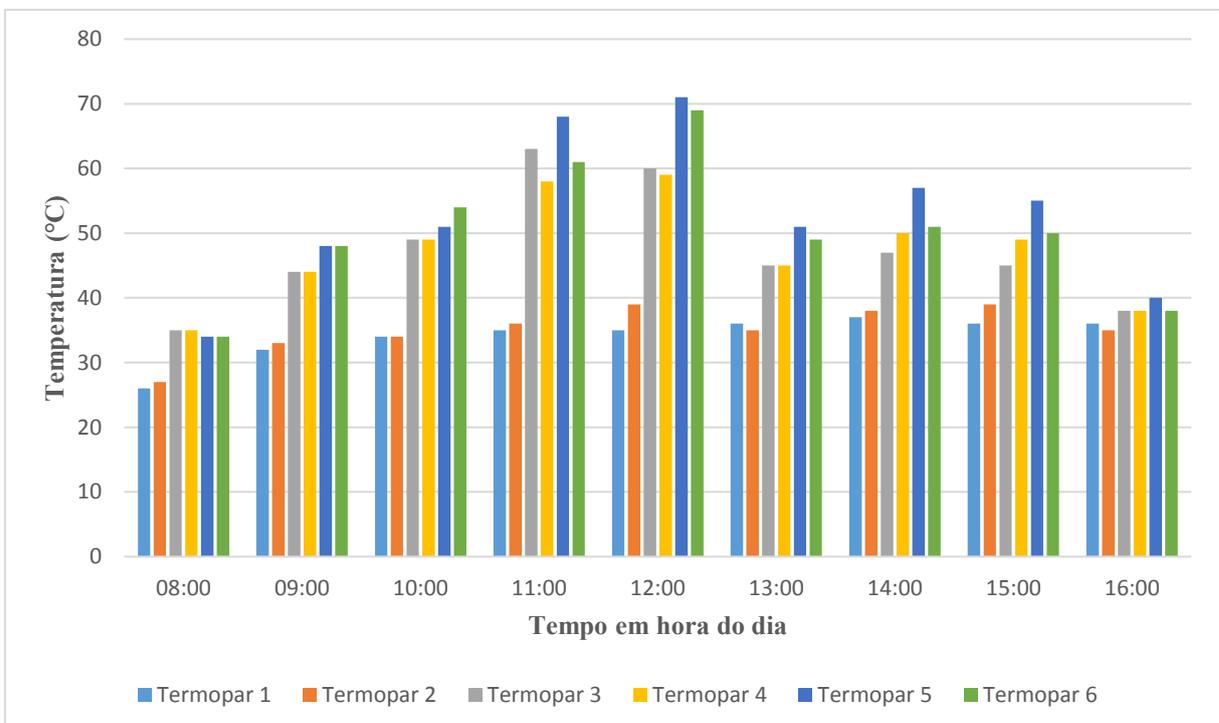


(a)

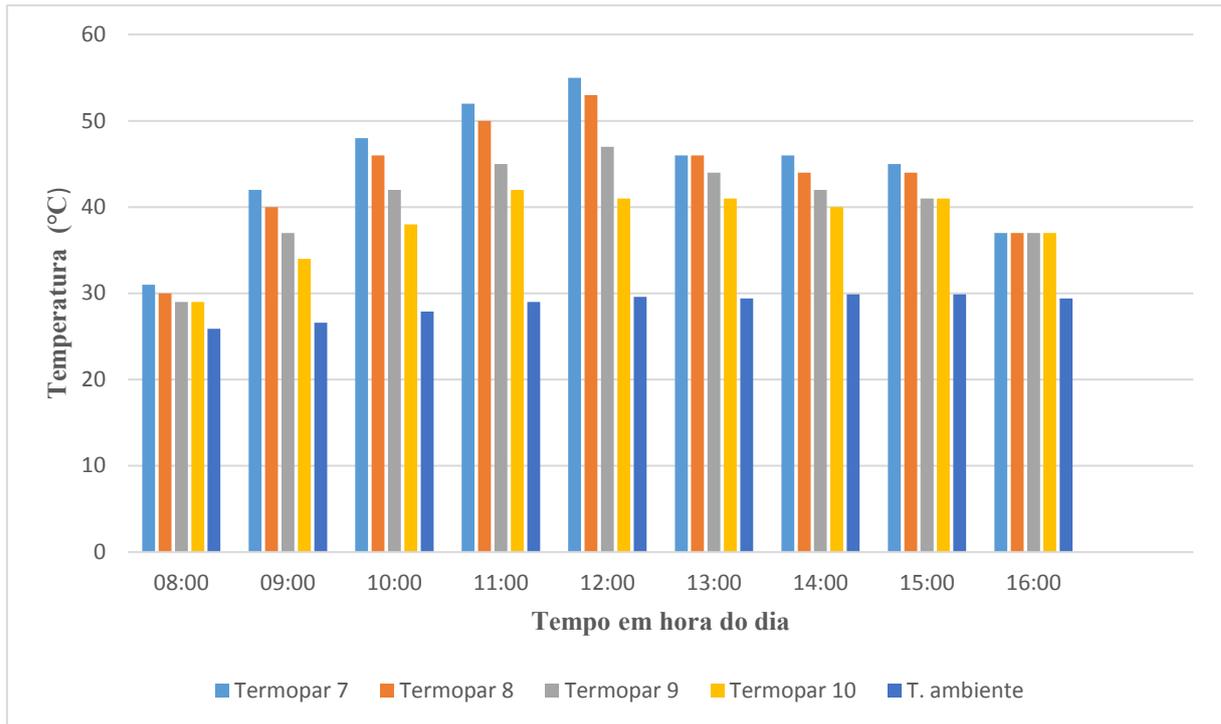


(b)

Figura 4.16. Distribuição de temperatura do ar: (a) no coletor solar e (b) na câmara de secagem no dia 29 de abril de 2015.



(a)



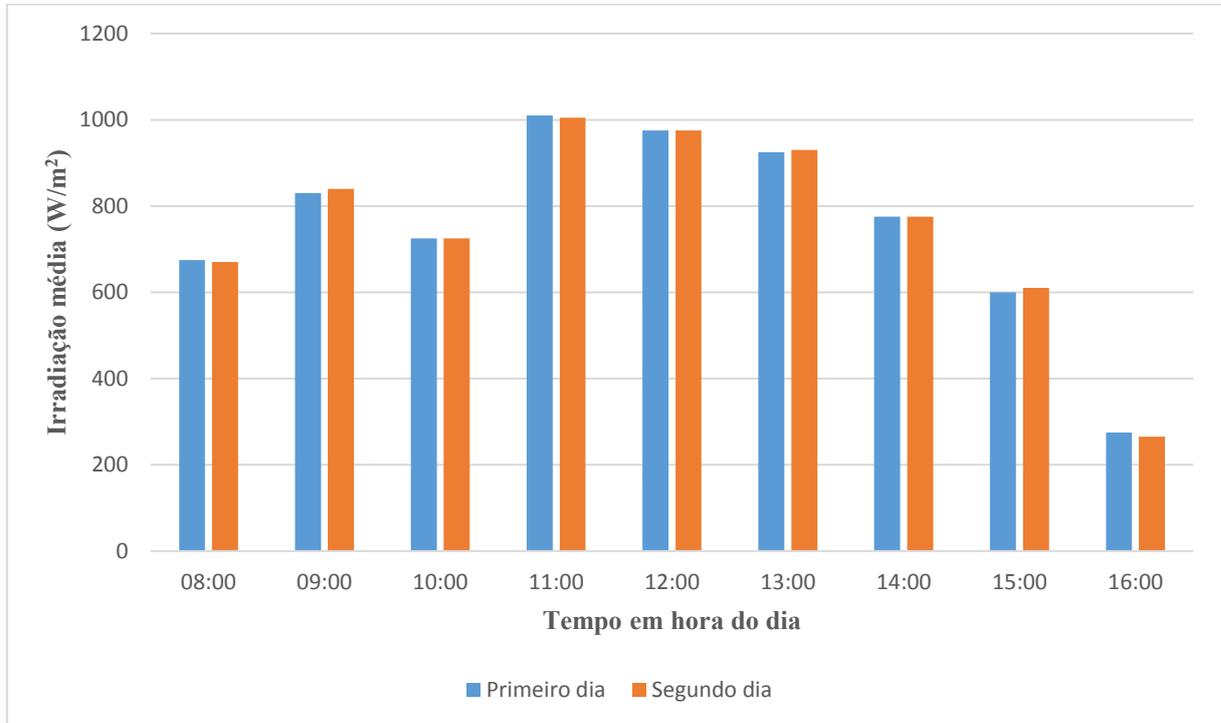
(b)

Observando-se os valores obtidos e mostrados no gráfico das Figuras 4.15 e 4.16, percebe-se que a temperatura do ar no interior da câmara de secagem esteve na maior parte dos testes entre 38°C e 50°C o que é muito importante para o processo de secagem, exceto próximo ao meio dia quando esse valor passa de 50°C. Isto ocorreu devido ao uso de um *cooler* localizado na chaminé da câmara de secagem, acionado por mini painel fotovoltaico e também porque nos dias 28 e 29 de abril de 2015 a intensidade de irradiação solar incidente chegou a ser superior a 790 W/m², próximo ao meio dia. Estas situações meteorológicas são atípicas nesta época do ano, quando o verão já havia terminado.

Com relação à média da temperatura no interior do coletor solar, medida pelo termopar 4, observa-se no dia 28/04/2015 que a máxima obtida foi de 61°C, e a mínima obtida foi de 39°C, e que ao longo deste dia a temperatura média se manteve entre 40°C e 60°C. Isto foi obtido devido ao uso da telha no interior do coletor solar que, neste caso, tem a função de capacitor térmico, para manter a massa de ar no interior do coletor solar em valor acima da média da temperatura ambiente.

A Figura 4.17 mostra a curva da média da intensidade da irradiação incidente em Campina Grande, nos dias 28 e 29 de abril de 2015, medida pelo piranômetro do LEMT/UFCG.

Figura 4.17. Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 28 e 29 de abril de 2015 na UFCG.



A seguir, são apresentadas as Tabelas 4.5 e 4.6 com os dados de parâmetros de secagem obtidos e calculados para o experimento 3 (EXP3).

Tabela 4.5. Valores obtidos no experimento realizado nos dias 28 e 29 de abril de 2015, bandeja 1.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$
0	08:00	126	40	0,6825	2,150	1,0000
60	09:00	119	40	0,6639	1,975	0,9000
120	10:00	111	40	0,6396	1,775	0,7857
180	11:00	107	40	0,6262	1,675	0,7286
240	12:00	95	40	0,5789	1,375	0,5571
300	13:00	89	40	0,5506	1,225	0,4714
360	14:00	84	40	0,5238	1,100	0,4000
420	15:00	81	40	0,5062	1,025	0,3571
480	16:00	81	40	0,5062	1,025	0,3571

29/05/16	540	08:00	77	40	0,4805	0,925	0,3000
	600	09:00	72	40	0,4444	0,800	0,2286
	660	10:00	63	40	0,3651	0,575	0,1000
	720	11:00	63	40	0,3651	0,575	0,1000
	780	12:00	60	40	0,3333	0,500	0,0571
	840	13:00	58	40	0,3103	0,450	0,0286
	900	14:00	57	40	0,2982	0,425	0,0143
	960	15:00	56	40	0,2857	0,400	0,0000

Tabela 4.6. Valores obtidos no experimento realizado nos dias 28 e 29 de abril de 2015, bandeja 2.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$
0	08:00	124	40	0,6774	2,100	1,0000
60	09:00	117	40	0,6581	1,925	0,8955
120	10:00	109	40	0,6330	1,725	0,7761
180	11:00	102	40	0,6078	1,55	0,6716
240	12:00	95	40	0,5789	1,375	0,5672
300	13:00	89	40	0,5506	1,225	0,4776
360	14:00	84	40	0,5238	1,100	0,4030
420	15:00	81	40	0,5062	1,025	0,3582
480	16:00	81	40	0,5062	1,025	0,3582
540	08:00	77	40	0,4805	0,925	0,2985
600	09:00	73	40	0,4521	0,825	0,2388
660	10:00	68	40	0,4118	0,700	0,1642
720	11:00	64	40	0,3750	0,600	0,1045
780	12:00	61	40	0,3443	0,525	0,0597
840	13:00	59	40	0,3220	0,475	0,0299
900	14:00	58	40	0,3103	0,450	0,0149
960	15:00	57	40	0,2982	0,425	0,0000

Para este experimento, observa-se que o teor de umidade inicial da banana era de aproximadamente 68% e que, depois de 16 (dezesseis) horas de secagem, o teor de umidade final em base úmida foi de 28,57% e 29,82% nas bandejas 1 e 2 respectivamente.

Logo, substituindo-se os valores obtidos no experimento 3, na Equação 30, tem-se a eficiência do processo de secagem obtida para o experimento 3 (η_{p3}), dada por:

$$\eta_{p3} = \frac{126 - 56}{85,68} = 81,70\%$$

Para calcular o rendimento térmico do equipamento serão utilizadas as Equações 14 e 17. Para o experimento 3, a Equação 17 apresenta os seguintes valores:

$$\dot{m}_1 = 0,01071 \text{ kg/s}$$

$$c_p = 1,0048 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\overline{\Delta T_{7-2}} = 10 \text{ K}$$

Assim, substituindo os valores obtidos na Equação 17, a potência útil para o experimento 3 (P_{u3}) é dada por:

$$P_{u3} = 0,01071 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0048 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 10 \text{ K} = 0,107614 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 107,614 \text{ W}$$

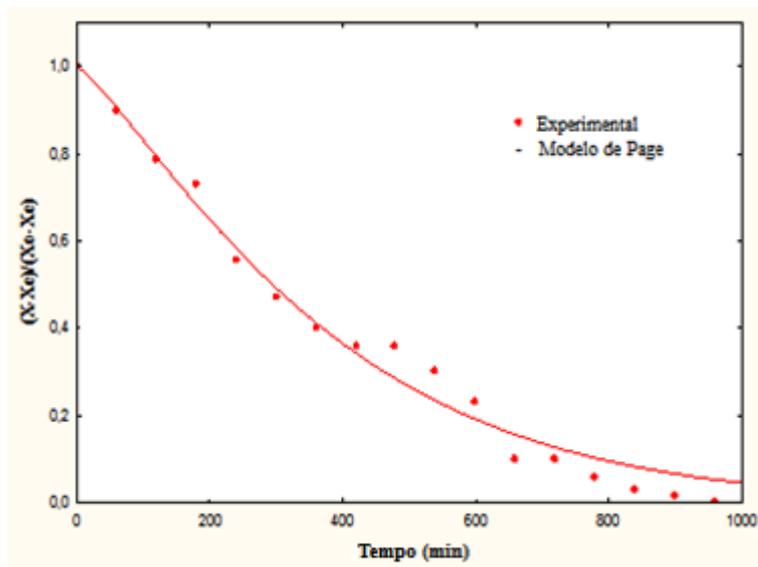
Como a área de incidência da irradiação solar sobre a cobertura transparente é 1 m^2 e a média da intensidade da irradiação solar para o dia 28 de abril de 2015 foi de 565 W/m^2 , tem-se, substituindo esses valores na Equação 16, o rendimento térmico do equipamento obtido no experimento 3 (η_{t3}), dado por:

$$\eta_{t3} = \frac{107,614 \text{ W}}{1 \text{ m}^2 \cdot 565 \text{ W/m}^2} \cdot 100 = 19,05\%$$

A curvas de secagem mostradas nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20, são obtidas através dos dados apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem pelo modelo de Page.

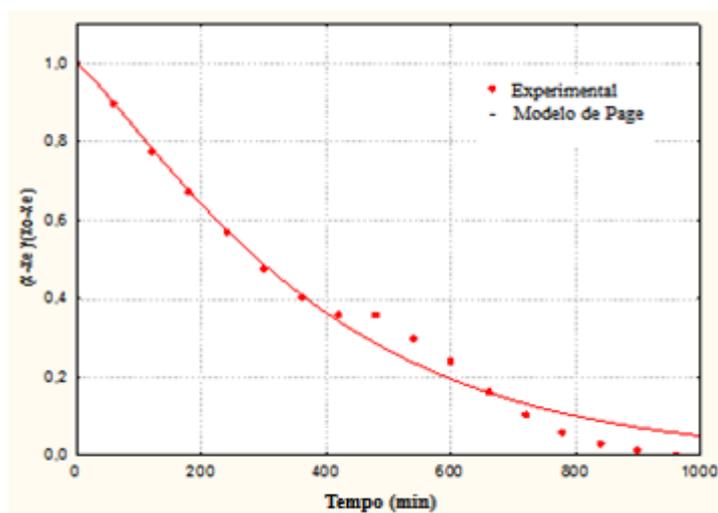
A Figura 4.18 representa a cinética de secagem da primeira bandeja ajustado pelo modelo de Page, do experimento realizado nos dias 28 e 29 de abril de 2015.

Figura 4.18. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, primeira bandeja.



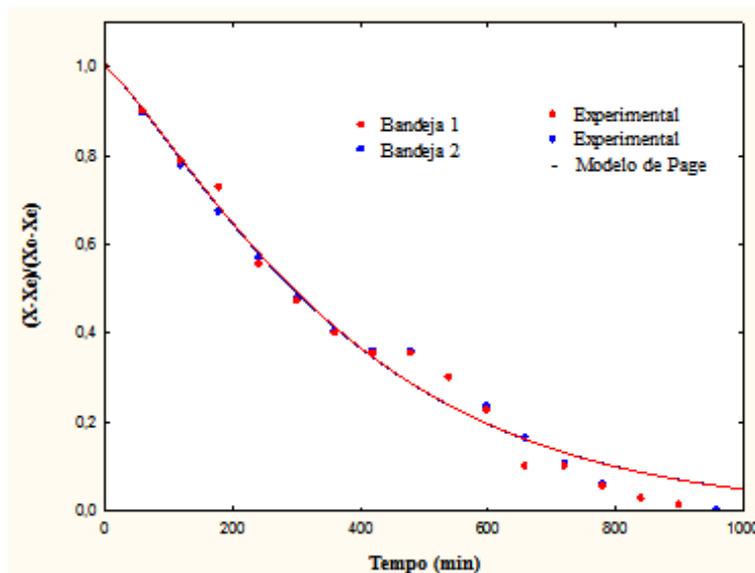
A Figura 4.19 representa a cinética de secagem da segunda bandeja ajustado pelo modelo de Page, do experimento realizado nos dias 28 e 29 de abril de 2015.

Figura 4.19. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, segunda bandeja.



A Figura 4.20 mostra as cinéticas de secagem das bandejas 1 e 2. Observa-se que a cinética de secagem da segunda bandeja ocorre de forma mais lenta devido ao ganho de umidade da banana da primeira bandeja.

Figura 4.20. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, das bandejas 1 e 2.



