



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



CAIO TÁCITO MIRANDA CASTRO BEZERRA DE MELO

**DESENVOLVIMENTO E ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM
SECADOR SOLAR APLICADO NA SECAGEM DE BANANA**

Campina Grande

2016

CAIO TÁCITO MIRANDA CASTRO BEZERRA DE MELO

**DESENVOLVIMENTO E ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM
SECADOR SOLAR APLICADO NA SECAGEM DE BANANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: **Professor Dr. Marcelo Bezerra Grilo**

Campina Grande

2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M528d Melo, Caio Tácito Miranda Castro Bezerra de.
Desenvolvimento e estudo experimental de um secador solar aplicado na secagem de banana / Caio Tácito Miranda Castro Bezerra de Melo. -- 2016.
150 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro Ciências e Tecnologia, 2016.
"Orientação: Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo".
Referências.

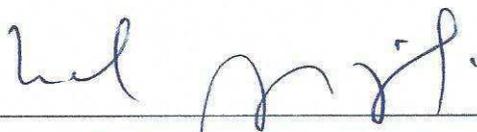
1. Secador Solar. 2. Secagem. 3. Energia Solar. 4. Banana.
I. Grilo, Marcelo Bezerra. II. Título.

CDU 621.472(043)

“DESENVOLVIMENTO E ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM SECADOR SOLAR
DE FRUTAS APLICADO NA SECAGEM DE BANANA”.

CAIO TÁCITO MIRANDA CASTRO BEZERRA DE MELO

Dissertação Aprovada em 19/08/2016 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:



Dr. Marcelo Bezerra Grilo

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Antonio Gomes Nunes

Examinador Externo

DCEN/UFERSA



Dr. Rafael Castelo Guedes Martins

Examinador Externo

DCEN/UFERSA

Dedico este trabalho primeiramente a DEUS, por me dar força para seguir sempre em frente, ultrapassando os obstáculos que haviam pelo caminho. À minha FAMÍLIA, por sempre ter me proporcionado educação e conhecimento. E à minha noiva TALITA SOARES, que sempre foi companhia paciente nessa minha caminhada, sendo minha fonte de inspiração, amor e dedicação...

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me iluminar e guiar meus caminhos, permitindo assim, a realização e concretização de mais um sonho.

Aos meus pais, Demócrito Castro e Josilene Miranda, por tudo o que fizeram para eu chegar onde estou e pelos exemplos de vida, dignidade e amor. Com amor e dedicação, vocês sempre me estimularam a seguir em busca dos meus objetivos com garra e obstinação.

A minha futura esposa, Talita Soares, por todo companheirismo, carinho, confiança e amor depositados sobre mim. Sua parceria e cumplicidade do dia a dia me ajudaram a chegar onde estou hoje.

Ao meu orientador, professor Dr. Marcelo Grilo, por ter me aceitado como orientando neste projeto. Suas experiências e conhecimentos repassados, com certeza, contribuiram para eu me tornar um melhor profissional, bem como ser humano. Sua colaboração e profissionalismo na realização deste trabalho foram fundamentais.

Aos membros da banca examinadora, professores Antonio Gomes Nunes, Celso Rosendo Bezerra Filho e Rafael Castelo Guedes Martins por terem aceitado o convite de participação na avaliação do presente trabalho.

Aos meus colegas da pós-graduação, em especial aos amigos Antonio, Francisco Brasileiro, Paulo Germano e Welington os quais me ajudaram muito e que tenho certeza que a parceria feita será duradoura.

A todos que ao longo da minha vida, de alguma forma, contribuiram para a realização deste trabalho, me fazendo vencer mais esta etapa e concretizar a obtenção deste título tão almejado.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein.

MELO, Caio Tácito Miranda Castro Bezerra de. Desenvolvimento e Análise Experimental de um Secador Solar de Frutas com Aproveitamento Multienergético. 2016. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2016.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e o estudo experimental 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. Apresenta como inovações um capacitor térmico no interior do coletor solar e um sistema de movimentação do ar de secagem acionado por energia solar fotovoltaica, para obtenção de convecção forçada. Foi utilizada a relação entre volumes do coletor solar e da câmara de secagem de 5:1 e instalados sensores TH11, que medem a temperatura e umidade relativa do ar de secagem, conectados a uma placa de Arduino. O secador desenvolvido foi submetido a experimentos na secagem de banana prata (*Musa Spp.*). Foram coletados dados de variação de massa do produto, temperatura e umidade relativa do ar de secagem que permitiram avaliar as curvas de cinética de secagem da banana, a eficiência do processo de secagem e o rendimento térmico do secador solar. As inovações utilizadas permitiram obter temperaturas do ar no interior da câmara de secagem na média de $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, e umidade relativa do ar de secagem no interior da câmara de secagem na média de $30\% \pm 5\%$. O secador solar mostrou-se eficiente, 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), compatível com os tempos relatados na literatura para equipamentos equivalentes. Constatou-se que o processo de secagem se comportou como nos secadores tradicionais com uma média na eficiência mássica do processo de secagem em torno de 83,95%. O Arduino, permitiu 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, o qual foi de 28,51% em média, e na obtenção das outras propriedades termodinâmicas do ar de secagem. As curvas de secagem ajustadas ao modelo matemático de Page, apresentaram em média um coeficiente de determinação de 99,06% podendo assim, ser utilizado para predizer o tempo de secagem da fruta até o ponto desejado. É possível concluir que o secador solar desenvolvido atende as demandas necessárias aos processos de secagem de banana, além de ser de baixo custo e de fácil operacionalidade, comparado com equipamentos semelhantes, o que justifica a sua viabilidade.