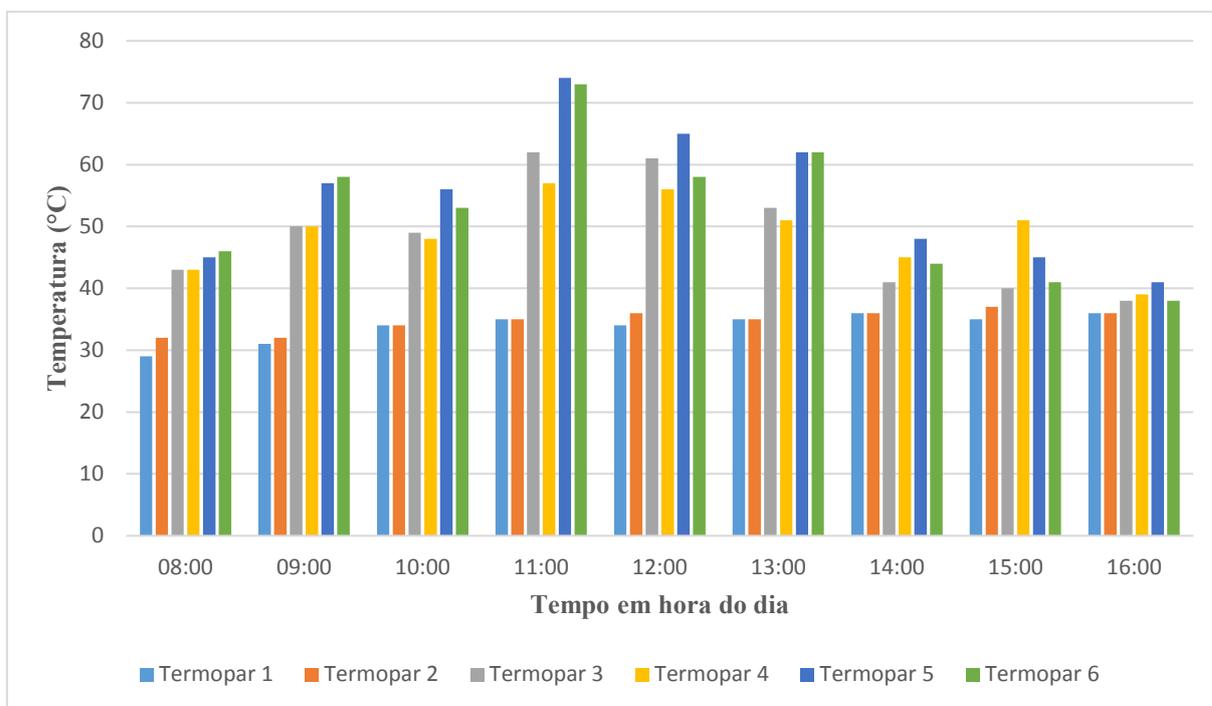
Na Figura 4.20, nota-se que os valores experimentais obtidos no primeiro dia do experimento se encontram acima ou próximos da linha do modelo matemático (modelo de Page), enquanto que os do segundo dia se encontram abaixo da linha. Isto indica que a taxa de secagem no primeiro dia é maior, pois no primeiro dia foram retiradas mais gramas de água da banana, enquanto no segundo dia foram retirados menos gramas de água da banana. Isto ocorre devido a facilidade de remoção da água no início do processo, quando o teor de umidade ainda está muito elevado. Para este experimento a cinética de secagem da segunda bandeja ocorreu de forma quase semelhante ao da primeira bandeja, mesmo assim, a cinética de secagem da segunda bandeja ocorreu de forma mais lenta devido ao ganho de umidade retirada da banana da primeira bandeja por parte do ar de secagem, o que diminui o potencial de secagem do mesmo, este foi um caso atípico para todos os testes realizados. As discrepâncias verificadas no gráfico são devido a variação de temperatura no sistema de secagem durante o experimento. Isso ocorre em razão da intermitência da irradiação solar, e com isso, o sistema de secagem solar opera de forma variada.

4.1.4 Experimento 4, realizado nos dias 26 e 27 de maio de 2015

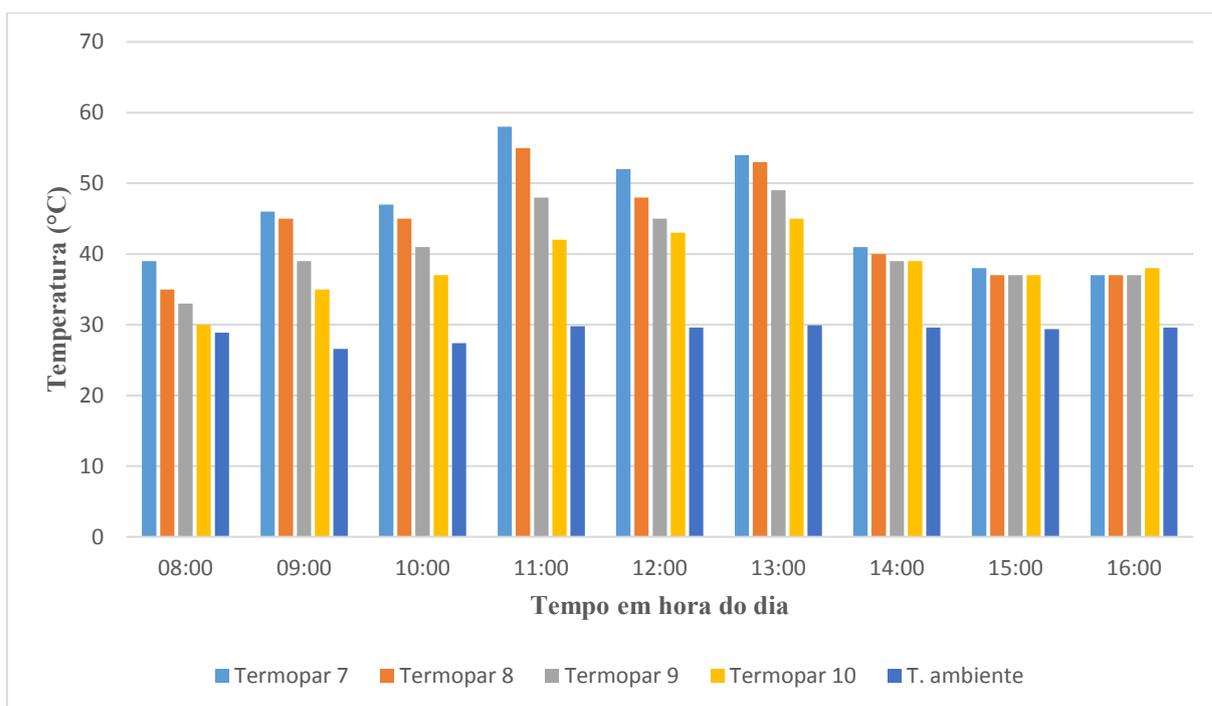
Nas Figuras 4.21 e 4.22 podem se observar os valores obtidos para as temperaturas no equipamento desenvolvido, valores esses que normalmente são conseguidos com o uso intensivo de energia elétrica nos secadores de frutas atualmente em uso comercial. Portanto, a

economia de energia elétrica resultante deve ser utilizada para demonstrar a viabilidade técnica do equipamento desenvolvido.

Figura 4.21. Distribuição de temperatura do ar: (a) no coletor solar e (b) na câmara de secagem no dia 26 de maio de 2015.

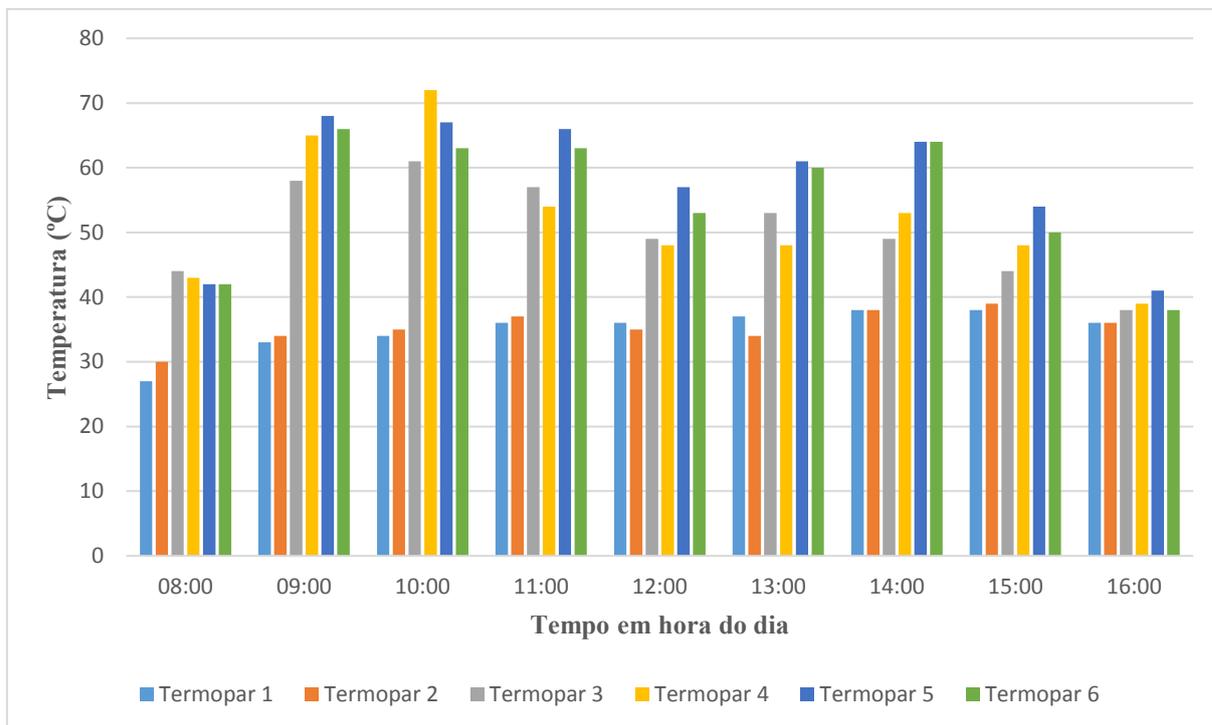


(a)

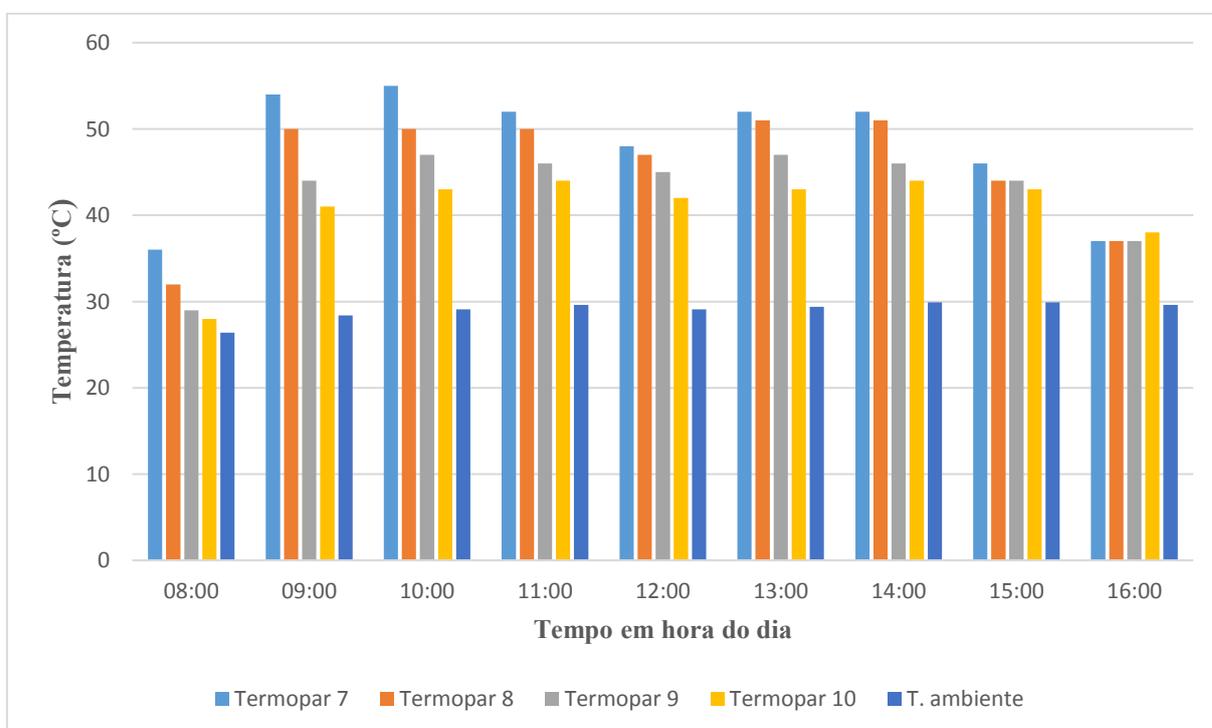


(b)

Figura 4.22. Distribuição de temperatura do ar: (a) no coletor solar e (b) na câmara de secagem no dia 27 de maio de 2015



(a)



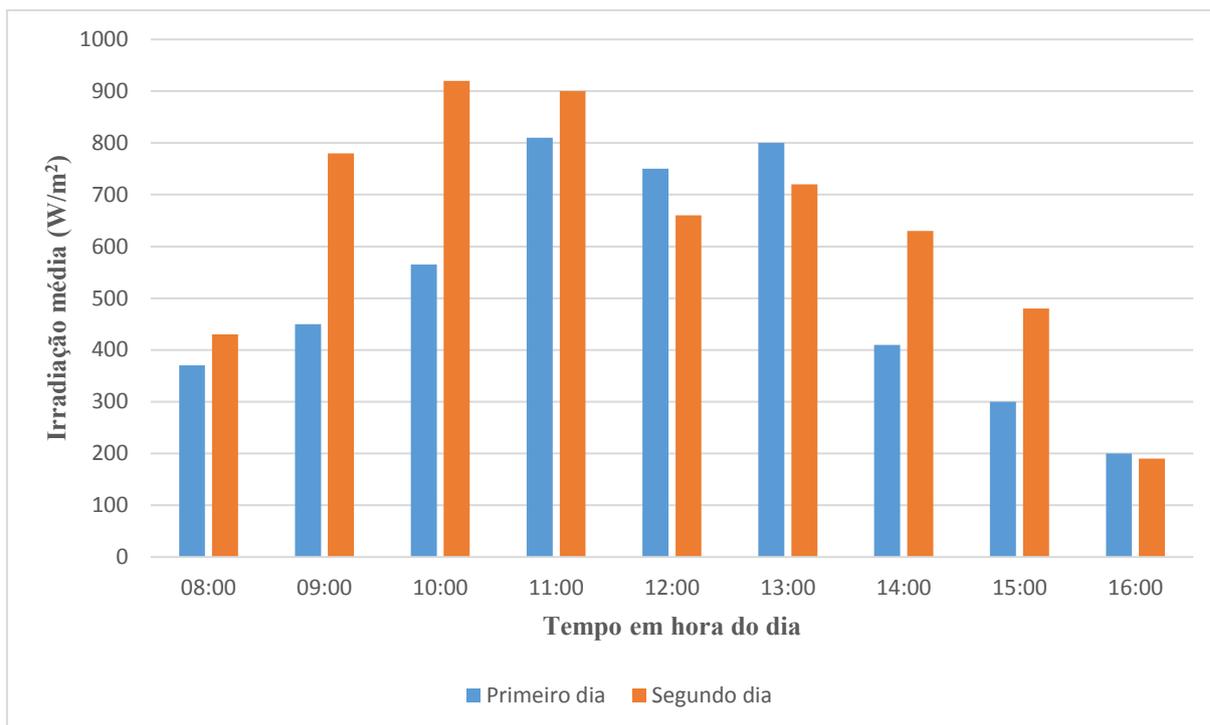
(b)

Observando-se os valores obtidos e mostrados nos gráficos das Figuras 4.27 e 4.28, percebe-se que a temperatura do ar de secagem no interior da câmara de secagem esteve na maior parte dos testes entre 40°C e 50°C o que é muito importante para o processo de secagem, exceto próximo ao meio dia quando esse valor passa de 50°C. Isto ocorreu devido ao uso de um *cooler* localizado na saída do ar de secagem da câmara de secagem, acionado por mini painel fotovoltaico e também porque nos dias 26 e 27 de maio de 2015 a intensidade de irradiação solar incidente chegou a ser superior a 850 W/m² e 950 W/m², próximo ao meio dia. Estas situações meteorológicas são atípicas nesta época do ano, quando o verão já havia terminado.

Foi observado que depois da instalação da convecção forçada através de um *cooler* acionado por um mini painel fotovoltaico, a temperatura média dentro da câmara de secagem teve um aumento de aproximadamente de 3°C (ver o Apêndice A), tornando a secagem mais rápida e uniforme.

Com relação à média da temperatura no interior do coletor solar, medida pelo termopar 4, observa-se no dia 26/05/2015 que a máxima obtida foi de 72°C, e a mínima obtida foi de 39°C, e que ao longo deste dia e do dia 27/05/2015 a temperatura média se manteve entre 40°C e 60°C. Isto foi obtido devido ao uso da telha no interior do coletor solar que, neste caso, tem a função de capacitor térmico, para manter a massa de ar no interior do secador em valor acima da média da temperatura ambiente.

A Figura 4.23 mostra as curvas da média da intensidade da irradiação incidente em Campina Grande, nos dias 26 e 27 de maio de 2015, medidas pelo piranômetro do LEMT.

Figura 4.23. Intensidade média de irradiação solar medida nos dias 26 e 27 de maio de 2015 na UFCG.

A seguir, são apresentadas as Tabelas 4.7 e 4.8 com os dados de parâmetros de secagem obtidos e calculados para o experimento 4 (EXP4).

Tabela 4.7. Dados obtidos no experimento realizado nos dias 26 e 27 de maio de 2015, bandeja 1.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$
0	08:00	94	32	0,6596	1,8750	1,0000
60	09:00	92	32	0,6522	1,6875	0,9623
120	10:00	86	32	0,6279	1,5312	0,8491
26/05/15 180	11:00	81	32	0,6049	1,3125	0,7547
240	12:00	74	32	0,5676	1,1250	0,6226
300	13:00	68	32	0,5294	1,0312	0,5094
360	14:00	65	32	0,5077	0,9687	0,4528
420	15:00	63	32	0,4921	0,9687	0,4151
480	16:00	63	32	0,4921	0,8125	0,4151

26/05/15	540	08:00	58	32	0,4483	0,6562	0,3208
	600	09:00	53	32	0,3962	0,5625	0,2264
	660	10:00	50	32	0,3600	0,4687	0,1698
	720	11:00	47	32	0,3191	0,4062	0,1132
	780	12:00	45	32	0,2889	0,3437	0,0755
	840	13:00	43	32	0,2558	0,3125	0,0377
	900	14:00	42	32	0,2381	1,8750	0,0189
	960	15:00	41	32	0,2195	1,8750	0,0000

Tabela 4.8. Dados obtidos no experimento realizado nos dias 26 e 27 de maio de 2015, bandeja 2.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$	
0	08:00	96	32	0,6667	2,0000	1,0000	
60	09:00	93	32	0,6559	1,9062	0,9444	
120	10:00	88	32	0,6364	1,7500	0,8519	
180	11:00	82	32	0,6098	1,5625	0,7407	
26/05/15	240	12:00	76	32	0,5789	1,3750	0,6296
300	13:00	71	32	0,5493	1,2187	0,5370	
360	14:00	67	32	0,5224	1,0937	0,4630	
420	15:00	64	32	0,5000	1,0000	0,4074	
480	16:00	64	32	0,5000	1,0000	0,4074	
27/05/15	540	08:00	59	32	0,4576	0,8437	0,3148
	600	09:00	55	32	0,4182	0,7187	0,2407
	660	10:00	52	32	0,3846	0,6250	0,1852
	720	11:00	49	32	0,3469	0,5312	0,1296
	780	12:00	46	32	0,3043	0,4375	0,0741
	840	13:00	44	32	0,2727	0,3750	0,0370
	900	14:00	43	32	0,2558	0,3437	0,0185
	960	15:00	42	32	0,2381	0,3125	0,0000

Para este experimento, observa-se que o teor de umidade inicial da banana era de aproximadamente 66% e que, depois de 16 (dezesseis) horas de secagem, o teor de umidade final em base úmida foi de 21,95 e 23,81% nas bandejas 1 e 2 respectivamente.

Logo, substituindo-se os valores obtidos no experimento 4, na Equação 30, tem-se a eficiência do processo de secagem obtida para o experimento 4 (η_{p4}), dada por:

$$\eta_{p4} = \frac{96 - 41}{63,36} = 86,81\%$$

Essa elevada eficiência do processo demonstra que com o uso da energia solar é possível obter eficiências equivalentes a de processos de secagem usando eletricidade ou GLP.

Para calcular o rendimento térmico do equipamento serão utilizadas as Equações 14 e 17. Para o experimento 4, a Equação 17 apresenta os seguintes valores:

$$\dot{m}_1 = 0,01071 \text{ kg/s}$$

$$c_p = 1,0048 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\overline{\Delta T_{7-2}} = 12,47 \text{ K}$$

Assim, substituindo os valores obtidos na Equação 17, a potência útil para EXP4 (P_{u4}) é dada por:

$$P_{u4} = 0,01071 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0048 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 12,47 \text{ K} = 0,134195 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 134,195 \text{ W}$$

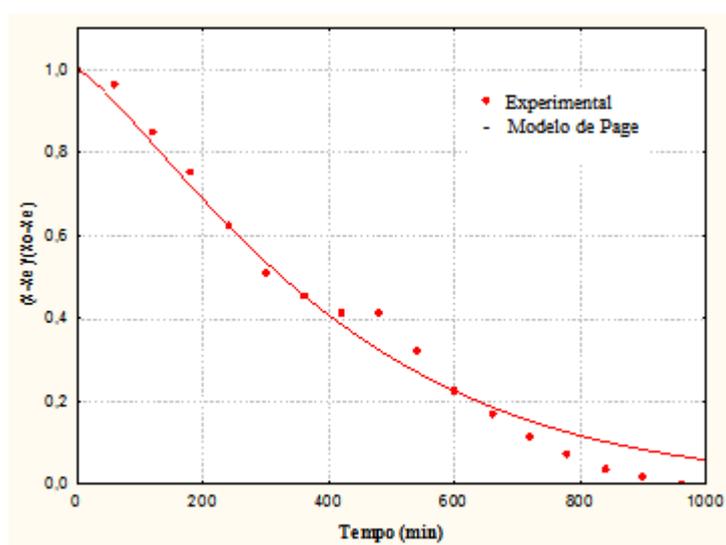
Como a área de incidência da irradiação solar sobre a cobertura transparente é 1 m^2 e a média da intensidade da irradiação solar para os dias 26 e 27 de maio de 2015 foi de 595 W/m^2 , tem-se, substituindo esses valores na Equação 16, o rendimento térmico do equipamento obtido em EXP4 (η_{t4}), dado por:

$$\eta_{t4} = \frac{134,195 \text{ W}}{1 \text{ m}^2 \cdot 595 \text{ W/m}^2} \cdot 100 = 22,55\%$$

A curvas de secagem mostradas nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26, são obtidas através dos dados apresentados nas Tabela 4.7 e 4.8, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page.