Palavras-chave: Secador solar. Secagem. Energia solar. Banana.

ABSTRACT

This paper presents the development and experimental study of a solar dryer with a focus on appropriate technologies for Brazilian agriculture, spreading the culture of renewable energy and contributing to promoting sustainable development. It is a solar dryer of indirect exposure to solar collector and coupled drying chamber, presenting innovations, among which the use of a thermal capacitor inside the solar collector and a drying air drive system powered by photovoltaic solar energy to obtain forced convection. Other innovations were the choice of the relationship between volumes of the solar collector and drying chamber of 5:1 and the installation TH11 sensors that measure temperature and relative humidity, connected to an Arduino board. The dryer developed was subjected to experiments in Silver banana drying (*Musa spp.*) Which were collected mass of product data, temperature and relative humidity for assessment of drying process efficiency, the drying kinetics curves and the thermal efficiency of the solar dryer and its components. The innovations have enabled used air temperature inside the drying chamber on average $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ and relative humidity of the drying air in the average of $30\% \pm 5\%$. The solar dryer was efficient, because the time required for bananas reach the moisture content values on a wet basis of about 25% was 840 minutes (14 hours) compatible with the times reported in the literature for equipment equivalents. It was found that the drying process behaved as in traditional dryers with an average mass efficiency in the drying process of around 83.95%. The Arduino, guaranteed measuring temperature and relative humidity drying the entrances and exits of the solar collector and drying chamber, which enabled the realization of the energy of the solar drier balance, resulting in the calculation of the thermodynamic efficiency of the solar dryer which was 26.47%, and determination of other thermodynamic properties of the drying air. The drying curves adjusted to the mathematical model of Page, had an average coefficient of determination of 99.06% and can thus be used to predict the fruit drying time to the desired point. The conclusion of this work, the solar dryer developed meets the demands necessary for banana drying processes, in addition to being low cost and easy operation, with efficiency and reliability, compared to similar equipment, which justifies its viability.

Keywords: Solar dryer. Drying. Solar energy. Banana.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Banana prata (<i>Musa Spp.</i>).....	26
Figura 02 - Representação da transferência de calor e massa em produtos biológicos.....	29
Figura 03 - Curvas do processo de secagem.....	31
Figura 04 - Composição da massa de produtos biológicos.	33
Figura 05 - Fluxograma de classificação dos secadores.....	36
Figura 06 - Secador solar de exposição direta desenvolvido no LEMT/UFCG.....	38
Figura 07 - Secador solar de exposição direta tipo terreiro.....	38
Figura 08 - Secador solar de exposição direta de formato hexagonal.	39
Figura 09 - Representação de um secador solar de exposição indireta.	40
Figura 10 - Secador híbrido de exposição indireta desenvolvido no LEMT/UFCG.	40
Figura 11 - Secador híbrido desenvolvido na Universidade Federal de Sergipe.....	41
Figura 12 - Sistema projetado para secagem utilizando energia solar.	42
Figura 13 - Representação esquemática do efeito estufa.....	45
Figura 14 - Representação esquemática de uma célula fotovoltaica.	47
Figura 15 - Representação do movimento de rotação da Terra.	48
Figura 16 - Representação do movimento de translação da Terra.	48
Figura 17 - Edifício Professor Júlio Goldfarb, sede do LEMT/UFCG.	52
Figura 18 - Solarium do LEMT/UFCG.	52
Figura 19 - Banana prata (<i>Musa Spp.</i>) utilizada no Experimento 1.	53
Figura 20 - Estufa utilizada nos experimentos.	54
Figura 21 - Bananas tratadas antes dos experimentos.	55
Figura 22 - Vista em perspectiva do protótipo.	58
Figura 23 - Vista superior do protótipo.	58
Figura 24 - Coletor solar desenvolvido no trabalho.	59
Figura 25 - Representação do capacitor térmico.	60
Figura 26 - Representação esquemática do coletor solar construído.....	61
Figura 27 - Câmara de secagem desenvolvida no trabalho.	62
Figura 28 - Representação esquemática da câmara de secagem construída.....	63
Figura 29 - Representação esquemática da bandeja de secagem construída.....	63
Figura 30 - Montagem do sistema de exaustão do secador.	64
Figura 31 - Posicionamento dos sensores TH11 no secador solar.	65
Figura 32 - Arquitetura de hardware da placa de Arduino.....	67