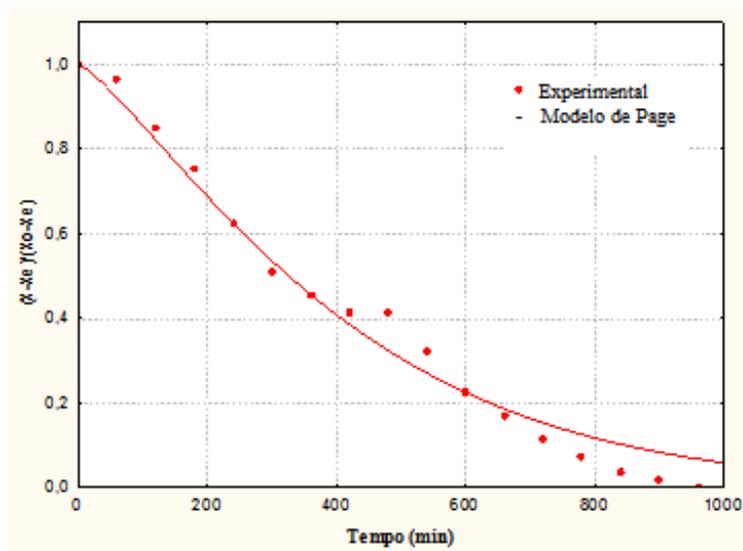
A Figura 4.24 representa a cinética de secagem da banana contida na primeira bandeja e ajustado pelo modelo de Page, do experimento realizado nos dias 26 e 27 de maio de 2015.

Figura 4.24. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, primeira bandeja.



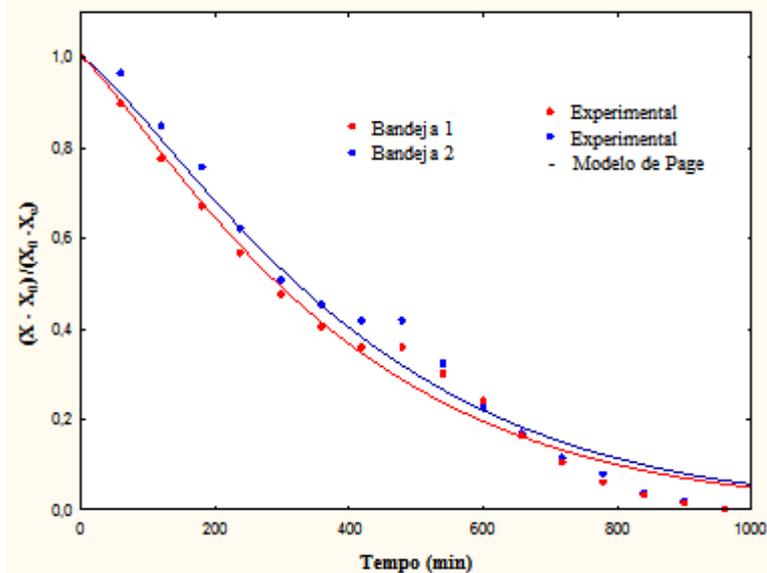
A Figura 4.25 representa a cinética de secagem da banana contida na segunda bandeja e ajustado pelo modelo de Page, do experimento realizado nos dias 26 e 27 de maio de 2015.

Figura 4.25. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, segunda bandeja.



A Figura 4.26 mostra as cinéticas de secagem das bandejas 1 e 2. Observa-se que a cinética de secagem da segunda bandeja ocorre de forma mais lenta devido ao ganho de umidade da banana da primeira bandeja

Figura 4.26. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, das bandejas 1 e 2.



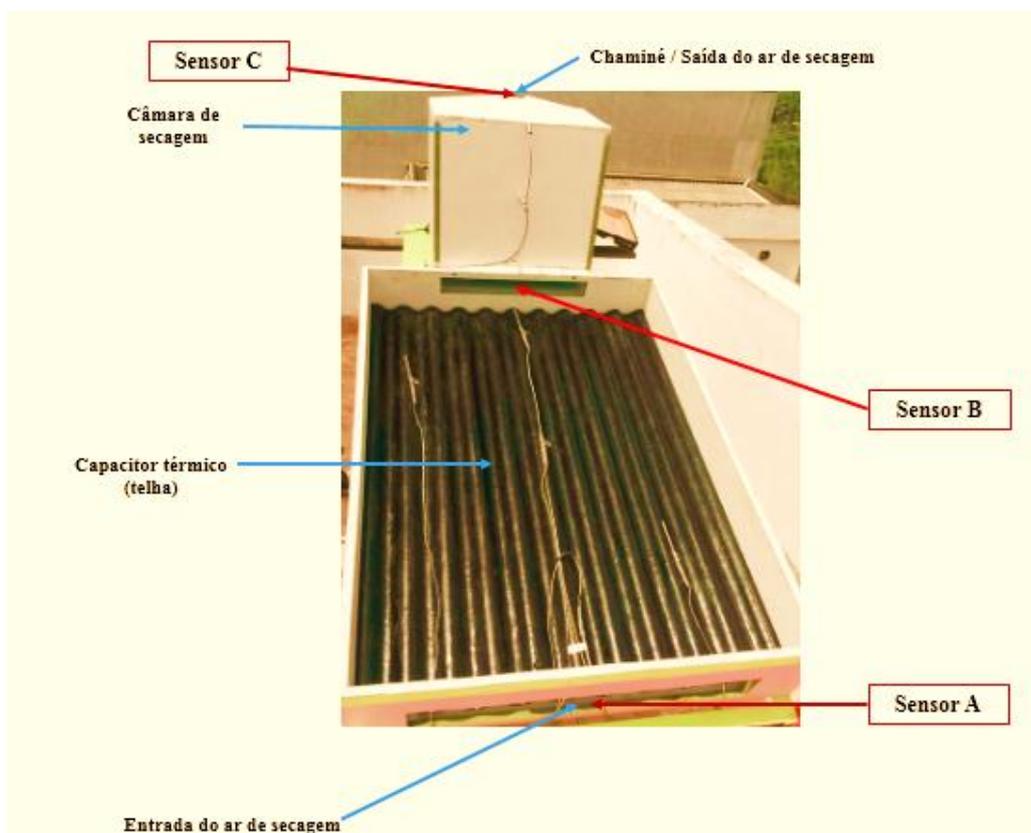
Nota-se que os valores experimentais obtidos no primeiro dia do experimento se encontram acima ou próximos da linha do modelo matemático (modelo de Page), enquanto que os do segundo dia se encontram abaixo da linha. Isto indica que a taxa de secagem no primeiro dia é maior, pois no primeiro dia foram retiradas mais gramas de água da banana, enquanto no segundo dia foram retirados menos gramas de água da banana. Isto ocorre devido a facilidade

de remoção da água no início do processo, quando o teor de umidade ainda está muito elevado. Observa-se também na Figura 4.26, que a cinética de secagem da segunda bandeja ocorreu de forma mais lenta devido ao ganho de umidade da banana da primeira bandeja por parte do ar de secagem o que diminui o potencial de secagem do mesmo. As discrepâncias verificadas no gráfico são devido a variação de temperatura no sistema de secagem durante o experimento. Isso ocorre em razão da intermitência da irradiação solar, e com isso, o sistema de secagem solar opera de forma variada.

4.1.5 Experimento 5, realizado nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016

Os experimentos 5 e 6 foram realizados em 2016, com início às 9:00 horas do dia e término às 16:00 horas, sendo 7 (sete) horas de secagem por dia. Durante os 2 (dois) dias foram 14 (quatorze) horas. Neste caso, foram medidas as temperaturas e as umidades relativas do ar de secagem na entrada e na saída de cada componente (coletor solar e câmara de secagem), tornando possível o cálculo do rendimento térmico de cada componente do sistema, a partir da aplicação um balanço de energia e da primeira lei da termodinâmica.

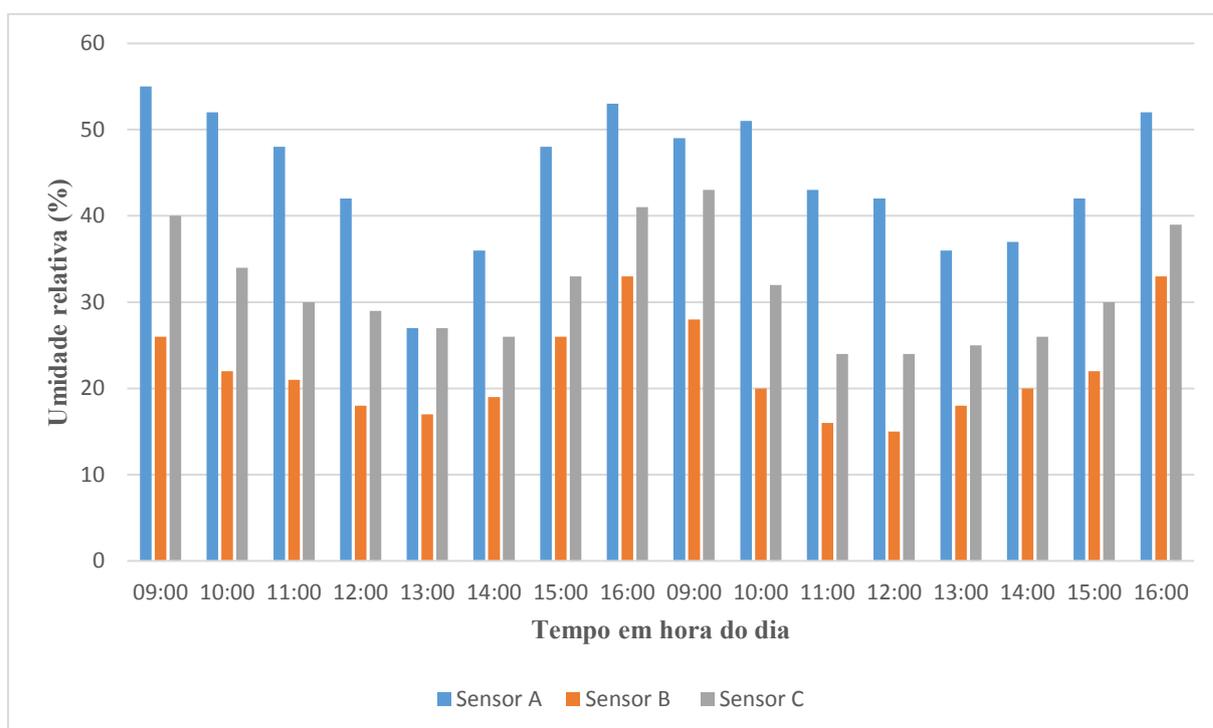
Figura 4.27. Localização dos sensores A, B e C de temperatura e umidade relativa do ar de secagem.



Na Figura 4.27 é possível observar a posição dos sensores A, B e C no secador solar. O sensor (A) está posicionado na entrada do coletor solar, o sensor (B) na junção do coletor solar com a câmara de secagem (saída/entrada) e o sensor (C) na saída da câmara de secagem, respectivamente.

Na Figura 4.28 é possível observar os valores obtidos para a umidade relativa do ar de secagem no equipamento desenvolvido, nas posições A, B e C.

Figura 4.28. Valores obtidos para umidade relativa do ar de secagem no secador solar nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016, nas posições A, B e C.



Observando-se os valores obtidos e mostrados no gráfico da Figura 4.28, percebe-se que a umidade relativa do ar de secagem na junção (saída do coletor solar/entrada da câmara de secagem), obtida com o sensor B, esteve na maior parte dos testes entre 20 e 30%, o que é muito importante para o processo de secagem. Quanto menor a umidade do ar na entrada da câmara de secagem, mais água será retirada da banana, com isto se reduz o tempo de secagem. Foi observado que esse valor se aproxima de 30% no final do dia. Isto ocorreu porque no final do dia, a intensidade de irradiação solar incidente é muito baixa, com valores em torno de 150 W/m^2 . Estas situações meteorológicas são características da cidade de Campina Grande na Paraíba, que tem, mesmo no verão, a presença de nuvens nos finais das tardes e no início das

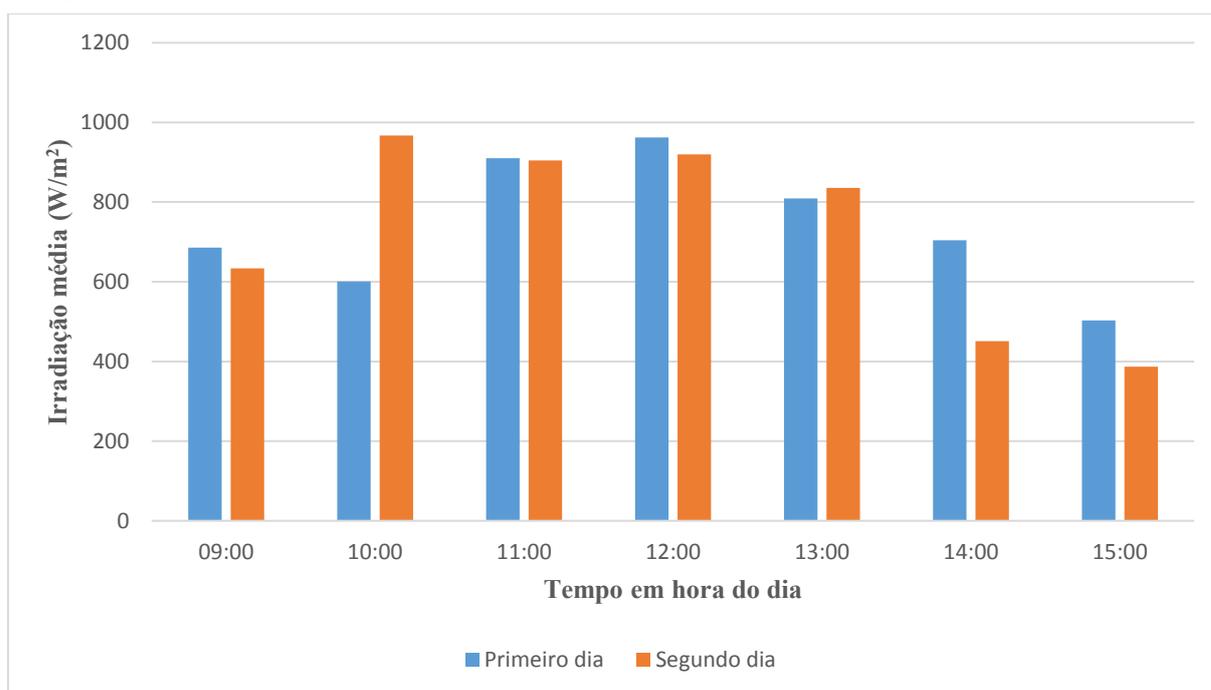
manhãs. Aqui é possível inferir que este mesmo sistema de secagem solar, em teste em cidade como Patos, na Paraíba ou Mossoró, no Rio Grande do Norte, consiga realizar a mesma secagem num intervalo de tempo menor.

Outra alternativa para reduzir a umidade relativa do ar de secagem na entrada da câmara de secagem é utilizar adsorventes no interior do coletor solar, como estratégia para obtenção dessa redução. Essa estratégia já está sendo testada em outro secador solar em desenvolvimento e que é objeto de pesquisa pelo grupo de pesquisadores da UFCG nesta área de estudo.

Observando o gráfico da Figura 4.28 é possível afirmar que durante os dois dias de teste experimental, de fato, ocorreu uma significativa redução da umidade relativa do ar de secagem no coletor solar. Isto é claramente percebido pela diferença dos valores registrados na entrada e na saída do coletor. Isto mostra que o coletor solar foi bem projetado e que realiza muito bem suas duas funções que são reduzir a umidade relativa e aumentar a temperatura do ar.

Para os dias 25 e 26 de fevereiro de 2016, entre 9 e 16 horas, a média de irradiação solar incidente foi de aproximadamente, 720 W/m^2 . Esta média foi calculada pela estação meteorológica instalada no LEMT/UFCG, os dados obtidos estão mostrados na Figura 4.29.

Figura 4.29. Intensidade média de irradiação solar medida em 25 e 26 de fevereiro de 2016 na UFCG.



Os dados obtidos para a temperatura do ar de secagem no equipamento desenvolvido, nas posições A, B e C, posicionados na entrada do coletor solar (A), na junção do coletor solar com a câmara de secagem (saída/entrada) (B) e na saída da câmara de secagem (C), respectivamente, encontram-se no Apêndice A.

A seguir, são apresentadas as Tabelas 4.9 e 4.10 com os dados de parâmetros de secagem obtidos e calculados para o experimento 5 (EXP5) nas bandejas 1 e 2.

Tabela 4.9. Valores obtidos no experimento realizado nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016, bandeja 1.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$
0	09:00	29,6	9,4	0,6824	2,1489	1,0000
60	10:00	26,9	9,4	0,6506	1,8617	0,8439
120	11:00	26,2	9,4	0,6412	1,7872	0,8035
180	12:00	23,8	9,4	0,6050	1,5319	0,6647
240	13:00	21,7	9,4	0,5668	1,3085	0,5434
300	14:00	20,1	9,4	0,5323	1,1383	0,4509
360	15:00	19,1	9,4	0,5079	1,0319	0,3931
420	16:00	18,4	9,4	0,4891	0,9574	0,3526
480	08:00	16,7	9,4	0,4371	0,7766	0,2543
540	09:00	15,5	9,4	0,3935	0,6489	0,1850
600	10:00	14,4	9,4	0,3472	0,5319	0,1214
660	11:00	13,6	9,4	0,3088	0,4468	0,0751
720	12:00	12,9	9,4	0,2713	0,3723	0,0347
780	13:00	12,5	9,4	0,2480	0,3298	0,0116
840	14:00	12,3	9,4	0,2358	0,3085	0,0000

Tabela 4.10. Valores obtidos no experimento realizado nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016, bandeja 2.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$	
	0	08:00	29,8	9,6	0,6779	2,1042	1,0000
	60	09:00	27,6	9,6	0,6522	1,8750	0,8713
	120	10:00	26,8	9,6	0,6418	1,7917	0,8246
25/02/16	180	11:00	24,6	9,6	0,6098	1,5625	0,6959
	240	12:00	22,6	9,6	0,5752	1,3542	0,5789
	300	13:00	21,2	9,6	0,5472	1,2083	0,4971
	360	14:00	20,1	9,6	0,5224	1,0938	0,4327
	420	15:00	19,4	9,6	0,5052	1,0208	0,3918
	480	08:00	17,7	9,6	0,4576	0,8438	0,2924
	540	09:00	16,2	9,6	0,4074	0,6875	0,2047
	600	10:00	15,1	9,6	0,3642	0,5729	0,1404
26/02/16	660	11:00	14,2	9,6	0,3239	0,4792	0,0877
	720	12:00	13,6	9,6	0,2941	0,4167	0,0526
	780	13:00	13,1	9,6	0,2672	0,3646	0,0234
	840	14:00	12,7	9,6	0,2441	0,3229	0,0000

Para este experimento, observa-se que o teor de umidade inicial da banana era de aproximadamente 68% e que, depois de 14 (quatorze) horas de secagem, o teor de umidade final em base úmida foi de 23,58 e 24,41% nas bandejas 1 e 2 respectivamente.

Substituindo-se os valores obtidos no experimento 5, na Equação 30, tem-se a eficiência mássica do processo de secagem (η_{p5}), dada por:

$$\eta_{p5} = \frac{29,6 - 12,3}{20,2} \cdot 100 = 85,64\%$$

Essa elevada eficiência mássica do processo demonstra que com o uso da energia solar é possível obter eficiência mássica de processo de secagem equivalente à de situação onde a secagem ocorre com o uso da eletricidade ou GLP.

Para calcular o rendimento térmico do equipamento utilizando apenas os dados de temperatura, como feito nos experimentos de 1 a 4, e as Equações 14 e 17. Para o experimento 5, a Equação 14 apresenta os seguintes valores:

$$\dot{m}_1 = 0,01071 \text{ kg/s}$$

$$c_p = 1,0048 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\overline{\Delta T_{7-2}} = 13,44 \text{ K}$$

Assim, substituindo os valores obtidos na Equação 17, a potência útil para E5 (P_{u5}) é dada por:

$$P_{u5} = 0,01071 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0048 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 13,44 \text{ K} = 0,144633 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 144,633 \text{ W}$$

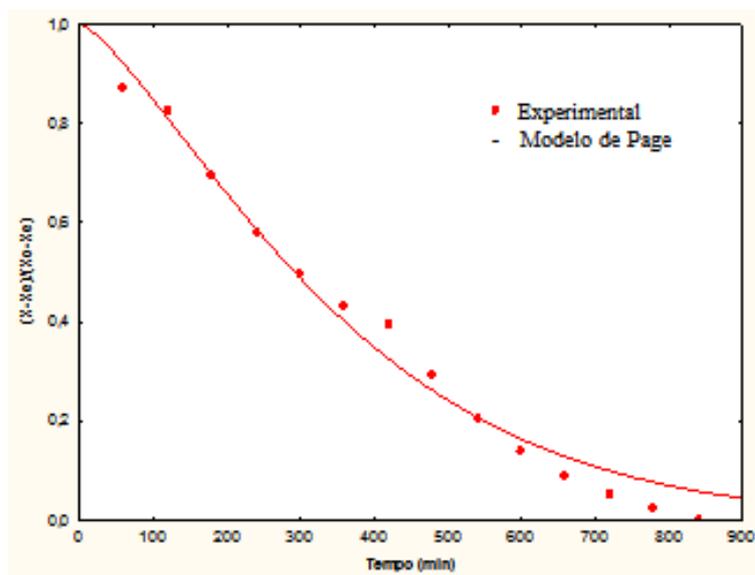
Como a área de incidência da irradiação solar sobre a cobertura transparente é 1 m^2 e a média da intensidade da irradiação solar incidente para os dias 25 e 26 de fevereiro de 2016 foi de 720 W/m^2 , tem-se, substituindo esses valores na Equação 16, o rendimento térmico do equipamento obtido em EXP5 (η_{t5}), dado por:

$$\eta_{t5} = \frac{144,633 \text{ W}}{1 \text{ m}^2 \cdot 720 \text{ W/m}^2} \cdot 100 = 20,08\%$$

A curvas de secagem mostradas nas Figuras 4.30, 4.31 e 4.32, são obtidas através dos dados apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page.

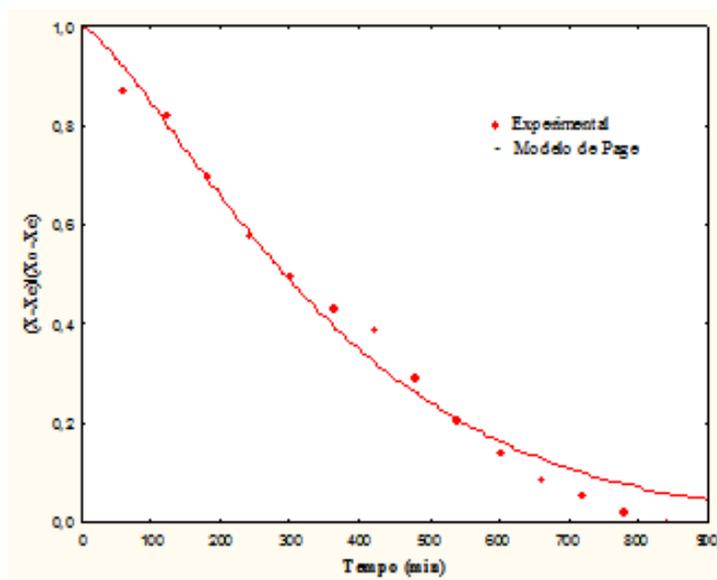
A Figura 4.30 representa a cinética de secagem da banana contida na primeira bandeja ajustado pelo modelo de Page, do experimento realizado nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016.

Figura 4.30. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, Primeira Bandeja.



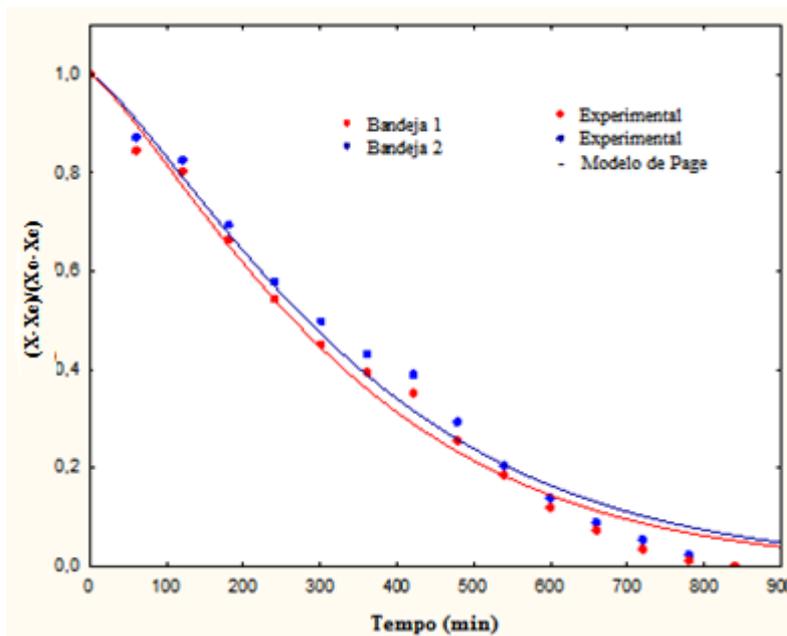
A Figura 4.31 representa a cinética de secagem da banana contida na segunda bandeja ajustado pelo modelo de Page, do experimento realizado nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016.

Figura 4.31. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, segunda bandeja.



A Figura 4.32 mostra as cinéticas de secagem das bandejas 1 e 2. Observa-se que a cinética de secagem da segunda bandeja ocorre de forma mais lenta devido ao ganho de umidade da banana da primeira bandeja

Figura 4.32. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, das bandejas 1 e 2.



Nota-se que os valores experimentais obtidos no primeiro dia do experimento se encontram acima ou próximos da linha do modelo matemático (modelo de Page), enquanto que os do segundo dia se encontram abaixo da linha. Isto indica que a taxa de secagem no primeiro dia é maior, pois no primeiro dia foram retiradas mais gramas de água da banana, enquanto no segundo dia foram retirados menos gramas de água da banana. Isto ocorre devido a facilidade de remoção da água no início do processo, quando o teor de umidade ainda está muito elevado. Observa-se também na Figura 4.32 que a cinética de secagem da segunda bandeja ocorreu de forma mais lenta devido ao ganho de umidade da banana da primeira bandeja por parte do ar de secagem o que diminui o potencial de secagem do mesmo. As discrepâncias verificadas no gráfico são devido a variação de temperatura no sistema de secagem durante o experimento. Isso ocorre em razão da intermitência da irradiação solar, e com isso, o sistema de secagem solar opera de forma variada.

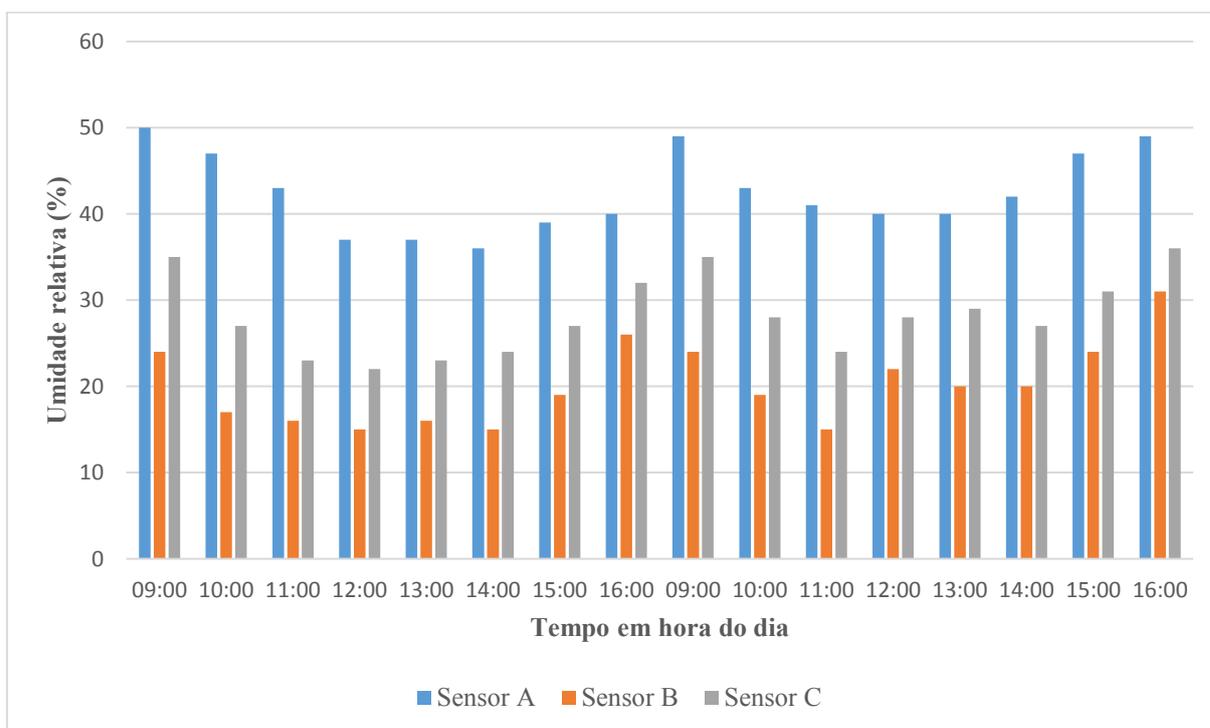
4.1.6 Experimento 6, realizado nos dias 21 e 22 de março de 2016

A realização deste experimento, nesta data, teve como objetivo observar o comportamento do sistema de secagem, exatamente um ano após a realização do experimento 2, que foi realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015. Desta forma a diferença de datas foi realmente de um ano, descontados quatro dias.

A pergunta que se colocava era: será que o rendimento térmico do sistema de secagem é exatamente o mesmo, um ano depois? Quais são os valores medidos para as principais propriedades do ar de secagem e da irradiação solar, um ano depois. A resposta está posta nos parágrafos seguintes.

Na Figura 4.33 pode se observar os valores obtidos para as umidades relativas do ar de secagem no equipamento desenvolvido. Lembrando que os sensores A, B e C estão posicionados na entrada do coletor solar (A), na junção do coletor solar com a câmara de secagem (saída/entrada) (B) e na saída da câmara de secagem (C), respectivamente.

Figura 4.33. Valores obtidos para umidade relativa do ar de secagem no secador solar nos dias 21 e 22 de março de 2016, nas posições A, B e C.



Observando-se os valores obtidos e mostrados no gráfico da Figura 4.33, percebe-se que a umidade relativa do ar de secagem na junção, obtido com o sensor B, esteve na maior parte dos testes entre 15 e 20% o que é muito importante para o processo de secagem, porque quanto menor a umidade do ar de secagem na entrada da câmara de secagem mais água esse ar vai retirar da banana, reduzindo o tempo de secagem. Foi observado que esse valor se aproxima de 30% no final do dia. Isto ocorreu porque no final dos dias, a intensidade de irradiação solar

incidente é muito baixa, com valores em torno de 200 W/m^2 . Esta situação meteorológica é uma característica particular da cidade de Campina Grande, Paraíba.

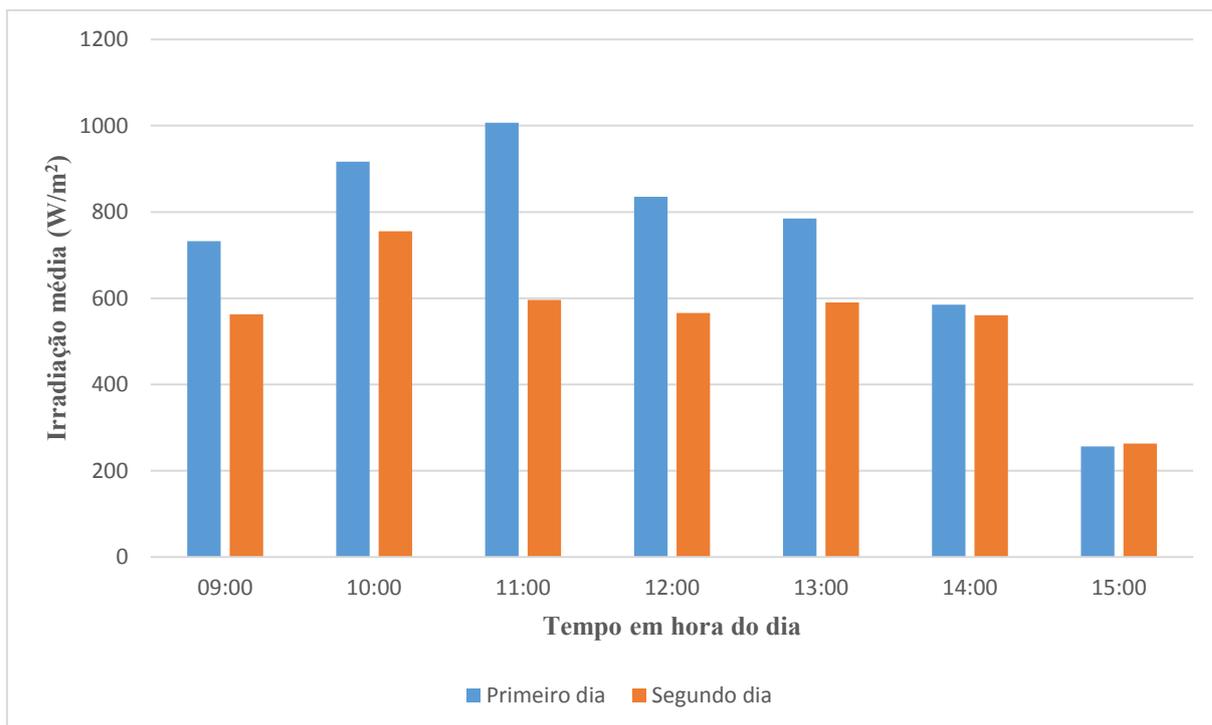
Observando o gráfico da Figura 4.33 é possível afirmar que durante os dois dias de testes, de fato, ocorreram uma significativa redução da umidade do ar de secagem no coletor solar. Isto é percebido pela diferença dos valores registrados na entrada e na saída do coletor. Isto mostra que o coletor solar foi bem projetado e que realiza muito bem suas duas funções que são reduzir a umidade relativa e aumentar a temperatura do ar de secagem.

Para os dias 21 e 22 de março de 2016, entre 9:00 h e 16:00 horas, a média de irradiação solar foi de aproximadamente, $648,15 \text{ W/m}^2$, esta média foi calculada pela nova estação meteorológica instalada no LEMT/UFCG. Lembrar que no EXP2, realizado um ano antes, essa média foi de 677 W/m^2 .

Para todos os experimentos, observou-se que o ar de secagem dentro do coletor solar e da câmara de secagem, tem uma relação direta com a intensidade de irradiação solar, o que é compatível com o resultado concluído por (FUDHOLI et al., 2010).

A Figura 4.34 mostra a curva da média da intensidade da irradiação incidente em Campina Grande, no dia 21 e 22 de março, medida pela Estação Meteorológica do LEMT/UFCG.

Figura 4.34. Intensidade média de irradiação solar medida em 21 e 22 de março de 2016 na UFCG.



A seguir, são apresentadas as Tabelas 4.11 e 4.12 com os dados de parâmetros de secagem obtidos e calculados para o experimento 6 (EXP6) nas bandejas 1 e 2.

Tabela 4.11. Dados obtidos no experimento realizado nos dias 21 e 22 de março de 2016, bandeja 1.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$
0	09:00	25,7	7,6	0,7043	2,3816	1,0000
60	10:00	23,1	7,6	0,6710	2,0395	0,8333
120	11:00	20,8	7,6	0,6346	1,7368	0,6859
180	12:00	18,9	7,6	0,5979	1,4868	0,5641
240	13:00	17,2	7,6	0,5581	1,2632	0,4551
300	14:00	16,0	7,6	0,5250	1,1053	0,3782
360	15:00	15,0	7,6	0,4933	0,9737	0,3141
420	16:00	14,3	7,6	0,4685	0,8816	0,2692
480	09:00	12,7	7,6	0,4016	0,6711	0,1667
540	10:00	11,8	7,6	0,3559	0,5526	0,1090

600	11:00	11,2	7,6	0,3214	0,4737	0,0705
660	12:00	10,9	7,6	0,3028	0,4342	0,0513
720	13:00	10,6	7,6	0,2830	0,3947	0,0321
780	14:00	10,3	7,6	0,2621	0,3553	0,0128
840	15:00	10,1	7,6	0,2475	0,3289	0,0000

Tabela 4.12. Dados obtidos no experimento realizado nos dias 21 e 22 de março de 2016, bandeja 2.

Tempo (min)	Horas	Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$
0	09:00	25,4	7,5	0,7047	2,3867	1,0000
60	10:00	23,0	7,5	0,6739	2,0667	0,8452
120	11:00	20,8	7,5	0,6394	1,7733	0,7032
180	12:00	18,9	7,5	0,6032	1,5200	0,5806
240	13:00	17,3	7,5	0,5665	1,3067	0,4774
300	14:00	16,0	7,5	0,5313	1,1333	0,3935
360	15:00	14,8	7,5	0,4932	0,9733	0,3161
420	16:00	14,3	7,5	0,4755	0,9067	0,2839
480	09:00	12,6	7,5	0,4048	0,6800	0,1742
540	10:00	11,7	7,5	0,3590	0,5600	0,1161
600	11:00	11,1	7,5	0,3243	0,4800	0,0774
660	12:00	10,8	7,5	0,3056	0,4400	0,0581
720	13:00	10,4	7,5	0,2788	0,3867	0,0323
780	14:00	10,1	7,5	0,2574	0,3467	0,0129
840	15:00	9,9	7,5	0,2424	0,3200	0,0000

Para este experimento, observa-se que o teor de umidade inicial da banana era de aproximadamente 70,43 % e 70,47% e que, depois de 14 (quatorze) horas de secagem, o teor de umidade final em base úmida foi de 24,75 e 24,24% nas bandejas 1 e 2, respectivamente.

Logo, substituindo-se os valores obtidos no experimento 6, na Equação 30, tem-se a eficiência mássica do processo de secagem obtida para o experimento 6 (η_{p6}), dada por:

$$\eta_{p6} = \frac{25,7 - 10,1}{18,1} = 86,19\%$$

Essa elevada eficiência do processo demonstra que com o uso da energia solar é possível obter eficiência mássica de processo de secagem equivalente a de situação onde a secagem ocorre com o uso da eletricidade ou GLP. Lembrar que no EXP2, realizado um ano antes, o valor obtido para essa eficiência mássica foi de 86,89%

Para calcular o rendimento térmico do equipamento utilizando apenas os dados de temperatura, como feito nos experimentos de 1 a 4, e as Equações 14 e 17. Para o experimento 6, a Equação 17 tem os seguintes valores:

$$\dot{m}_1 = 0,01071 \text{ kg/s}$$

$$c_p = 1,0048 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\overline{\Delta T_{7-2}} = 14 \text{ K}$$

Substituindo os valores obtidos na Equação 17, a potência útil para E6 (P_{u6}) é dada por:

$$P_{u6} = 0,01071 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0048 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 14 \text{ K} = 0,150659 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 150,659 \text{ W}$$

Como a área de incidência da irradiação solar sobre a cobertura transparente é 1 m^2 e a média da intensidade da irradiação solar para os dias 21 e 22 de março de 2016 foi de $648,15 \text{ W/m}^2$, tem-se, substituindo esses valores na Equação 16, o rendimento térmico do equipamento obtido em EXP6 (η_{t6}), dado por:

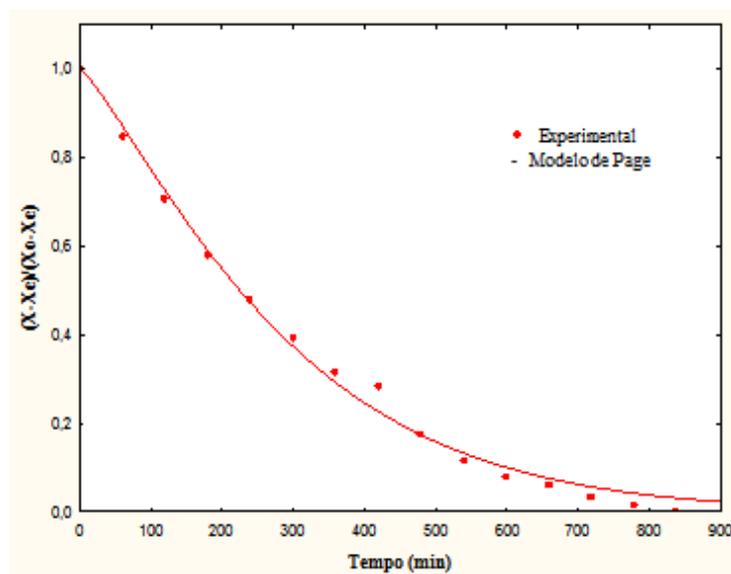
$$\eta_{t6} = \frac{150,659 \text{ W}}{1 \text{ m}^2 \cdot 648,15 \text{ W/m}^2} \cdot 100 = 23,24\%$$

Lembrar que no EXP2, realizado um ano antes, o valor obtido foi de 20,93%. Observa-se que em 2015 e 2016, os resultados obtidos são muito próximos. A reprodutibilidade desses resultados demonstra que o equipamento realiza com qualidade suas funções e as mantém ao longo do tempo. Estudos mais demorados, e de longa duração, com 10 ou 20 e mais anos devem ser realizados para observar o ciclo de vida desse tipo de secador solar.