Figura 33 - Distribuição dos blocos na placa Arduino.	67
Figura 34 - Sistema de aquisição de dados (Arduino) em sua caixa de proteção.....	69
Figura 35 - Apresentação do compartimento do cartão SD e do display LCD.	69
Figura 36 - Sensor TH11 para leitura de temperatura e umidade relativa do ar.....	70
Figura 37 - Termo-higrômetro Minipa MT-240.....	72
Figura 38 - Piranômetro estação meteorológica da UFCG.	73
Figura 39 - Balança digital marca ZGP modelo i2000, utilizada no trabalho.	75
Figura 40 - Anemômetro digital utilizado no trabalho.	82
Figura 41 - Representação do volume de controle aplicado ao coletor solar.	83
Figura 42 - Representação do volume de controle aplicado à câmara de secagem.	85
Figura 43 - Representação do volume de controle aplicado ao secador solar.	88
Figura 44 - Dados termodinâmicos do E1 obtidos pelo CATT.....	100
Figura 45 - Dados termodinâmicos do E2 obtidos pelo CATT.....	108
Figura 46 - Dados termodinâmicos do E3 obtidos pelo CATT.....	116
Figura 48 - Dados termodinâmicos do E4 obtidos pelo CATT.....	125

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Modelo de gráfico de distribuição da temperatura em um experimento.....	71
Gráfico 02 - Variação da irradiação solar durante experimento.....	73
Gráfico 03 - Média da irradiação solar a cada hora de experimento.....	74
Gráfico 04 - Modelo de curva de secagem ajustada pelo modelo de Page.	77
Gráfico 05 - Distribuição de temperatura no secador solar durante o E1.....	93
Gráfico 06 - Distribuição de umidade relativa do ar de secagem no secador solar no E1.	93
Gráfico 07 - Média das irradiações durante o E1.	95
Gráfico 08 - Taxa de secagem do Experimento 1.	97
Gráfico 09 - Cinética de secagem do Experimento 1 ajustada ao modelo de Page.....	98
Gráfico 10 - Distribuição de temperatura no secador solar no E2.....	102
Gráfico 11 - Distribuição de umidade relativa do ar de secagem no secador solar no E2.	102
Gráfico 12 - Média das irradiações durante o E2.	103
Gráfico 13 - Taxa de secagem no Experimento 2.	105
Gráfico 14 - Cinética de secagem do Experimento 2 ajustada ao modelo de Page.....	106
Gráfico 15 - Distribuição de temperatura no secador solar no E3.....	110
Gráfico 16 - Distribuição de umidade relativa do ar de secagem no secador solar no E3.	110
Gráfico 17 - Média das irradiações durante o E3.	111
Gráfico 18 - Taxa de secagem no Experimento 3.	113
Gráfico 19 - Cinética de secagem do Experimento 3 ajustada ao modelo de Page.....	114
Gráfico 20 - Distribuição de temperatura no secador solar no E4.....	118
Gráfico 21 - Distribuição de umidade relativa do ar de secagem no secador solar no E4.	118
Gráfico 22 - Média das irradiações durante o E4.	119
Gráfico 23 - Taxa de secagem no Experimento 4.	122
Gráfico 24 - Cinética de secagem do Experimento 4 ajustada ao modelo de Page.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Modelo de tabela de distribuição de temperatura e umidade no secador.	70
Tabela 02 - Tabela utilizada para registrar e calcular os dados de massa.	76
Tabela 03 - Modelo matemático empregado para ajustes das curvas de secagem.	78
Tabela 04 - Modelo da tabela do rendimento do secador solar pelo balanço energético.	88
Tabela 05 - Modelo da tabela das eficiências dos processos de secagem.	89
Tabela 06 - Modelo da tabela do rendimento do secador solar pelo método da potência útil.	90
Tabela 07 - Dados de massa obtidos no Experimento 1.	96
Tabela 08 - Dados de massa obtidos no Experimento 2.	104
Tabela 09 - Dados de massa obtidos no Experimento 3.	112
Tabela 10 - Dados de massa obtidos no Experimento 4.	121
Tabela 11 - Parâmetros de massa e eficiência mássica de secagem de cada experimento.	126
Tabela 12 - Média dos parâmetros medidos nos processos de secagem.	127
Tabela 13 - Rendimento térmico do coletor solar calculado pelo método da potência útil. ..	127
Tabela 14 - Rendimento térmico do coletor solar calculado pelo balanço energético.	128
Tabela 15 - Coeficientes de determinação dos experimentos, ajustados ao modelo de Page	129

LISTA DE SIGLAS

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CATT	<i>Computer Aided Thermodynamic Tables</i>
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPU	Unidade Central de Processamento
EXP	Experimento
GEDS	Grupo de Pesquisa em Energia e Desenvolvimento Sustentável
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
LEMT	Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas
IBRAF	Instituto Brasileiro de Frutas
ICSP	<i>In-Circuit Serial Programming</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
JTAG	<i>Joint Test Access Group</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
MCU	<i>Multipoint Control Unit</i>
PB	Paraíba
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	Memória de Acesso Randômico
RDC	Resolução de Diretoria Colegiada
RU	Razão de Umidade
SD	<i>Secure Digital</i>
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFS	Universidade Federal de Sergipe
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa	21
1.2	Objetivos.....	21
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos específicos	22