A curvas de secagem mostradas nas Figuras 4.35, 4.36 e 4.37, são obtidas através dos dados apresentados na Tabela 4.9, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page.

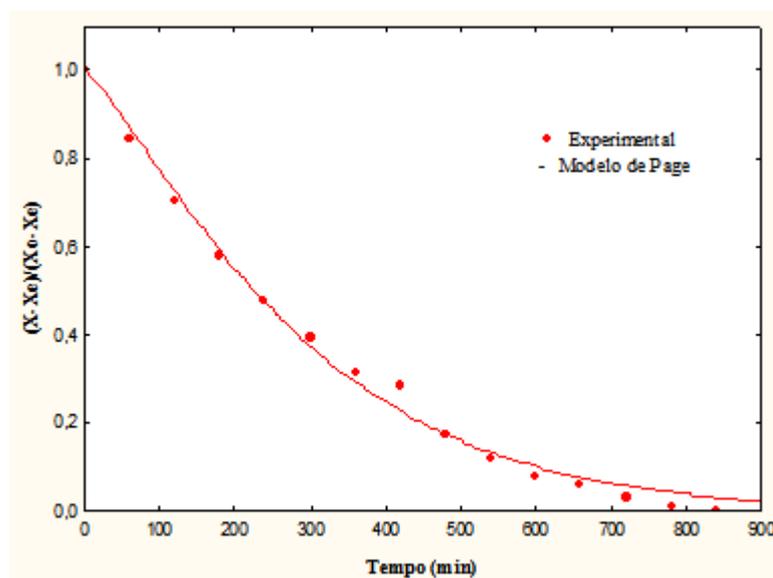
A Figura 4.35 representa a cinética de secagem da primeira bandeja ajustado pelo modelo de Page, do experimento realizado nos dias 21 e 22 de março de 2016.

Figura 4.35. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, primeira bandeja.



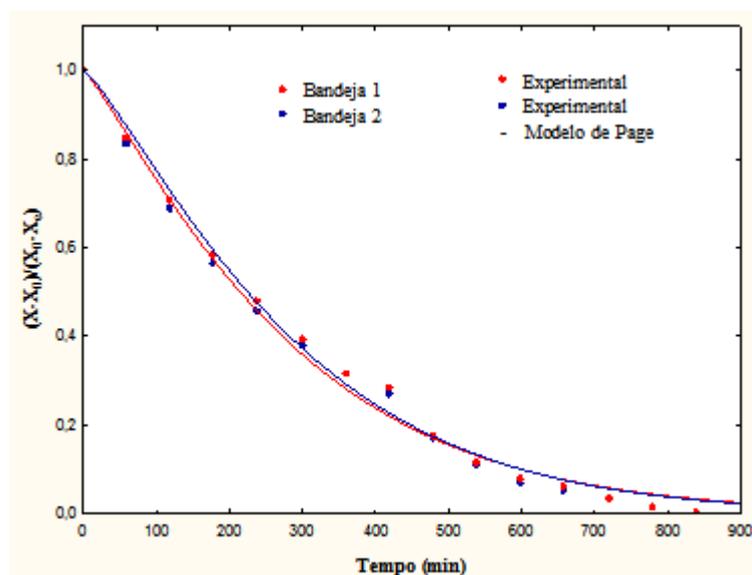
A Figura 4.36 representa a cinética de secagem da primeira bandeja ajustado pelo modelo de Page, do experimento realizado nos dias 21 e 22 de março de 2016.

Figura 4.36. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, segunda bandeja.



A Figura 4.37 mostra as cinéticas de secagem das bandejas 1 e 2. Observa-se que a cinética de secagem da segunda bandeja ocorre de forma mais lenta devido ao ganho de umidade da banana da primeira bandeja

Figura 4.37. Cinética de secagem ajustado pelo modelo de Page, das bandejas 1 e 2.



Nota-se que os valores experimentais obtidos no primeiro dia do experimento se encontram acima ou próximos da linha do modelo matemático (modelo de Page), enquanto que os do segundo dia se encontram abaixo da linha. Isto indica que a taxa de secagem no primeiro

dia é maior, pois no primeiro dia foram retiradas mais gramas de água da banana, enquanto no segundo dia foram retirados menos gramas de água da banana. Isto ocorre devido a facilidade de remoção da água no início do processo, quando o teor de umidade ainda está muito elevado. Observa-se também na Figura 4.37 que a cinética de secagem da segunda bandeja ocorreu de forma mais lenta devido ao ganho de umidade da banana da primeira bandeja por parte do ar de secagem o que diminui o potencial de secagem do mesmo. As discrepâncias verificadas no gráfico são devido a variação de temperatura no sistema de secagem durante o experimento. Isso ocorre em razão da intermitência da irradiação solar, e com isso, o sistema de secagem solar opera de forma variada.

As Figuras 4.38, 4.39 e 4.40 representam a taxa de secagem dos experimentos 1, 2 e 6. A Figura 4.38 representa a taxa de secagem do experimento 1 realizado sem o auxílio de um *cooler* com um tempo de secagem em torno de 22 horas. A partir do experimento 2, o *cooler* já estava instalado e acionado por um mini painel fotovoltaico de 12 V. A Figura 4.39 representa a taxa de secagem do experimento 2 com um tempo de secagem em torno de 16 (dezesesseis) horas e a Figura 4.40 representa a taxa de secagem do experimento 6, com um tempo de secagem em torno de 14 horas.

A Figura 4.38 representa a taxa de secagem do experimento 1. A Figura 4.39 representa a taxa de secagem dos experimentos 2, 3 e 4, pois os experimentos foram realizados em 16 horas. Já a Figura 4.40 representa a taxa de secagem dos experimentos 5 e 6, realizados em 14 (catorze) hora

Figura 4.38. Taxa de secagem do experimento realizado nos dias 12, 13 e 14 de março de 2015 no LEMT/UFCCG.

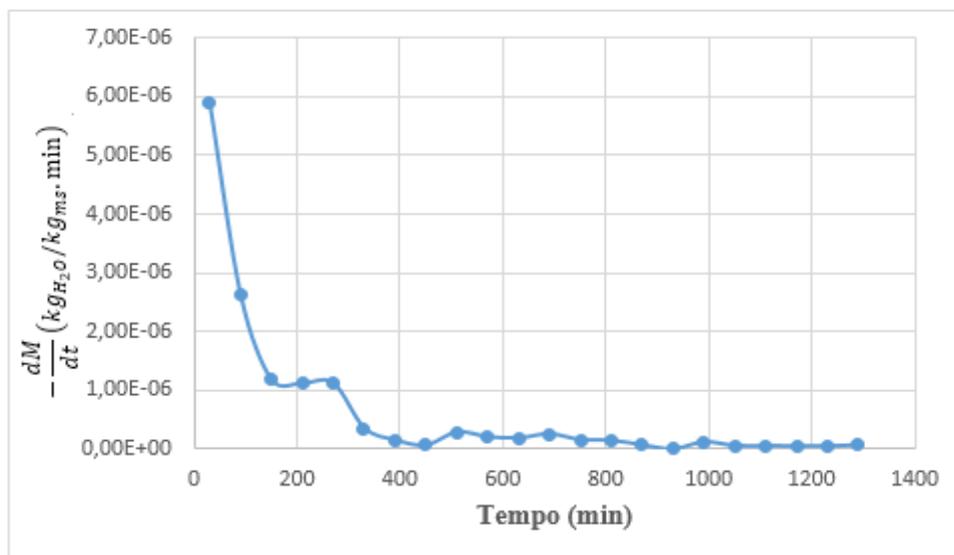


Figura 4.39. Taxa de secagem do experimento realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015 no LEMT/UFCCG.

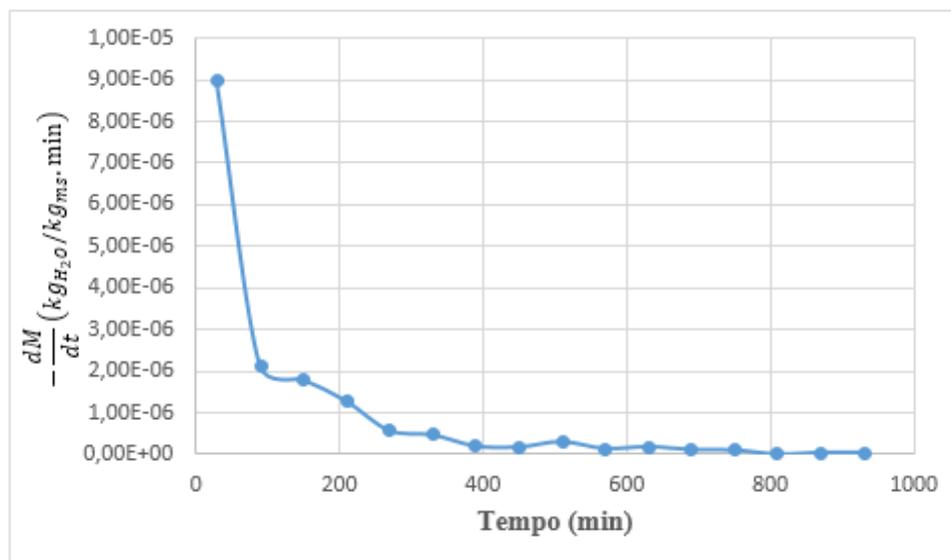
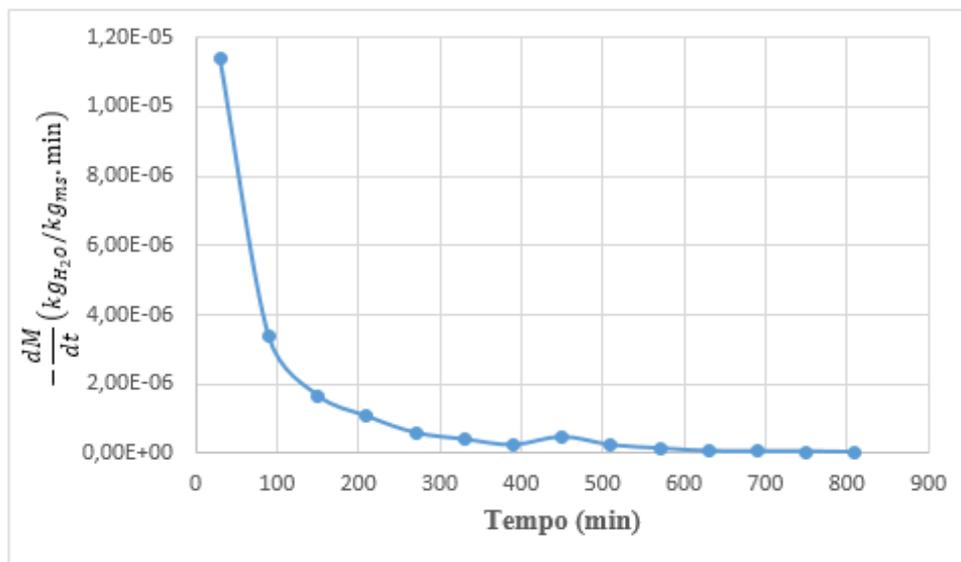


Figura 4.40. Taxa de secagem do experimento realizado nos dias 21 e 22 de março de 2016 no LEMT/UFCCG.



Observou-se que a taxa de secagem da banana prata (*Musa spp.*) para todos os experimentos, ocorreu exclusivamente no período de taxa decrescente, Figuras 4.38, 4.39 e 4.40. Este resultado é compatível com os trabalhos de Rodrigues (2014), Farias (2011) e Lima (1999). O que viabiliza o uso do modelo matemático empírico de Page, Equação (1).

Ao término dos experimentos, foi observado o aspecto visual do produto final obtido, no caso a banana-passa, e realizada uma degustação. Na Figura 4.41 é apresentada uma foto da banana-passa.

Figura 4.41. Banana passa obtida em um dos experimentos.



4.2 Análise energética

Para realizar a análise energética do sistema de secagem, fez-se necessário calcular as propriedades do ar de secagem (temperatura e umidade relativa) das componentes do secador solar (coletor solar e câmara de secagem), essas propriedades foram medidas em vários pontos do secador solar. Com o uso do CATT, encontrou-se as entalpias nas entradas e saídas do coletor solar e da câmara de secagem.

4.2.1 Eficiência do secador solar no EXP5.

Eficiência térmica do coletor solar

A vazão do ar de secagem, medida na entrada e na saída do coletor solar é dada por:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = 0,01071 \frac{kg}{s}$$

Lembrando que:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{\text{água da retina da banana}} = (0,010714 + 3,021 \times 10^{-6}) kg/s$$

$$\dot{m}_{\text{água retirada da banana}} = \frac{(0,6 \times 0,3 kg)}{(3600 \times 14)s} = 3,57 \times 10^{-6} kg/s$$

Com os dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem medidos, encontra-se a entalpia. Dados por:

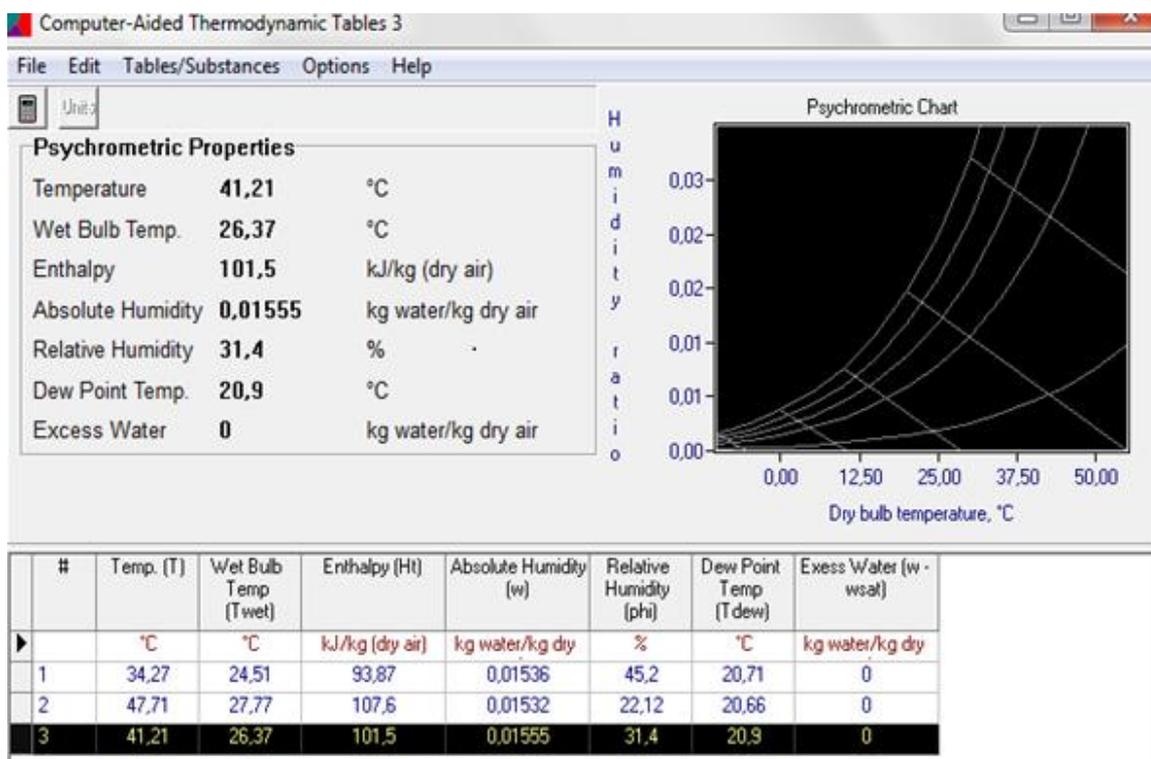
$$h_v = 2.578,75 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Moran e Shapiro, 2009})$$

$$h_2 = 107,6 \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 = 93,87 \text{ kJ/kg}$$

Onde h_1 e h_2 são as entalpias de entrada e saída do coletor solar, calculadas pelo *Computer Aided Thermodynamic Tables (CATT)*, entrando apenas com os dados medidos da temperatura e umidade relativa do ar. O CATT, mostrado na Figura 4.42, apresenta como resultado os valores de entalpia e as demais propriedades termodinâmicas resultantes das medições realizadas.