CAPÍTULO II

2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	As frutas.....	24
2.2	A banana	25
2.3	A secagem.....	27
2.3.1	Métodos de determinação do teor de umidade	34
2.4	Os secadores	35
2.4.1	Tipos de secadores	35
2.4.2	Secador solar.....	36
2.4.2.1	Secador solar de exposição direta.....	37
2.4.2.2	Secador solar de exposição indireta.....	39
2.5	A energia solar	42
2.5.1	Energia solar térmica	45
2.5.2	Energia solar fotovoltaica	46
2.6	Movimento aparente do sol	47

CAPÍTULO III

3	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	Metodologia.....	51

3.2	O produto e ser seco (a banana).....	52
3.3	Desenvolvimento do secador solar	55
3.3.1	Materiais utilizados na construção do secador	55
3.3.2	Desenvolvimento do coletor solar	58
3.3.3	Desenvolvimento da câmara de secagem	61
3.3.4	Desenvolvimento do sistema de exaustão	64
3.3.5	Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados	64
3.3.5.1	O Arduino e suas características.....	65
3.4	A utilização da energia solar.....	72
3.5	O processo de secagem.....	75
3.5.1	Determinação das curvas de secagem.....	76
3.6	Análise energética do desempenho.....	78
3.6.1	Cálculo do rendimento térmico a partir do balanço energético	79
3.6.1.1	Conceitos termodinâmicos.....	79
3.6.1.2	Conservação da massa	79
3.6.1.3	Primeira lei da termodinâmica.....	80
3.6.1.4	Cálculo da eficiência pela primeira lei da termodinâmica.....	82
3.6.1.4.1	Coletor solar.....	82
3.6.1.4.2	Câmara de secagem	85
3.6.1.4.3	Secador solar (coletor solar mais câmara de secagem)	87
3.6.2	Cálculo do rendimento térmico a partir da potência útil	89

CAPÍTULO IV

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	92
4.1	Experimento 1 (E1), realizado em 25 e 26 de abril de 2016	92
4.2	Experimento 2 (E2), realizado em 16, 17 e 18 de maio de 2016.....	101
4.3	Experimento 3 (E3), realizado em 08 e 09 de junho de 2016.....	109
4.4	Experimento 4 (E4), realizado em 21 e 22 de julho de 2016	117

4.5	Análise das eficiências mássicas de secagem.....	126
4.6	Análise dos rendimentos médios do secador solar	127
4.7	Análise dos ajustes das curvas de cinética de secagem	128

CAPÍTULO V

5	CONCLUSÕES.....	131
----------	------------------------	------------

5.1	Sugestões para trabalhos futuros	132
-----	--	-----

REFERÊNCIAS	133
--------------------------	------------

APÊNDICES	139
------------------------	------------

Apêndice A – Tabelas de distribuição de temperatura e umidade relativa do ar em cada experimento.....	149
--	-----

Apêndice B – Projeto do secador solar.....	154
--	-----

Capítulo I
INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Contribuir com o desenvolvimento da humanidade, respeitando os recursos naturais e privilegiando a eficiência energética é o principal papel do engenheiro na atualidade, principalmente com o aumento, nas últimas décadas, da disseminação do conceito de desenvolvimento sustentável, que vem sendo seguido nos mais diversos meios da sociedade.

Assim, aqueles que detêm o conhecimento científico exercem papel de fundamental importância no que diz respeito ao crescimento e desenvolvimento econômico dos países, de forma a causar menor impacto ambiental e maior rentabilidade.

Para Silva (2013), a utilização de energias renováveis ganha cada vez mais prestígio no mundo pós-moderno, em função do surgimento de políticas de substituição das fontes energéticas de origem fóssil por fontes renováveis, principalmente energias solar e eólica. Segundo Akinola, Akinyemi e Bolaji (2006), as tecnologias solares estão ganhando rápida aceitação como medida de economia de energia aplicada na agricultura, sendo preferíveis às outras fontes alternativas de energia porque são abundantes, inesgotáveis e menos poluentes.

O Brasil é um país de dimensões continentais e está geograficamente posicionado numa zona de excepcional disponibilidade de energia solar. Assim, a utilização desta fonte de energia no Brasil é de extrema importância para um país que ambiciona galgar o posto de potência mundial, incentivando seu desenvolvimento tecnológico de modo sustentável.

É necessário que o desenvolvimento socioeconômico ocorra em sintonia com as avançadas tecnologias da atualidade e com a globalização, porém, com ações locais que priorizem a pesquisa e o desenvolvimento de máquinas simples, de fácil construção, manutenção e operação, preferencialmente de baixo custo, que respondam pelas demandas típicas de cada região, propiciando o desenvolvimento sustentável e atendendo parte considerável da população que atua no sistema de produção conhecido como agricultura familiar.

O setor da fruticultura é de fundamental importância no cenário econômico do Nordeste brasileiro. Analisando mais detalhadamente este setor, observa-se um alto grau de perecimento das frutas, fator que causa prejuízos econômicos aos fruticultores.