4.42. Dados das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, obtidos com uso do CATT, experimento 5.



A Equação 21, resultado da aplicação da primeira lei da termodinâmica ao volume de controle aplicado do coletor solar, mostrado na Figura 3.32, tem a forma de:

$$\eta_{coletor} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{m}(h_2 - h_1)}{\dot{Q}_{solar}}$$

Substituindo os valores obtidos, na Equação 21, tem-se:

$$\eta_{coletor} = \frac{0,01071 \frac{kg}{s} (107,6 - 93,87) \frac{kJ}{kg}}{1. m^2 \times 720 \frac{W}{m^2}} = \frac{0,01071 \times 13,73 \frac{kJ}{s}}{720 W}$$

$$\eta_{coletor} = \frac{0,14705 kJ/s}{720 W} = \frac{147,0483 W}{720 W} = 0,2042$$

$$\eta_{coletor} = 20,42\%$$

Eficiência térmica da câmara de secagem

A Equação 27, é obtida como resultado da aplicação da segunda lei da termodinâmica ao volume de controle aplicado na câmara de secagem, mostrado na Figura, 3.33, tem a forma de:

$$\eta_{câmara} = \frac{\dot{m}_4 h_4 + \dot{E}_b}{\dot{m}_3 h_3}$$

Substituindo os valores obtidos, mostrados na Figura 4.42 chega-se a:

$$\eta_{câmara} = \frac{\dot{m}_4 h_4 + \dot{E}_b}{\dot{m}_3 h_3} = \frac{0,010713 \frac{kg}{s} \times 101,5 \frac{kJ}{kg} + 7,789973 \times 10^{-3} kJ/s}{0,01071 \frac{kg}{s} \times 107,6 \frac{kJ}{kg}}$$

Onde h_3 e h_4 são as entalpias de entrada e saída do ar na câmara de secagem, calculadas pelo CATT.

$$h_3 = 107,6 kJ/kg$$

$$h_4 = 101,5 kJ/kg$$

$$\dot{E}_b = h_v \dot{m}_{\text{água retirada da banana}} = 7,789973 \times 10^{-3} kJ/s$$

$$\eta_{c\grave{a}mara} = \frac{1,087369 \frac{kJ}{s} + 7,789973 \times 10^{-3} kJ/s}{1,152396 \frac{kJ}{s}} = \frac{1,095159 \frac{kJ}{s}}{1,152396 \frac{kJ}{s}}$$

$$\eta_{c\grave{a}mara} = 0,9503$$

$$\eta_{c\grave{a}mara} = 95,03\%$$

Eficiência térmica do secador solar:

A Equação 29, é obtida como resultado da aplicação da segunda lei da termodinâmica ao volume de controle aplicado no secador solar, Figura 3.34, tem a forma de:

$$\eta_{secador\ solar} = \eta_{coletor} \times \eta_{c\grave{a}mara}$$

Substituindo os valores de rendimento, já calculados para o coletor solar e para câmara de secagem, tem-se:

$$\eta_{secador\ solar} = 0,2042 \times 0,9503 = 0,1940$$

$$\eta_{secador\ solar} = 19,40\%$$

4.2.2 Eficiência do secador solar no EXP6.

Eficiência térmica média do coletor solar

A vazão do ar de secagem, medida na entrada e na saída do coletor solar é dada por:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = 0,01071 \frac{kg}{s}$$

Lembrando que:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{\acute{a}gua\ da\ banana} = (0,01071 + 3,021 \times 10^{-6})kg/s$$

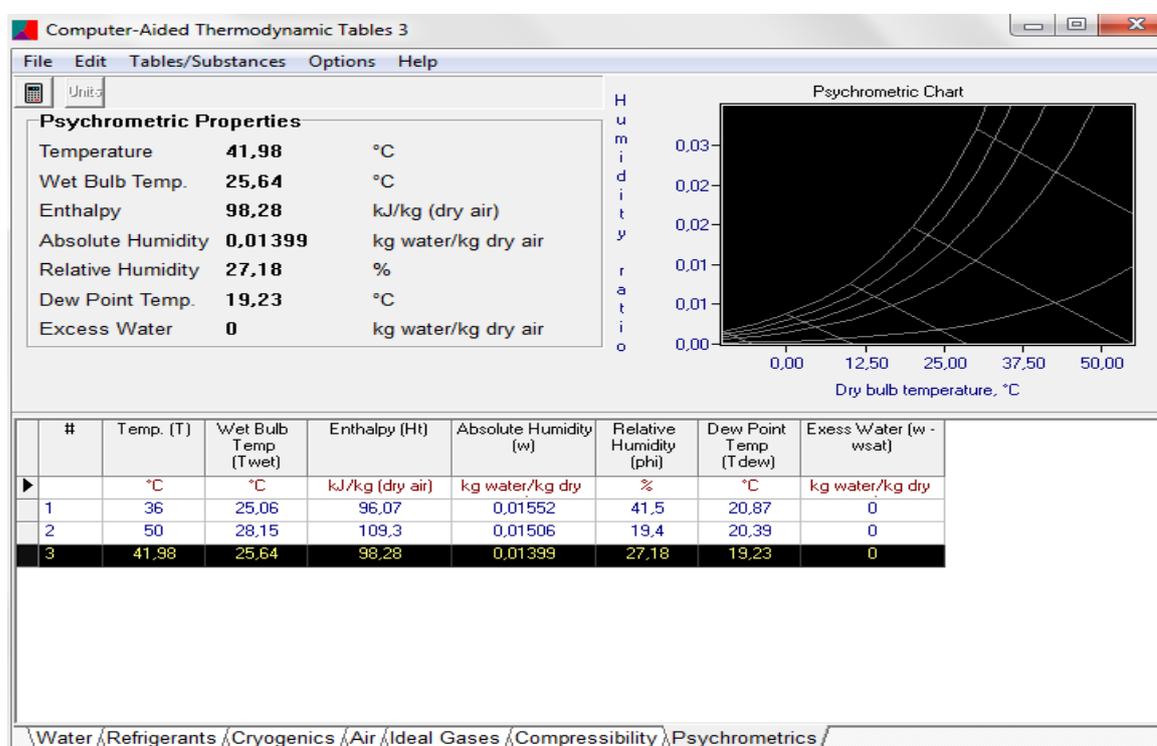
$$\dot{m}_{\text{água retirada da banana}} = \frac{(0,6 \times 0,3 \text{ kg})}{(3600 \times 16)\text{s}} = 3,125 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$$

$$h_v = 2578,75 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Moran e Shapiro, 2009})$$

$$h_2 = 109,3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 = 96,07 \text{ kJ/kg}$$

4.43. Dados das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, obtidos com uso do CATT, experimento 6.



onde h_1 e h_2 são as entalpias de entrada e saída do coletor solar, calculadas pelo CATT, entrando apenas com os dados da temperatura e umidade relativa do ar, são obtidas no CATT as demais propriedades termodinâmicas desses dois estados, como mostrado na Figura 4.43.

A Equação 21, é obtida como resultado da aplicação da segunda lei da termodinâmica ao volume de controle aplicado do coletor solar, mostrado na Figura 3.32, tem a forma de:

$$\eta_{coletor} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{m}(h_2 - h_1)}{\dot{Q}_{solar}}$$

Substituindo os valores obtidos, na Equação 21, tem-se:

$$\eta_{coletor} = \frac{0,01071 \frac{kg}{s} (109,3 - 96,07) \frac{kJ}{kg}}{1 m^2 \times 648,15 \frac{W}{m^2}} = \frac{0,01071 \times 13,23 \frac{kJ}{s}}{648,15 W}$$

$$\eta_{coletor} = \frac{0,1416933 kJ/s}{648,15 W} = \frac{141,6933 W}{648,15 W} = 0,2186$$

$$\eta_{coletor} = 21,86\%$$

Observa-se que o rendimento térmico obtido a partir dos dados de medição da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem, na entrada e na saída do coletor solar é ligeiramente diferente do rendimento térmico obtido quando se aplica a equação geral de rendimento térmico para coletor solar, neste caso, 21,86% contra 23,24%. Essa diferença de pouco mais de 1% entre as duas metodologias, reforça a certeza de que os valores obtidos representam de fato o que ocorre no coletor solar, sendo que o valor menor representa o rendimento térmico real medido no equipamento.

Eficiência térmica da câmara de secagem

A Equação 27, é obtida como resultado da aplicação da segunda lei da termodinâmica ao volume de controle aplicado na câmara de secagem, mostrado na Figura, 3.27, tem a forma de:

$$\eta_{câmara} = \frac{\dot{m}_4 h_4 + \dot{E}_b}{\dot{m}_3 h_3}$$

Substituindo os valores obtidos, mostrados na Figura 4.43 chega-se a:

$$\eta_{câmara} = \frac{\dot{m}_4 h_4 + \dot{E}_b}{\dot{m}_3 h_3} = \frac{0,010713 \frac{kg}{s} \times 98,28 \frac{kJ}{kg} + 8,058594 \times 10^{-3} kJ/s}{0,01071 \frac{kg}{s} \times 109,3 \frac{kJ}{kg}}$$

Onde h_3 e h_4 são as entalpias de entrada e saída do ar na câmara de secagem, calculadas pelo CATT.

$$h_3 = 109,3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 98,28 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{E}_b = h_v \dot{m}_{\text{água da banana}} = 7,789973 \times 10^{-3} \text{ kJ/s}$$

$$\eta_{câmara} = \frac{1,052874 \frac{kJ}{s} + 8,058594 \times 10^{-3} kJ/s}{1,170603 \frac{kJ}{s}} = \frac{1,095159 \frac{kJ}{s}}{1,170603 \frac{kJ}{s}}$$

$$\eta_{câmara} = 0,9063$$

$$\eta_{câmara} = 90,63\%$$

Eficiência térmica do secador solar:

A Equação 29, é obtida como resultado da aplicação da segunda lei da termodinâmica ao volume de controle aplicado no secador solar, mostrado na Figura, 3.34, tem a forma de:

$$\eta_{\text{secador solar}} = \eta_{\text{coletor}} \times \eta_{câmara}$$

Substituindo os valores de rendimento, já calculados para o coletor solar e para câmara de secagem, tem-se:

$$\eta_{\text{secador solar}} = 0,2186 \times 0,9063 = 0,1981$$

$$\eta_{\text{secador solar}} = 19,81\%$$

Nos experimentos 5 e 6 foi possível obter o rendimento para o sistema de secagem completo que inclui o coletor solar e a câmara de secagem. Os valores obtidos 19,40% no EXP5 e 19,81% no EXP6 mostram que os resultados estão dentro das expectativas para este tipo de sistema de secagem.

4.2.3 Rendimento médio do equipamento

Para os cálculos dos rendimentos do coletor solar, experimentos de 1 a 4, foi feita uma média das temperaturas do ar de secagem na entrada e na saída do coletor solar, conforme Equação 32.

$$\bar{T} = \frac{\sum T}{n} \quad (32)$$

onde,

n = representa o número de horas de secagem;

T = representa a temperatura de cada hora do dia;

\bar{T} = representa a média das temperaturas ao longo do dia.

Portanto, na Tabela 4.13 estão alguns parâmetros das condições de secagem encontradas em cada processo.

Tabela 4.13. Parâmetros de Secagem.

Experimentos	Datas do Processo	\bar{R}_{med} [W/m ²]	$\bar{T}_{ent.col}$ [°C]	$\bar{T}_{sai.col}$ [°C]	$\bar{\Delta T}$ [°C]	\bar{V}_{ar} [m/s]
1	12 a 15 / 03 / 2015	607	45,18	34,68	10,50	0,320
2	26 a 27 / 03 / 2015	677	49,44	35,83	13,17	0,360
3	28 a 29 / 04 / 2015	565	45,41	35,41	10,00	0,360
4	26 a 27 / 05 / 2015	595	47,47	35,00	12,47	0,360
5	25 a 26 / 02 / 2016	720	47,71	34,27	13,44	0,360
6	21 e 22 / 03 / 2016	648	51,00	36,00	14,00	0,360

Na Tabela 4.14 estão os dados referentes às propriedades do ar de secagem.

Tabela 4.14. Propriedade do ar de secagem.

Parâmetro	Valor	Unidade
Massa específica	1,2754	kg/m ³
Calor Específico	1,0048	kJ/kg.K

Dessa forma, tem-se, na Tabela 4.15, os valores referentes à potência transferida ao fluido de trabalho durante cada processo e, por conseguinte, o rendimento térmico do equipamento.

Tabela 4.15. Potência útil e rendimento do coletor solar para cada processo.

Experimentos	Datas do Processo	$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$ [W]	$\eta_t = \frac{P_u}{A_1 \cdot \bar{G}} \cdot 100$ [%]
1	12 a 15 / 03 / 2015	103,394	17,03
2	26 a 27 / 03 / 2015	141,728	20,93
3	28 a 29 / 04 / 2015	107,614	19,05
4	26 a 27 / 05 / 2015	134,195	22,55
5	25 a 26 / 02 / 2016	144,633	20,00
6	21 a 22 / 03 / 2016	150,659	23,24

A Tabela 4.16 mostra as eficiências térmicas (reais) do coletor solar, da câmara de secagem e, portanto, do secador solar dadas pelas Equações 18, 24 e 26, respectivamente.

Tabela 4.16. Eficiências térmicas do coletor solar, da câmara de secagem e do secador solar.

Experimentos	$\eta_{coletor}$ %	$\eta_{câmara}$ %	$\eta_{secador solar}$ %
EXP5	20,42	95,03	19,40
EPX6	21,86	90,63	19,81

Observa-se que os valores obtidos para a média dos rendimentos térmicos, calculada pelas Equações 18 e 13 respectivamente, do coletor solar é, de aproximadamente, 20%. Isto demonstra que as duas metodologias de cálculo levam a valores equivalentes e, portanto, são aceitas. No caso do rendimento do total do secador solar, que só é possível ser obtido quando são medidas as temperaturas e umidade relativa do ar na entrada e saída de cada componente,

a média desse rendimento, é de aproximadamente 19,60%. Portanto, um rendimento compatível com os equipamentos similares relatados na literatura, que segundo, Hubackova et al. (2014), Fudholi et al. (2014), Madhlopa e Ngwalo (2007) e Joshi et al. (2005), a eficiência térmica para secadores solares situa-se entre 12 e 20%.

4.2.4 Eficiência mássica da secagem

Pode-se inferir que a eficiência média dos processos de secagem é calculada como sendo a média das eficiências dos processos em cada secagem, de modo que se tem:

$$\overline{\eta_p} = \frac{\sum \eta_p}{n} \quad (33)$$

onde,

$\overline{\eta_p}$ = representa a média da eficiência dos processos.

Na Tabela 4.17 estão os dados de teor de umidade alcançados (X_{buf}), bem como, as massas inicial e final dos produtos em cada processo de secagem com suas respectivas massas de água e, conseqüentemente, a eficiência de cada processo de secagem.

Tabela 4.17. Resumo das eficiências mássica dos processos de secagem.

Experimentos	Datas do Processo	X_{buf} [%]	$m_{inicial}$ [g]	m_{final} [g]	m_{H_2O} [g]	η_p [%]
1	12 a 15 / 03 / 2015	22,73	66,0	22,0	48,84	89,80
2	26 a 27 / 03 / 2015	23,53	87,0	34,0	60,90	87,03
3	28 a 29 / 04 / 2015	28,57	126,0	56,0	85,68	81,07
4	26 a 27 / 05 / 2015	21,95	94,0	41,0	63,36	86,81
5	25 a 26 / 02 / 2016	23,58	29,6	12,3	20,13	86,00
6	21 a 22 / 03 / 2016	24,25	25,7	10,1	18,00	86,19

Observa-se que, a média da eficiência mássica dos processos de secagem realizados no secador solar de frutas com aproveitamento multienergético é de, aproximadamente, 86,15%. Portanto, o equipamento proposto apresenta uma eficiência mássica elevada para o processo de secagem, o que demonstra sua operacionalidade funcional.

4.2.5 Correlação estatística para os ajustes das cinéticas de secagem

Para verificação da significância da correlação obtida entre os valores preditos e os valores obtidos experimentalmente faz-se necessário analisar os valores encontrados como coeficientes de correlação (R^2). Na Tabela 4.18 são apresentados os valores de R^2 para cada experimento em função do modelo matemático adotado para equação da cinética de secagem.

Tabela 4.18. Resumo dos parâmetros e coeficientes de correlação obtidos para cada experimento, ajustado pelo modelo de Page.

Experimentos	Bandeja 1			Bandeja 2		
	n	k	R^2 [%]	n	k	R^2 [%]
1	1,1616	0,0006	99,38	1,14129	0,0007	99,38
2	1,1775	0,0009	99,69	1,2238	0,0007	99,74
3	1,2061	0,0007	99,11	1,1981	0,0007	99,23
4	1,2552	0,0005	99,04	1,2548	0,0005	99,19
5	1,2604	0,0006	99,33	1,2754	0,0005	99,22
6	1,1682	0,0013	99,66	1,2221	0,0009	99,68

Segundo Rodrigues e Iemma (2009), para que uma equação possa ser utilizada na predição de um processo, o coeficiente de correlação deve ser superior a 95%. Portanto, o modelo matemático analisado serve para prever o momento no qual o processo atinge o teor de umidade desejado. O modelo matemático de Page apresentou uma significância estatística, acima de 99% e, portanto, o modelo é recomendado para análise do processo de secagem de banana para o secador solar de frutas desenvolvido.

4.2.6 Análise de investimentos

Os custos referentes à fabricação de um equipamento levam em consideração o valor pago pelos materiais utilizados mais o valor cobrado pela mão-de-obra realizada por um profissional qualificado.

Na Tabela 4.19 são apresentados os valores gastos com cada material, bem como as quantidades necessárias e o valor pago para o profissional responsável pela confecção do equipamento, calculado como sendo, aproximadamente, 30% dos gastos com material.

Tabela 4.19. Planilha de custos para fabricação de um secador solar de frutas com aproveitamento multienergético.

Item	Unidade	Preço Unid. (R\$)	Quantidade	Valor (R\$)
MDF Ultra	m ²	40,00	4,5	180,00
Policarbonato	m ²	35,00	1,2	42,00
Telha	m ²	12,00	1	12,00
Velcro	m	1,00	8	8,00
Tela de Nylon	m ²	4,00	2	8,00
Outros Materiais	unid.	50,00	1	50,00
<i>Coolers</i>	unid.	8,00	1	8,00
Painel Fotovoltaico	unid.	65,00	1	65,00
Termopares	unid	9,00	10	90,00
			Subtotal	455,00
Mão-de-obra	≅ 50% do Subtotal			227,00
TOTAL				682,00

De acordo com a pesquisa de mercado realizada, o pacote de banana-passa com 20 g, custa, aproximadamente, R\$ 6,00 (seis reais). Como é possível obter uma produção superior a 400 g por processo, tem-se um faturamento médio de R\$ 120,00 (cem e vinte reais), a cada processo realizado. No entanto, devem-se descontar ainda o preço da matéria-prima, além do transporte e das embalagens.

Mesmo assim, pode-se estimar que o investimento na confecção de um secador solar de frutas com aproveitamento multienergético tem seu retorno garantido em menos de seis meses, com a comercialização de frutas secas. Sendo, portanto, um produto economicamente viável para implantação nos processos de produção de banana-passa.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1 Conclusões

Com os resultados apresentados, pode-se concluir que o secador solar de frutas multienergético, desenvolvido experimentalmente na UFCG e testado no processo de secagem de banana, em seis experimentos, mostrou-se compatível com os resultados esperados, funcionando plenamente e produzindo como resultado um produto final de qualidade.

O *cooler*, localizado na saída da câmara de secagem, acionado por um mini painel fotovoltaico, contribuiu na retirada do ar de secagem, promovendo a convecção forçada, garantindo um aumento na temperatura média no interior da câmara de secagem em torno de 3°C e um tempo de secagem menor, em torno de 6 horas.

O sistema de aquisição de dados usado inicialmente apenas na medição da temperatura do ar de secagem em vários pontos do secador solar, tornou possível calcular o rendimento do coletor solar. Os valores obtidos, em torno de 20%, utilizando esta metodologia de cálculo, se mostraram compatíveis com os valores relatados na literatura, para secadores solares equivalentes.

Os resultados mostraram que o modelo matemático de Page foi representativo, dados os valores elevados dos coeficientes de determinação que se aproximaram de 0,99. Com isto, é possível afirmar, com precisão, o tempo necessário para a banana atingir os valores de teor de umidade em base úmida que nesse trabalho situaram-se em torno de 25%, (valor recomendado para comercialização pela Anvisa, lei nº 272) considerando as condições médias de temperatura e umidade relativa do ar de secagem.

Observou-se que os valores obtidos para as temperaturas do ar de secagem no interior do coletor solar e no interior da câmara de secagem entre 40 - 60°C e 40 - 50°C, respectivamente, foram compatíveis com a variação da intensidade de irradiação solar, com média em torno de

635 W/m², ou seja, o ar de secagem dentro do coletor solar e da câmara de secagem, tem uma relação direta com a intensidade de irradiação solar ao longo do dia.

A obtenção de uma eficiência mássica média no processo de secagem em torno de 86,25% (em 16 horas) mostra a viabilidade técnica e operacional do equipamento, garantindo que o dimensionamento da câmara de secagem (1/3 do volume do coletor solar) foi tecnicamente importante para conseguir esses valores. Isso comprova que o secador solar, objeto desse estudo é eficiente para produção de banana passa.

O sistema de medição de temperatura e umidade relativa do ar de secagem (Arduino), garantiu a medição de temperatura e umidade relativa do ar de secagem nas entradas e saídas do coletor solar e da câmara de secagem, possibilitando a realização do balanço de energia de cada componente do secador solar, resultando no cálculo do rendimento termodinâmico do secador solar e na obtenção das outras propriedades termodinâmicas do ar de secagem. Os resultados obtidos para o rendimento térmico do sistema de secagem, utilizando esta metodologia foram em torno de 19,60% compatíveis com os descritos na literatura, que relatam rendimentos entre 12% a 20% para sistemas de secagem equivalentes que usam energia solar como fonte de energia.

Para os testes experimentais realizados no verão e outono, o secador solar mostrou-se confiável, pois, o tempo necessário para a banana atingir os valores de teor de umidade em base úmida em torno de 25%, foi de 960 minutos (16 h).

Os resultados obtidos nos experimentos com o secador solar foram compatíveis com os dados relatados na literatura, apresentando uma ligeira redução no tempo de secagem devido ao controle das propriedades do ar de secagem no interior da câmara e também ao bom dimensionamento do secador solar.

Além das conclusões já relatadas é possível afirmar que:

- O equipamento desenvolvido foi construído com materiais de baixo custo, facilmente encontrados no comércio local, como forma de garantir um equipamento que possa ter sua tecnologia disseminada e que atenda à demanda dos produtores da região.