Com o foco na promoção do desenvolvimento regional, este trabalho pretende contribuir para disseminar a utilização de novas tecnologias nos processos de secagem de alimentos no setor da fruticultura, permitindo a comercialização de um produto de boa qualidade, de baixo custo, aumentando, a rentabilidade na cadeia produtiva desses alimentos.

A secagem é um dos mais antigos métodos de conservação de alimentos. Com o passar dos anos, as técnicas dos processos têm sido repassadas de geração para geração de trabalhadores, através dos conhecimentos adquiridos de seus antepassados, e gradativamente melhorados, de forma empírica. (FIOREZE, 2004).

Ainda, segundo Fioreze (2004), um dos fatores que forçaram o aprimoramento de técnicas de conservação, dentre elas a secagem, foi a migração das populações rurais para os centros urbanos nas últimas décadas, uma vez que a maioria dos alimentos é produzida em um local e consumida em outro. Além disso, ele ainda ressalta o comércio entre países, onde o alimento passou a ser uma importante moeda de troca, como fator que influenciou no aprimoramento dos processos de produção, conservação e transformação dos alimentos.

O secador é um equipamento usado na redução da umidade dos produtos pela ação do calor, propiciando, com isso, a conservação e manutenção da qualidade e das propriedades dos produtos por mais tempo. Existem vários tipos e modelos disponíveis, porém, esses equipamentos apresentam, em geral, custo elevado, incompatível com o poder aquisitivo do pequeno produtor rural.

Os benefícios advindos da secagem são frutos desidratados que possuem maior tempo de prateleira e que acondicionados e embalados apropriadamente incrementarão a renda da família do agricultor. Permitindo, ainda, o aproveitamento de toda produção, reduzindo o desperdício, ajudando a comercializar os produtos fora da safra, além de facilitar o estoque e transporte, bem como a ampliação dos postos de trabalho, fomentando a geração de emprego e renda.

Com isso, buscou-se desenvolver um secador de frutas que funciona com a utilização da energia solar sob duas formas: térmica e fotovoltaica. Este equipamento representa uma alternativa para a produção de alimentos desidratados para ser utilizado, principalmente, em comunidades de agricultura familiar, sendo também, uma opção de geração de emprego e renda para essas pessoas, a partir da produção e comercialização desses produtos na forma desidratada, os quais possuem maior valor agregado.

Para incrementar o desenvolvimento regional no setor da fruticultura, este trabalho contribui para disseminar a utilização de novas tecnologias nos processos de secagem de alimentos que viabilize a comercialização de um produto de boa qualidade. Neste trabalho são apresentadas as características construtivas e operacionais de um secador solar; as curvas de secagem da banana, obtidas experimentalmente; a análise das variações de temperatura e umidade, levantadas em diversas posições no interior do equipamento; bem como o nível de

radiação solar incidente sobre o equipamento nos dias de experimento, permitindo a análise do rendimento térmico do equipamento e da eficiência do processo de secagem.

1.1 Justificativa

Promover o desenvolvimento regional significa, muitas vezes, incentivar cadeias produtivas locais, a partir do potencial existente, de forma a fomentar a geração de renda e emprego.

Na área de produção de frutas, o Brasil é um dos três maiores produtores mundiais, com uma produção que ultrapassa 34 milhões de toneladas e gera mais de 4 milhões de empregos diretos (EMPREGO & RENDA, 2011). Mas, a produção para a agroindústria ainda é pequena, pois os produtores estão mais voltados para o mercado *in natura*. Nesse contexto, o mercado para as frutas desidratadas se destaca dentro dos produtos processados porque conservam as características do produto natural, possuem custo de transporte reduzido e são menos suscetíveis à proliferação dos microrganismos responsáveis pela redução de sua vida útil.

Buscando a interação com a realidade no ambiente da produção agrícola nordestina, o Grupo de Pesquisa em Energia e Desenvolvimento Sustentável (GEDS), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), tem trabalhado, desde o ano de 2007, no desenvolvimento de secadores de frutas que utilizam a energia solar. Ao longo dos anos, diversos equipamentos foram construídos e testados nos mais diversos experimentos, e repassados para pequenos produtores da região para serem aplicados a situações reais de uso. Com isso, cada equipamento desenvolvido traz novas características que convergem para a melhoria da eficiência energética do processo de secagem.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver e testar experimentalmente um secador solar para a secagem de frutas, que utilize como fonte de energia para o processo de secagem a energia solar na forma térmica e fotovoltaica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um sistema de captação de energia solar (coletor solar) a ser acoplado à uma câmara de secagem para o processo de secagem de banana;
- Desenvolver uma câmara de secagem que atenda a demanda de energia necessária a secagem da banana e que favoreça o fluxo de ar, de forma que ocorra a menor perda de energia no interior do equipamento;
- Dimensionar um sistema que permita uma melhor circulação do ar no interior do equipamento;
- Desenvolver um sistema de medição e aquisição de dados de temperatura e umidade do ar de secagem em tempo real e quantificar o desempenho do sistema de secagem;
- Testar experimentalmente o equipamento desenvolvido para obtenção da eficiência do processo de secagem e do rendimento térmico do equipamento;
- Testar experimentalmente o equipamento desenvolvido para obtenção das curvas de cinética de secagem da banana;
- Analisar o efeito das condições do ar de secagem (umidade e temperatura) sobre o tempo de secagem, o consumo de energia e a qualidade do produto durante o processo de secagem;
- Comparar os resultados obtidos nos experimentos com os obtidos em trabalhos anteriores, desenvolvidos no mesmo laboratório, a fim de analisar quais das novas características do equipamento foram fundamentais para tais resultados.

Capítulo II
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente, existe no mundo uma convergência das ideias que associam produção (seja nos setores industriais, comerciais e de serviços) e desenvolvimento sustentável. Nestes âmbitos, é cada vez mais necessário os países e empresas focarem seus processos produtivos em mecanismos que promovam a preservação das condições ambientais, não obstante, obtendo maior redução dos custos de produção e conseqüentemente maior rentabilidade e lucratividade.

Para determinar a rentabilidade de um processo de secagem de um produto agrícola 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.

2.1 As frutas

Os alimentos podem ser classificados em perecíveis e deterioráveis. Os perecíveis são alimentos que se deterioram muito rapidamente e sua conservação depende de meios artificiais, sendo o principal deles, a refrigeração nos casos de frutas, vegetais, leite, ovos, tubérculos e o congelamento para carnes e pescado. Para esse grupo, o principal objetivo da secagem é a obtenção de novos produtos e não a conservação. Os deterioráveis são alimentos nos quais a deterioração é mais lenta e pode ser controlada através do controle de umidade do produto que está diretamente relacionada à umidade relativa do ar intersticial, dentre os quais destacam-se os grãos (cereais, oleaginosas, café, cacau, etc.) (FIOREZE, 2004).

Em se tratando das frutas, associa-se seu alto grau de perecimento à grande quantidade de água existente no interior das mesmas, o que favorece o surgimento e proliferação de fungos e outros microrganismos, impossibilitando, assim, seu consumo a médio e longo prazo após a colheita, dificultando com isso, o acesso de boa parte da população.

Segundo Soares (2002), um fator que acentua ainda mais o problema da desnutrição humana é a diminuição da disponibilidade de alimentos, agravada pela expansão da população mundial. Esse desequilíbrio entre o tamanho da população e a oferta de alimentos é crescente, mas pode ser minimizado através da redução das perdas que ocorrem nas diferentes etapas do processo de obtenção dos alimentos, desde a produção até o consumo.

No Brasil, a base agrícola da cadeia produtiva de frutas já ultrapassou 2,2 milhões de hectares cultivados, sendo responsável pela geração de, aproximadamente, cinco milhões de empregos diretos. Com um volume estimado de 43,6 milhões de toneladas produzidas, a

fruticultura atinge um valor bruto de R\$ 20 bilhões (IBRAF, 2013). Assim, a fruticultura está entre os setores que mais geram renda, empregos e desenvolvimento rural.

Além de representarem uma importante parcela na economia de um país, as frutas exercem um papel fundamental na nutrição humana, sendo fonte indispensável de vitaminas, minerais e fibras.

No entanto, estima-se que o consumo de frutas no Brasil corresponda a menos da metade das recomendações nutricionais relatadas, sendo ainda mais deficiente entre as famílias de baixa renda (LEVY-COSTA et al., 2005).

Assim, faz-se necessário o emprego de tecnologias de fácil domínio que promovam a diminuição do desperdício de frutas, que ocasionam, em curto prazo, enormes impactos para o país. Com essa iniciativa, haveria uma diminuição de custos e uma maior disponibilização de alimentos saudáveis ao consumidor, gerando uma melhor remuneração ao produtor rural e uma maior estabilização de preços ao consumidor.

2.2 A banana

Segundo Melo et al., (2005) o principal componente das frutas é a água, correspondendo de 75 a 95% de sua massa. Dos macronutrientes, os carboidratos são os predominantes, geralmente na forma de açúcares (sacarose, glicose e frutose). Seu teor varia de 5 a 25% nas frutas frescas.

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 calorífico, energético e, principalmente, pelo conteúdo mineral e vitamínico que ela apresenta. Sob o ponto de vista tecnológico e comercial, devido à grande variedade de vitaminas e nutrientes, o aproveitamento para consumo *in natura* e industrial tem sido elevado (LIMA et al., 2000).

As qualidades alimentícias e comerciais da banana são influenciadas pelas condições de amadurecimento e armazenamento. Isso porque a banana 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).

Na Figura 01 são mostradas bananas da espécie prata (*Musa Spp.*), que foi o tipo utilizado nos experimentos desenvolvidos neste trabalho.

Figura 01 - Banana prata (*Musa Spp.*).

Fonte: Próprio autor.

A banana madura 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 do ambiente que a envolve através de adsorção ou dessorção (GRILO, 2009).

O conhecimento das isotermas de sorção é essencial para um projeto adequado de embalagens permeáveis e para estabelecer o teor de umidade que possibilite aumentar o tempo de armazenamento do produto (LIMA et al., 2000).