- Sua operação e manutenção foram executadas sem necessidade de ações de elevada complexidade, o que comprovam sua facilidade de construção e operação, tornando-o uma tecnologia apropriada para inserção no ambiente comercial.
- Os investimentos com a manutenção e operação do sistema de secagem dizem respeito, simplesmente, à degradação natural dos seus componentes. Tendo sua viabilidade econômica demonstrada com um tempo de retorno do investimento em torno de seis meses de comercialização de frutas secas.
- A desvantagem observada é que a energia solar é uma fonte de energia intermitente, o que dificulta a realização do processo de secagem durante os períodos de chuva e durante a noite. É possível concluir que isto só será resolvido com a utilização de um secador híbrido.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para futuras pesquisas pode-se citar:

- Realizar testes experimentais que contemple as diversas estações do ano: inverno, primavera, verão e outono, para observar a influência dos dados meteorológicos locais no desempenho do sistema de secagem.
- Realizar testes experimentais, em outras localidades do Brasil, que contemple as diversas estações do ano: inverno, primavera, verão e outono, para observar a influência dos dados meteorológicos locais no desempenho do sistema de secagem.
- Realizar testes experimentais para observar a influência dos dados meteorológicos locais no desempenho do sistema de secagem para outros produtos.
- Realizar estudos demorados e de longa duração para observar o ciclo de vida desses sistemas de secagem solar.

REFERÊNCIAS

ALONSO, Luís Felipe Toro. **Algoritmo de seleção e dimensionamento de secadores**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP, 241p, 2001.

Al-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.163-70, 2007.

ANDRADE, Édira Castelo Branco. **Análise de alimentos: uma visão química da nutrição**. São Paulo: Livraria Varela, 238p, 2006.

ANDREUCCETTI, C.; FERREIRA, M. D.; MORETTI, C. L.; HONÓRIO, S. L. Qualidade pós-colheita de frutos de tomate cv. Andréa tratados com etileno. **Horticultura Brasileira**. v. 25, n.(1), p. 122-126, 2007.

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

BARBOSA, José Rui Peres. **Estudo da viabilidade de uso de secadores solares fabricados com sucatas de luminárias**. Natal, RN. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 69p. 2011.

BORGES, S. V., MANCINI, M. C., CORRÊA, J. L. G., LEITE, J. Secagem de bananas prata e d'água por convecção forçada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas, SP, v. 30, n.(3), p.605-612, 2010.

BRASIL. **Resolução RDC nº 272/05 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária**. Aprova o Regulamento Técnico para Produtos de Vegetais, Produtos de Frutas e Cogumelos Comestíveis. Diário Oficial: Brasília, 23 de set. 2005.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C. W. **Drying and storage of grain and oilseeds**. The AVI Publishing, New York, 450p, 1992.

CANO-CHAUCA, M., RAMOS, A. M., STRINGHETA, P. C., MARQUES, J. A., SILVA, P. I. **Curvas de secagem e avaliação da atividade de água da banana passa**. Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, v.22, n.1, p.121-132, 2004.

CAVALCANTI-MATA, M. E. R. M, DUARTE, M. E. M, ALMEIDA, F. A. C. **Secagem de sementes**. In: Francisco de Assis Cardoso Almeida; Maria Elita Martins Duarte; Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata. (Org.). **Tecnologia de armazenagem em sementes**. 1ª ed. Campina Grande – PB, Editado pela Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, APPA, v.1, p. 271-370, 2006.

COSTA, Antônio Raimundo da Silva. **Sistema de secagem solar para frutos tropicais e modelagem da secagem de banana em um secador de coluna estática**. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia. Natal-RN,169p, 2008.

FARIAS, Raimundo Pereira de. **Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, PB, 135p, 2011.

FERREIRA, A. G., CHARBEL, A. L. T., PIRES, R. L., SILVA, J. G., MAIA, C. B. Experimental analysis of a hybrid dryer. **Engenharia Térmica**. v.l. 6, p.03-07, 2007.

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.

FIGLIARELLI, Romeu. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária, UFPB, 229p, 2004.

FUDHOLI, A., SOPIAN, K., YAZDI, M. H., 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.

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 – 30, 2010.

GRILO, Marcelo Bezerra. **Fundamentos da energia solar: radiação solar e coletor solar plano conceitos básicos e aplicações**. Campina Grande, PB: Editora da UFCG, 2007.

GRILO, M. B., LEITE, A. P. F., ANDRADE, R. R. D., BELO, F. A. B., MEUNIER, F. Experimental thermodynamic cycles and performance analysis of a solar powered adsorptive icemaker in hot humid climate. **Renewable Energy**. v.32, p.697 - 712, 2009.

GRILO, Marcelo Bezerra; LACERDA, Angelina Farias. **Secador Solar: Cartilha para produção de banana-passa**. Campina Grande, PB: editora da EDUFCG, 10p, 2013.

GUERRA, M. I. S., VARELLA, F. K. O. M. Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo na cidade de Mossoró, RN. **Revista Holos**. Mossoró, RN, v.4, p.241-268, 2014.

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

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Rio de Janeiro**. v.26, n.(1), p. 1-83, 2013

IBRAF – Instituto Brasileiro de Frutas. **Panorama da Cadeia Produtiva das Frutas em 2012 e Projeções para 2013**. Brasília, 2013.

INCROPERA, F. P., DeWITT, D. P., BERGMAN, T. L., LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ª ed., Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos, S.A., Rio de Janeiro, 2008.

JIANG, H., ZHANG, M., MJUMDAR, A. S. Microwave Freeze-Drying Characteristics of Banana Crisps. **Drying Technology**. v.28, p.1377-1384, 2010.

JOSHI, C. B., GEWALI, M. B., BHANDARI, R. C. Performance of Solar Drying: A Case Study of Nepal. **IE(I)-Journal-ID**. v.85, p.53-57, 2005.

LIMA, Antônio Gilson Barbosa. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: Secagem de banana**. Tese, (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 244p, 1999.

LIMA, A. G. B., NEBRA, S. A., QUEIROZ, M. R. Aspectos científico e tecnológico da banana. Comunicado técnico. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, PB, v.2, n.(1), p.87-101, 2000.

LIMA, A. G. B., SILVA, E. G., SPAROVEK, G., STURION, G. L., PRECOPPE, M. F. M., MEIRA M. L. R., SPOTO, M. H. F., MORAES, S. O. **Manual de desidratação solar de frutas, ervas e hortaliças**. Série Produtor Rural – n.33. Piracicaba, SP: Universidade de São Paulo-USP, 50p, 2006.

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

MEDINA, J. C., BLEINROTH, E. W., DE MARTIN, Z. J., TRAVAGLINI, D. A., OKADA, M., QUAST, D. G., HASHIZUME, T., RENESTO, O. V., MORETTI, V. A. **Banana: da cultura ao processamento e comercialização**. São Paulo: Secretaria da Agricultura. 197p. (Série Frutas Tropicais, 3), 1978.

MELO, B., SILVA, C. A., ALVES, P. R. B. **Processamento mínimo de frutas e hortaliças**. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em <http://www.fruticultura.iciag.ufu.br/pminimo.htm>, 2005.

MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 6ª edição, Rio de Janeiro, LTC, 2009.

MUSTAPHA, M. K., SALAKO A. F., ADEMOLA, S. K., ADEFILA I. A. Qualitative performance and economic analysis flowcost solar fish driers in Sub-Saharan Africa. **J Fish**, v.2, n.(1), p.64–69, 2014.

NGUYEN, M. H., PRICE, W. E. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. **Journal of Food Engineering**. v.79, n.(1), p.200-207, 2007.

NUNES, A. G., GOMES, I. A., JÚNIOR, J. I. S., GRILO, M. B. Estudo para Determinação do Modelo Matemático Representativo de Experimentos com Secagem de Banana Usando Energia Solar e Gás Liquefeito de Petróleo. **Revista Magistra**. Ilhéus-BA, v.25, n(1),p.1-5, 2014.

ORIKASA, T., WUB, L., SHIINA, T., TAGAWA, A. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. **Journal of Food Engineering**. v.85, n.2, p.303-308, 2008.

PAN, Z., SHIH, C., MCHUGH, T. H., HIRSCHBERG, E. Study of Banana dehydration using sequential infrared radiation hearing and freeze-drying. **LTW: Food Science and Technology**. v.41, p.194-195, 2008.

PARIKH, D e AGRAWAL, G. Solar drying in hot and dry climate of Jaipur, India. **Int J Renew Energy**. v.1, n.(4), p.224–31, 2011.

PARK, K. J., COLATO, G. A., OLIVEIRA, R. A., PARK, K. J. B. **Conceitos de Processo e equipamentos de secagem**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.

PENEIRO, Júlio César de; MELO, Liliane Pimenta de; CORADI, Thiago Bilatto. Construção de 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, Nova Iguaçu, RJ, 2010.

PHOUNGCHANDANG, S., WOODS, J. L. Moisture Diffusion and Desorption Isotherms for Banana. **Journal of Food Science**, v.65, p.651-657, 2000.

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

QUINTERO, Alfredo Carlos Fernandez. **Desidratação de Abacaxi: modelos de secagem, avaliação de qualidade e efeito de embalagem**. Dissertação (Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 98p, 2007.

RODRIGUES, Andréa Fernandes. **Modelagem Matemática do Estudo Experimental das Secagens Contínua e Intermitente de Bananas**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, PB, 197p, 2015.

RODRIGUES, M. I., IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 2ª ed., São Paulo, SP, 358p, 2009.

SANTOS, J. C., SANTOS, R. S., BARROS, G. D. T., SANTOS, J. C., GURGEL, J. M., MARCONDES, F. Estudo Numérico da Cinética de Secagem em Bananas. **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2010.

SAVICKI, Darci.Luiz. **Análise numérica tridimensional e investigação experimental do comportamento térmico e hidrodinâmico de reservatórios térmicos cilíndricos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, RS, 197p, 2007.

SILVA, J. S., DONZELLES, S. M. L., CORRÊA, P. C. **Secagem de grão com energia solar**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, p.171-189, 2006.

SILVA, J. S., BERBERT, P. A., RUFATO, S., AFONSO, A. D. L. Indicadores da qualidade dos grãos. In: SILVA, J. S. (Ed.). **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, p.63-107, 2008a.

SILVA, Juarez de Sousa. Secagem e Armazenamento de Produtos Agrícolas. **Secagem e secadores**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, p.109-146, 2008.

SILVA, W. P., SILVA, C.M.D.P. S., GAMA, F.J. A., GOMES, J. P. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2013.01.003>, 2013.

SMITABHINDU, R., JANJAI., CHANKONK, V. Optimization of a solar-assisted for drying banana. **Renewable energy**. v.33, p.1523-1531, 2008.

SOUZA, L. G. M., SILVA, T. S., VIEIRA, A. P. N. B., BRITO, A. M. L., MARQUES, M. S., BATISTA, S. S. Construção de um secador solar a partir de sucatas de tambor de lixo. **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. São Luís, MA, 2012.

SOUZA, L. G. M., MOURA, P. H. O., SOUZA, L. G. V. M., SILVA, T. S., LIMA, A. S., VARELA, P. H. A. Secagem de morango com secador de exposição direta fabricado a partir de sucata de luminária. **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. São Luís, MA, 2012.

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

TRIGUEIRO, André Trigueiro. **Mundo Sustentável 2: novos rumos para um planeta em crise**. São Paulo, Editora Globo, 399p, 2012.

TUNDE-AKITUNDE, T. Y. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. **Renewable Energy**. v.36, p.2139-2145, 2011.

APÊNDICES

- Apêndice A Tabelas com os valores medidos de temperatura e umidade relativa do ar de secagem durante os experimentos EXP1, EXP2, EXP3, EXP4, EXP5, EXP6.
- Apêndice B Desenhos do protótipo com suas dimensões características.
- Apêndice C Laudo com as características físico-químicas da banana *in natura* e da banana-passa obtida.

APÊNDICE A

Tabelas com os valores medidos de temperatura e umidade relativa do ar de secagem durante os experimentos EXP1, EXP2, EXP3, EXP4, EXP5, EXP6.

Tabela A1. Distribuição de temperatura no coletor solar do primeiro experimento EXP1, realizado nos dias 12, 13 e 14 de março de 2015.

Tempo (min)	Horas	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6
0	08:00	27	30	43	39	38	38
60	09:00	32	35	53	49	56	54
120	10:00	33	38	60	57	66	58
180	11:00	34	38	60	55	69	61
240	12:00	36	40	60	57	73	63
300	13:00	35	36	49	48	58	50
360	14:00	35	36	47	47	50	44
420	15:00	33	34	40	42	44	38
480	16:00	33	33	35	36	36	34

Tempo (min)	Horas	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6
0	08:00	28	28	32	31	31	32
60	09:00	31	31	47	46	50	50
120	10:00	32	30	42	40	46	45
180	11:00	35	37	60	59	73	68
240	12:00	35	37	63	60	77	62
300	13:00	35	37	52	49	60	56
360	14:00	34	35	43	42	48	45
420	15:00	34	36	41	41	42	39
480	16:00	34	36	40	42	47	40

Tempo (min)	Horas	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6
0	08:00	29	31	50	48	51	52
60	09:00	34	34	55	55	65	64
120	10:00	35	36	62	64	77	72

180	11:00	36	36	62	62	74	69
240	12:00	36	36	62	58	76	66
300	13:00	35	37	51	51	64	54
360	14:00	35	37	44	47	56	47
420	15:00	29	28	44	52	47	46
480	16:00	33	33	48	46	56	54
540	17:00	34	36	54	53	64	61

Tabela A2. Distribuição de temperatura na câmara de secagem, temperatura ambiente e umidade relativa do experimento EXP1, realizado nos dias 12, 13 e 14 de março de 2015.

Tempo (min)	Horas	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	T. ambiente	U.R
0	08:00	34	31	30	30	27,0	64
60	09:00	46	43	39	37	28,0	40
120	10:00	51	48	43	40	28,2	45
180	11:00	52	49	43	41	28,5	43
240	12:00	50	52	45	41	29,3	44
300	13:00	45	44	39	38	28,2	45
360	14:00	40	40	40	39	29,0	54
420	15:00	37	37	36	36	28,9	52
480	16:00	34	34	33	33	28,0	54

Tempo (min)	Horas	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	T. ambiente	U.R
0	08:00	30	30	29	29	25,9	64
60	09:00	45	41	36	33	26,4	59
120	10:00	42	40	38	36	26,8	59
180	11:00	55	53	44	40	28,1	53
240	12:00	55	54	45	41	29,4	51
300	13:00	49	48	42	40	29,9	48
360	14:00	43	41	40	38	29,6	43
420	15:00	37	37	37	37	29,4	44
480	16:00	39	39	37	36	29,0	42

Tempo (min)	Horas	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	T. ambiente	U.R
0	08:00	40	38	34	33	26,8	54
60	09:00	49	48	41	37	27,1	52
120	10:00	52	55	48	42	27,9	49
180	11:00	53	53	48	43	28,9	44
240	12:00	55	54	47	43	29,5	43
300	13:00	51	49	49	42	29,9	42
360	14:00	46	45	42	41	30,1	39
420	15:00	38	36	33	31	26,6	56
480	16:00	47	44	40	37	27,6	54
540	17:00	50	48	43	40	28,1	51

Tabela A3. Distribuição de temperatura no coletor solar do experimento EXP2, realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015.

Tempo (min)	Horas	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6
0	08:00	30	28	50	47	48	51
60	09:00	35	35	59	59	65	68
120	10:00	34	35	55	57	63	68
180	11:00	37	39	63	60	76	78
240	12:00	37	44	64	63	77	77
300	13:00	37	37	64	58	74	70
360	14:00	36	39	50	53	65	59
420	15:00	35	37	40	43	51	44
480	16:00	35	32	36	36	40	38

Tempo (min)	Horas	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6
0	08:00	27	31	42	39	36	42
60	09:00	34	33	53	49	55	58
120	10:00	35	34	61	61	72	75
180	11:00	35	39	66	61	75	74

240	12:00	35	38	60	55	70	67
300	13:00	36	37	55	53	63	59
360	14:00	35	38	57	53	66	59
420	15:00	35	35	42	42	49	44
480	16:00	34	34	38	38	43	39

Tabela A4. Distribuição de temperatura na câmara de secagem, temperatura ambiente e umidade relativa do experimento EXP2, realizado nos dias 26 e 27 de março de 2015.

Tempo (min)	Horas	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	T. ambiente	U.R
0	08:00	41	38	34	33	27,5	62
60	09:00	52	49	42	38	27,6	60
120	10:00	52	50	43	38	28,1	58
180	11:00	58	58	50	45	28,8	53
240	12:00	59	58	50	44	29,4	53
300	13:00	57	55	48	45	29,8	51
360	14:00	50	50	44	42	29,9	48
420	15:00	43	42	40	39	29,9	43
480	16:00	37	37	37	37	29,6	46

Tempo (min)	Horas	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	T. ambiente	U.R
0	08:00	33	31	28	28	26,1	62
60	09:00	46	43	38	37	27,6	60
120	10:00	56	54	45	41	28,3	58
180	11:00	57	56	49	43	29,0	55
240	12:00	55	54	48	45	29,9	53
300	13:00	52	50	44	41	29,9	53
360	14:00	52	50	44	43	30,3	51
420	15:00	44	43	42	41	29,9	51
480	16:00	38	38	37	36	29,6	51

Tabela A5. Distribuição de temperatura no coletor solar do experimento EXP3, realizado nos dias 28 e 29 de abril de 2015.

Tempo (min)	Horas	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6
0	08:00	29	28	44	51	47	46
60	09:00	33	33	48	46	56	54
120	10:00	34	36	54	52	64	61
180	11:00	37	38	60	59	73	70
240	12:00	37	39	62	61	73	71
300	12:00	37	39	53	54	62	55
360	14:00	36	39	44	48	53	45
420	15:00	34	34	37	39	42	38

Tempo (min)	Horas	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6
0	08:00	26	27	35	35	34	34
60	09:00	32	33	44	44	48	48
120	10:00	34	34	49	49	51	54
180	11:00	35	36	63	58	68	61
240	12:00	35	39	60	59	71	69
300	13:00	36	35	45	45	51	49
360	14:00	37	38	47	50	57	51
420	15:00	36	39	45	49	55	50
480	16:00	36	35	38	38	40	38

Tabela A6. Distribuição de temperatura na câmara de secagem, temperatura ambiente e umidade relativa do ar do experimento EXP3, realizado nos dias 28 e 29 de abril de 2015.

Tempo (min)	Horas	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	T. ambiente	U.R
0	08:00	38	36	33	31	26,6	56
60	09:00	47	44	40	37	27,6	54
120	10:00	50	48	43	40	28,1	51

180	11:00	53	53	46	40	29,4	48
240	12:00	55	55	48	43	29,6	44
300	12:00	48	45	43	41	29,9	42
360	14:00	42	40	40	39	29,8	43
420	15:00	37	36	36	36	29,4	42

Tempo (min)	Horas	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	T. ambiente	U.R
0	08:00	31	30	29	29	25,9	63
60	09:00	42	40	37	34	26,6	58
120	10:00	48	46	42	38	27,9	56
180	11:00	52	50	45	42	29,0	52
240	12:00	55	53	47	41	29,6	50
300	13:00	46	46	44	41	29,4	45
360	14:00	46	44	42	40	29,9	44
420	15:00	45	44	41	41	29,9	44
480	16:00	37	37	37	37	29,4	44

Tabela A7. Distribuição de temperatura no coletor solar do quarto experimento EXP4, realizado nos dias 26 e 27 de maio de 2015.

Tempo (min)	Horas	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6
0	08:00	29	32	43	43	45	46
60	09:00	31	32	50	50	57	58
120	10:00	34	34	49	48	56	53
180	11:00	35	35	62	57	74	73
240	12:00	34	36	61	56	65	58
300	13:00	35	35	53	51	62	62
360	14:00	36	36	41	45	48	44
420	15:00	35	37	40	51	45	41

Tempo (min)	Horas	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6
0	08:00	27	30	44	43	42	42
60	09:00	33	34	58	65	68	66
120	10:00	34	35	61	72	67	63
180	11:00	36	37	57	54	66	63
240	12:00	36	35	49	48	57	53
300	13:00	37	34	53	48	61	60
360	14:00	38	38	49	53	64	64
420	15:00	38	39	44	48	54	50
480	16:00	36	36	38	39	41	38

Tabela A8. Distribuição de temperatura na câmara de secagem, temperatura ambiente e umidade relativa do quarto experimento EXP4, realizado nos dias 26 e 27 de maio de 2015.