Lima et al. (2000) ressaltam o valor comercial que a banana tem, sendo aproveitada para consumo “*in natura*” e industrial, uma vez que a mesma apresenta grande variedade de nutrientes e vitaminas, com a produção de produtos elaborados voltada para a farinha de banana verde e madura, cremes, flocos, passas, purê, banana-passa e doces em geral.

A banana apresenta teores de água inicial de, aproximadamente, 70% 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% b.u., para isso, faz-se necessário que esse produto seja submetido a um processo de secagem (NUNES et al., 2014).

Além disso, segundo a Resolução de Diretoria Colegiada (RDC) nº 272, de 22 de setembro de 2005, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), para uma fruta ser considerada seca deve possuir no máximo 25% b.u. de teor de umidade.

A técnica de processamento mais simples para banana é a obtenção da banana-passa, a típica banana seca brasileira. 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 de 15% em base úmida. Assim, é importante saber a influência dos parâmetros de secagem da banana para as condições ótimas do processo.

Bananas secas são estáveis à ação de microrganismos, 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), a 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; LEITE et al., 2007).

Segundo Phoungchandang e Woods (2000), a curva de secagem convectiva da banana descascada é mais eficaz quando se utiliza o modelo de Newton (exponencial), provavelmente devido a uma resistência de superfície que se desenvolve durante o processo de secagem.

2.3 A secagem

Secagem é a remoção, voluntária ou não, total ou parcial, de uma fase líquida ou gasosa de qualquer material, que envolve exclusivamente a transferência de calor e massa. Trata-se da prática pós-colheita mais comum para a redução de seu nível de umidade até o nível mais adequado, embora isso não signifique a remoção total de água do produto.

Os altos índices de desperdício relacionados com a produção alimentícia são, na maioria das vezes, provenientes da degradação natural causada pela elevada quantidade de umidade presente nos alimentos.

A redução de umidade do produto agrícola, através da secagem, ou seja, da retirada de água de seu interior, inviabiliza a manutenção de condições propícias à proliferação de bactérias e fungos, evitando-se a rápida degradação do mesmo. Assim sendo, o processo de secagem apresenta-se como uma solução para a conservação de alimentos.

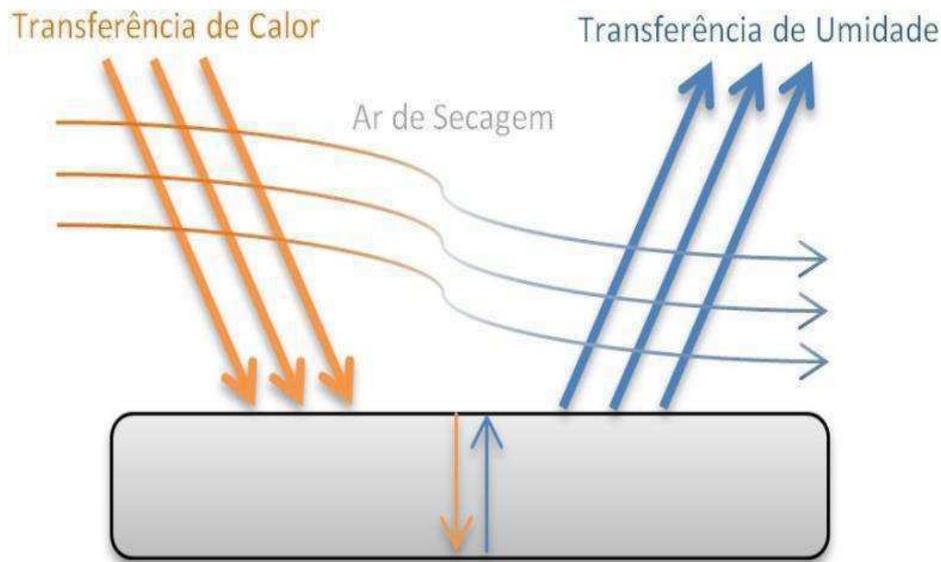
Como o fluido de trabalho utilizado nos processos de secagem solar é o ar aquecido, a avaliação das suas propriedades termodinâmicas (temperatura, umidade relativa, velocidade, dentre outras) é de extrema importância, de tal modo que, sob determinadas condições operacionais, possamos proporcionar uma secagem uniforme do produto e reduzir o tempo de secagem do mesmo (GRILO et al., 2009).

Quando os produtos agrícolas são secados 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). Ou seja, por ser um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto a ser secado e o ar de secagem, a secagem influencia nas características do produto final e tem efeito direto na sua qualidade. Se for malconduzida pode causar a deterioração do produto ou reduzir a qualidade do mesmo, diminuindo seu rendimento nas etapas de processamento.

Lima (1999) ressalta que quando um sólido é submetido à secagem, observam-se dois fenômenos que ocorrem simultaneamente. Nesse processo, é necessário fornecer calor ao material úmido para que a água possa ser transportada do interior do sólido até sua superfície, permitindo, assim, a evaporação de água da superfície do material para o ambiente.

Na Figura 02 é mostrada uma representação dos processos de transferência de calor e massa em produtos biológicos.

Figura 02 - Representação da transferência de calor e massa em produtos biológicos.