Tempo (min)	Horas	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	T. ambiente	U.R
0	08:00	39	35	33	30	28,9	62
60	09:00	46	45	39	35	26,6	62
120	10:00	47	45	41	37	27,4	55
180	11:00	58	55	48	42	29,8	49
240	12:00	52	48	45	43	29,6	50
300	13:00	54	53	49	45	29,9	45
360	14:00	41	40	39	39	29,6	50
420	15:00	38	37	37	37	29,4	50

Tempo (min)	Horas	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	T. ambiente	U.R
0	08:00	36	32	29	28	26,4	64
60	09:00	54	50	44	41	28,4	55
120	10:00	55	50	47	43	29,1	48
180	11:00	52	50	46	44	29,6	44

240	12:00	48	47	45	42	29,1	43
300	13:00	52	51	47	43	29,4	41
360	14:00	52	51	46	44	29,9	39
420	15:00	46	44	44	43	29,9	39
480	16:00	37	37	37	38	29,6	43

Tabela A9. Distribuição da umidade relativa e temperatura do ar de secagem no secador solar do experimento EXP5, realizado nos dias 25 e 26 de fevereiro de 2016. Com a média dos valores da umidade relativa do ar de secagem e da temperatura medidas a cada 10 minutos.

Tempo (min)	Umidade Relativa 25 e 26/02/2016			Temperatura		
	Sensor A	Sensor B	Sensor C	Sensor A	Sensor B	Sensor C
0	55	23	39	32	46	38
10	49	22	36	34	51	40
20	42	23	36	34	46	38
30	49	20	34	32	51	41
40	49	22	34	32	47	39
50	43	23	35	35	46	38
60	38	23	33	34	47	39
70	42	23	35	32	43	38
80	55	24	35	31	43	36
90	48	24	37	32	42	36
100	37	22	34	34	47	39
110	48	23	33	34	46	39
120	49	19	30	36	54	45
130	43	20	30	36	53	43
140	36	19	31	35	47	41
150	42	21	33	34	45	39
160	55	22	33	36	47	39
170	48	17	31	37	54	45
180	38	18	29	39	53	45
190	48	18	29	37	51	43
200	49	17	28	39	54	45
210	43	17	28	40	54	45
220	36	17	27	39	53	45
230	42	18	27	40	53	45
240	55	16	26	40	57	47
250	48	18	27	40	55	46

260	37	17	26	37	54	46
270	48	17	25	39	55	47
280	49	19	26	36	52	45
290	43	19	27	37	51	45
300	36	18	26	36	51	45
310	42	20	28	34	47	43
320	55	19	27	36	51	45
330	48	19	28	35	51	44
340	37	21	29	35	47	42
350	48	21	29	34	46	42
360	49	26	33	32	39	38
370	43	27	33	32	41	38
380	36	26	35	32	40	36
390	42	27	35	31	38	35
400	55	29	36	31	38	35
410	48	29	36	31	38	35
420	37	31	38	29	35	33
430	48	36	41	28	33	32
440	49	41	57	28	35	30
450	43	38	54	30	38	31
460	36	36	52	28	38	31
470	42	36	49	31	39	32
480	55	30	44	30	42	35
490	48	29	43	32	43	35
500	37	27	42	32	45	36
510	48	21	37	35	51	41
520	49	21	35	31	49	39
530	43	23	37	34	47	39
540	36	19	31	35	55	43
550	42	20	32	32	47	41
560	55	22	31	33	49	41
570	48	17	28	36	57	46
580	37	16	27	35	55	47
590	48	17	26	36	57	47
600	49	17	25	36	57	47
610	43	16	24	36	57	49
620	36	17	25	36	55	47
630	42	17	25	35	55	47
640	55	17	25	35	55	47
650	48	18	26	36	55	46

660	37	16	25	37	57	47
670	48	16	24	36	55	48
680	49	17	25	37	55	47
690	43	17	25	36	53	47
700	37	16	24	37	55	47
710	34	16	24	34	54	47
720	55	18	26	36	53	46
730	48	17	24	39	55	47
740	37	17	23	37	55	48
750	50	19	26	37	51	46
760	49	16	24	40	57	49
770	43	17	24	36	54	47
780	40	18	25	37	51	46
790	45	20	26	35	49	45
800	46	22	27	32	46	42
810	46	23	28	33	45	41
820	55	24	29	32	39	38
830	48	26	31	32	39	38
840	44	26	31	35	43	38
850	48	24	31	33	39	38
860	50	26	32	34	39	37
870	45	24	32	33	42	38
880	43	26	32	32	38	36
890	44	29	34	30	38	35
900	45	33	35	29	34	33
910	46	34	36	30	35	33
920	47	36	38	28	33	32

Tabela A9. Distribuição da umidade relativa e temperatura do ar de secagem no secador solar do experimento EXP5, realizado nos dias 21 e 22 de março de 2016. Com a média dos valores da umidade relativa do ar de secagem e da temperatura medidas a cada 10 minutos.

Tempo (min)	Umidade Relativa 21 e 22/03/2016			Temperatura		
	Sensor A	Sensor B	Sensor C	Sensor A	Sensor B	Sensor C
0	50	18	30	35	50	41
10	47	17	30	35	50	42
20	43	17	29	37	53	43
30	37	18	29	35	53	43
40	37	17	27	35	52	43

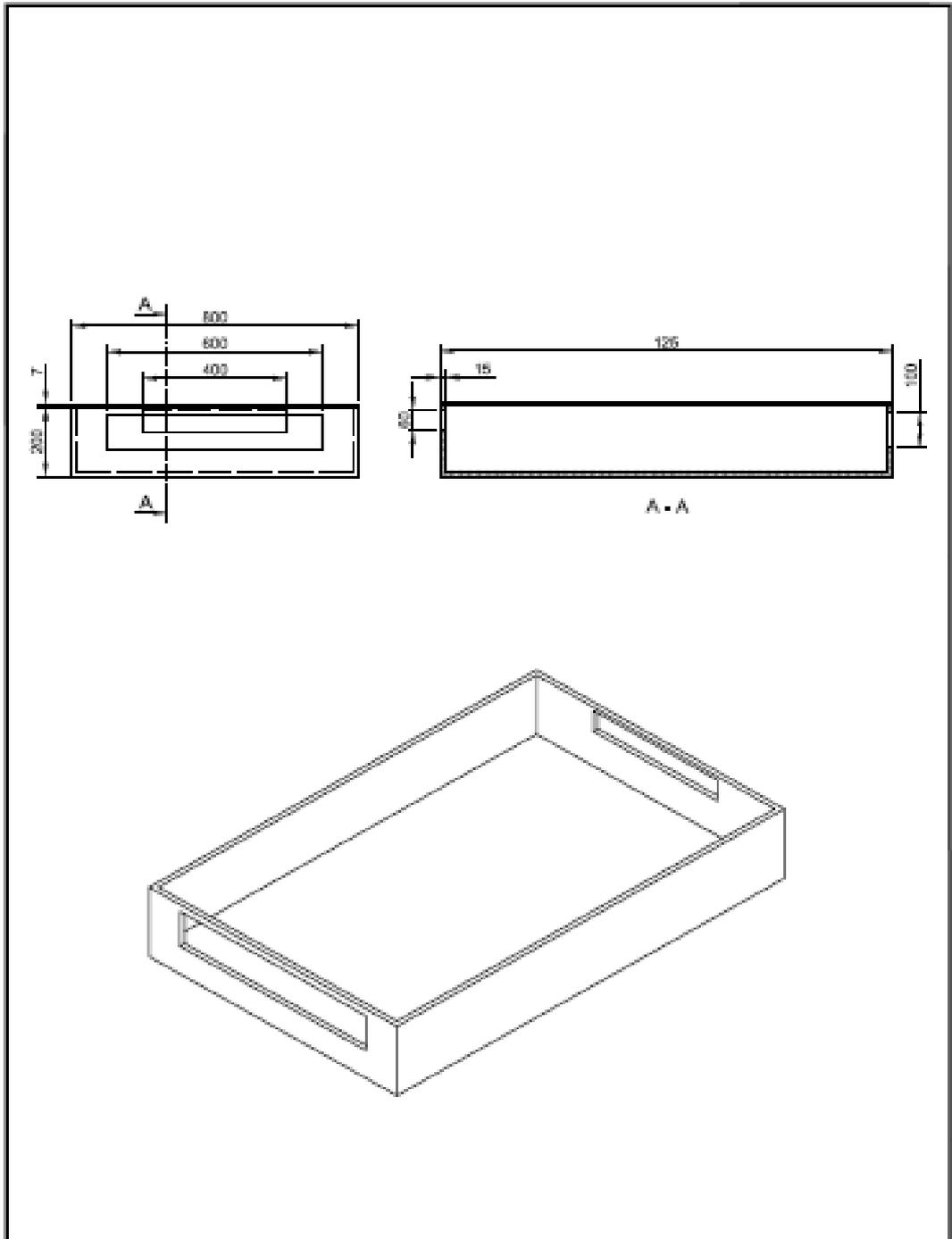
50	36	17	27	35	53	43
60	39	15	26	36	55	45
70	40	16	23	36	57	47
80	40	16	24	36	57	47
90	40	16	24	32	54	45
100	41	15	25	35	57	47
110	40	16	23	39	60	48
120	37	16	22	39	60	48
130	36	16	21	37	57	48
140	36	16	21	39	60	49
150	37	16	21	39	60	51
160	36	16	20	39	60	51
170	36	16	21	39	58	48
180	37	16	21	39	60	48
190	40	16	23	37	58	47
200	40	16	22	39	60	48
210	43	15	24	36	57	47
220	40	16	23	40	60	48
230	40	15	23	39	60	47
240	40	15	23	36	57	47
250	41	15	24	40	60	47
260	40	16	22	40	60	47
270	41	16	23	36	58	47
280	40	15	23	40	58	47
290	42	16	24	39	55	45
300	42	15	23	41	60	47
310	42	14	23	39	55	46
320	41	18	25	36	51	43
330	40	17	25	37	52	43
340	41	16	25	40	55	43
350	42	18	26	36	49	41
360	39	21	27	34	44	39
370	40	23	30	32	41	37
380	43	24	30	32	42	36
390	43	25	31	32	41	35

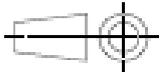
400	45	25	32	32	38	35
410	45	26	32	32	38	34
420	47	27	33	32	38	34
430	49	36	40	35	38	32
440	43	26	43	34	47	36
450	43	25	39	35	47	37
460	41	19	35	36	54	40
470	40	17	30	37	55	43
480	40	17	28	37	55	45
490	40	18	28	35	53	41
500	41	22	29	34	49	40
510	40	20	30	32	45	39
520	41	21	30	34	47	39
530	40	19	30	34	49	40
540	40	19	28	36	51	40
550	40	18	27	37	55	43
560	39	17	27	37	55	43
570	39	17	25	36	55	45
580	40	17	25	39	57	45
590	40	17	25	39	57	45
600	39	16	24	39	59	45
610	40	18	25	36	55	43
620	41	17	24	36	55	45
630	42	19	26	35	49	41
640	40	17	25	39	55	45
650	41	21	27	36	47	40
660	42	22	28	37	46	40
670	40	20	27	36	49	41
680	42	20	27	35	49	40
690	42	21	28	35	47	40
700	42	22	28	35	46	39
710	43	22	29	34	43	37
720	43	22	28	36	46	40
730	42	21	27	36	47	40
740	44	21	28	35	49	40

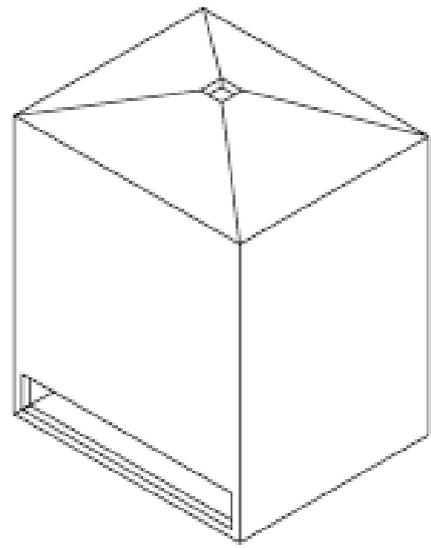
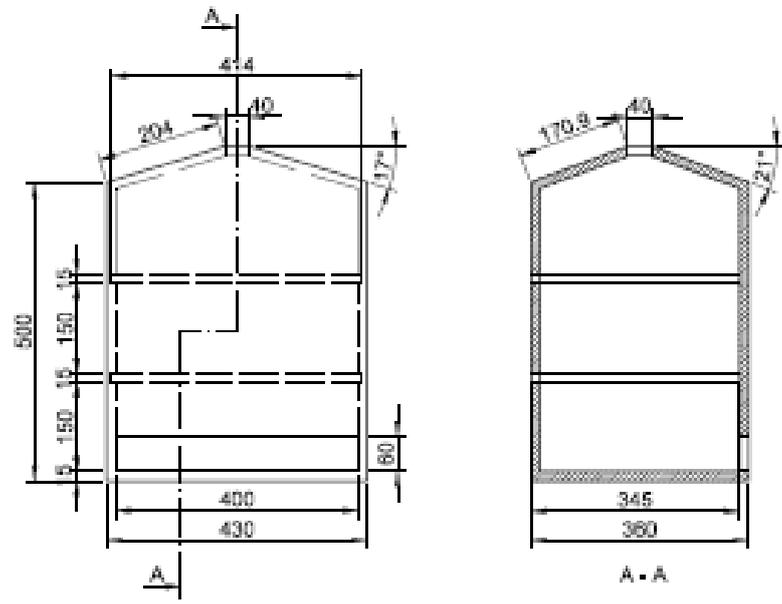
750	44	21	28	35	49	39
760	44	22	28	35	46	39
770	44	22	28	37	49	40
780	40	20	28	39	47	40
790	42	21	27	37	45	40
800	43	20	27	37	49	41
810	43	23	28	34	42	39
820	43	22	29	36	43	39
830	43	22	28	34	42	38
840	45	25	31	32	37	35
850	47	27	32	30	35	34
860	49	30	34	31	34	32
870	49	31	35	31	34	32
880	49	31	36	31	34	32

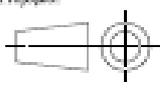
APÊNDICE B

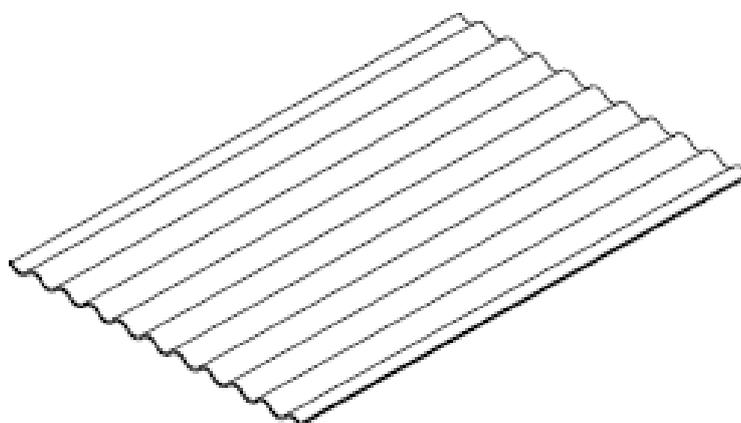
Desenhos do protótipo com suas dimensões características

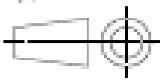


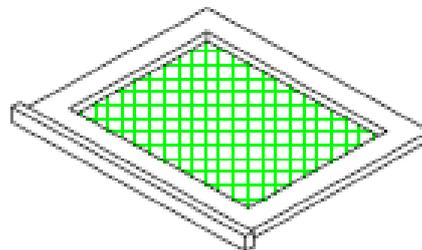
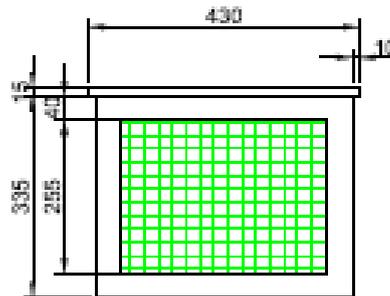
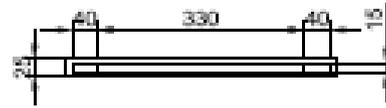
01	01	Ultra MDF	Colado/Parafusado
Item	Quantidade	Material	Fabricação
	Peça: Coletor Solar	Marca: 011301.1303-5	UFGG - CCT
	Desenhado: Antonio Gomes Nunes	Preço: 1	Projeto: 
Escala: 1:15	Orientado: Dr. Marcelo Bezerra Grilo	Unidade: mm	

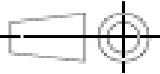


02	01	Ultra MDF	Colado/Parafusado
Item	Quantidade	Material	Fabricação
	Peça:	Câmara de Secagem	Marcado: 011301.1303-5
	Desenhado:	Antonio Gomes Nunes	Folha: 2
Escala: 1:10	Orientador:	Dr. Marcelo Bezerra Grilo	Projeto: 
		Unidade: mm	



04	01	Cimento Reforçado de Fio Sintético	-----
Item	Quantidade	Material	Fabricação
	Peça:	Telha Brasilit	Matrícula: 011301.1303-5
	Desenhado:	Antonio Gomes Nunes	Quantidade: 4
Escala: 1:10	Orientador: Dr. Marcelo Bezerra Grilo	Unidade: mm	Projeto: 



03	02	Ultra MDF	Colado/Panfusoado
Item	Quantidade	Material	Fabricação
	Peça: Bandeija	Material: 011301.1303-5	UFGG - CCT
	Dimensionado: Antonio Gomes Nunes	Quantidade: 3	Projeto: 
Escala: 1:10	Orientado: Dr. Marcelo Bezerra Grilo	Unidade: mm	

Apêndice C

Laudo da banana *in natura* (antes dos testes) e da banana-passa (obtida após os testes).



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 02 de outubro de 2015.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 1143/15

SOLICITANTE:	ANTONIO GOMES NUNES
ENDEREÇO:	Rua capitão João Alves De Lira, 1305, Bela Vista, Campina Grande - PB
PRODUTO(S):	BANANA PRATA IN NATURA
COLETADO POR:	Pelo interessado (a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Campina Grande – PB
FAB./VAL./LOTE:	- / - / -
DATA DE ENTRADA:	17.09.2015
DATA DE ANÁLISE:	21.09.2015
AMOSTRA:/QUANT.:	Nº. 1221/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	73,80	73,85	73,55	73,73
Minerais (%)	0,83	0,81	0,79	0,81
Proteínas (%)	0,98	1,09	1,01	1,03
Lipídios (%)	1,12	1,10	1,08	1,10
Carboidratos (%)	23,27	23,15	23,57	23,33
Energia (Kcal/100g)	107,08	106,86	108,04	107,33
Acidez Total (%)	5,94	5,94	5,96	5,95
pH	4,81	4,81	4,81	4,81
Vitamina C (mg/100g)	7,90	7,91	7,88	7,90
Cálcio (mg/100g)	24,45	24,90	24,72	24,69
Sódio (mg/100g)	77,11	77,30	77,11	77,17

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Candido José Ferreira Neto
Candido José Ferreira Neto
Engº de Alimentos - CRQ 1930003
Mat SIAPE 0338830

CNPJ 08.331.902/0001-12 ☎ (83) 3216-7063
LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☎ (83) 3216-7900
✉ Campus Universitário I – CT, s/n. 58051-970 - João Pessoa/PB
E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br

**SCIENTEC**

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 02 de outubro de 2015.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 1144/15

SOLICITANTE:	ANTONIO GOMES NUNES
ENDEREÇO:	Rua capitão João Alves De Lira, 1305, Bela Vista, Campina Grande - PB
PRODUTO(S):	BANANA PRATA SECA
COLETADO POR:	Pelo interessado (a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Campina Grande – PB
FAB.:/VAL.:/LOTE:	- / - / -
DATA DE ENTRADA:	17.09.2015
DATA DE ANÁLISE:	21.09.2015
AMOSTRA:/QUANT.:	Nº. 1222/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	29,78	29,65	29,70	29,71
Minerais (%)	2,18	2,00	2,13	2,10
Proteínas (%)	2,51	2,47	2,48	2,49
Lipídios (%)	0,89	0,87	0,85	0,87
Carboidratos (%)	64,64	65,01	64,84	64,83
Energia (Kcal/100g)	276,61	275,87	276,93	276,47
Acidez Total (%)	17,31	17,19	17,21	17,24
pH	4,71	4,75	4,71	4,72
Vitamina C (mg/100g)	5,00	5,00	5,11	5,04
Cálcio (mg/100g)	53,31	53,30	53,29	53,30
Sódio (mg/100g)	113,26	113,77	113,63	113,53

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Candido José Ferreira Neto
Candido José Ferreira Neto
Engº de Alimentos - CRO 1930003
Mat. SIAPE 0538530

CNPJ 08.331.902/0001-12 ☎ (83) 3216-7063
LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☎ (83) 3216-7900
✉ Campus Universitário I – CT, s/n. 58051-970 - João Pessoa/PB
E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br