Fonte: Nunes (2016)

O processo de fornecimento de calor para o material úmido será responsável pela evaporação da água do material, seguindo-se a transferência de massa que arrastará o vapor formado.

Com a remoção desta umidade da superfície e das camadas mais externas, ocorre um gradiente de concentração interno ao produto, que resulta em um processo migratório da umidade do centro para a superfície do mesmo. Uma das teorias mais difundidas para a explicação da migração da umidade em produtos biológicos pelos autores é a da difusão de água líquida, usada na realização dos trabalhos de Lima (1999), Costa (2008) e Farias (2011), que diz que a migração ocorre por difusão de água na forma líquida, devido a uma diferença de concentração, sendo que a mudança de estado da água ocorre próximo à superfície;

Pode-se perceber que a secagem de alimentos é um fenômeno complexo, que como já foi dito, 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).

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 os processos de secagem de frutas, é melhor usar o modelo semi teórico simplificado do modelo de Fick, o modelo de Page dado pela Equação 01 (FARIAS, 2011).

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = Exp(-kt^n) \quad (01)$$

Onde:

RU = Razão de umidade (adimensional);

X = Teor de umidade (base seca);

X_e = Teor de umidade de equilíbrio (base seca);

X_0 = Teor de Umidade inicial (base seca);

k = Constante do modelo (min^{-1});

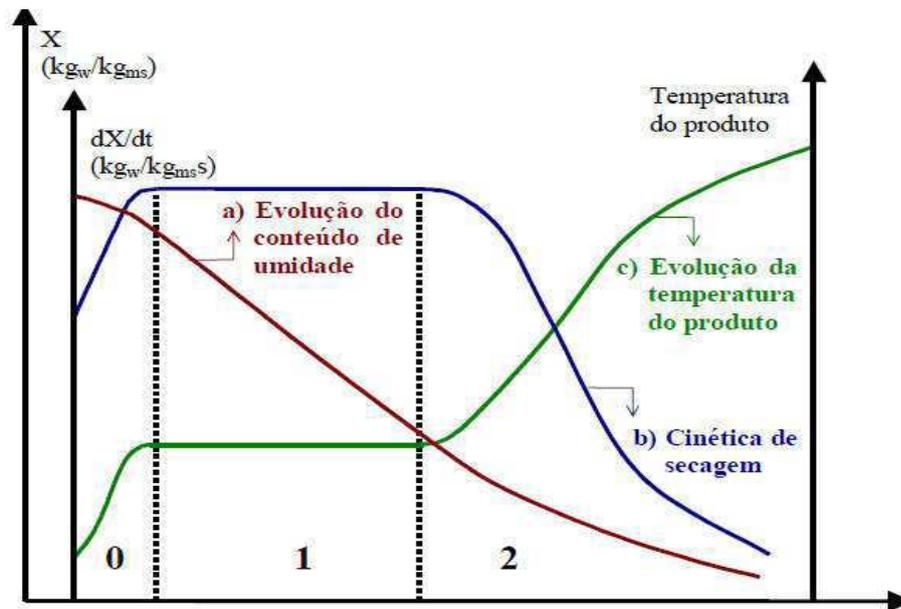
n = Constante do modelo (adimensional);

t = Tempo (min).

Diversos produtos biológicos, principalmente aqueles com teores iniciais de água maiores que 70% b.u., quando estão sendo secos individualmente ou em camada fina, apresentam perda de água a uma taxa constante durante o período inicial de secagem, seguida por um período de secagem a uma taxa decrescente (BROOKER et al., 1992; FIOREZE, 2004).

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 03, onde são apresentadas as curvas de evolução do teor de água do produto (X), da velocidade de secagem (dX/dt), também chamada de cinética de secagem, e de sua temperatura (T), ao longo do tempo, para um experimento utilizando ar de propriedades constantes.

Figura 03 - Curvas do processo 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 iniciais pré-fixadas. 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. Nos experimentos executados neste trabalho, as curvas analisadas se encontraram no estágio 2 da figura apresentada.

Smitabhindu et al., (2008) desenvolveram um sistema otimizado que melhora a secagem de banana assistido por energia solar. A literatura apresenta vários resultados a respeito da otimização de convecção natural forçada dos 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. A conclusão dos autores é formular um modelo matemático de um sistema de secagem de alimentos por energia solar e que o uso deste modelo tenha como objetivo a otimização e a performance de um sistema de secagem de banana.

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 seco e da massa total do produto antes de iniciar o processo. Esses teores podem ser expressos como a relação entre a massa de água contida no produto e a massa de matéria seca, como determina a Equação 02.

$$X_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \quad (02)$$

Onde:

X_{bs} = Teor de umidade, em base seca (adimensional);

m_{H_2O} = Massa de água contida no produto (*kg*);

m_{ms} = Massa de matéria seca (*kg*).

Esta forma de representação do teor de umidade (em base seca) é mais utilizada para fins científicos.

Outra forma de 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 03. Essa relação é conhecida como teor de umidade em base úmida e é mais usada para fins comerciais.

$$X_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_{mt}} \quad (03)$$

Onde:

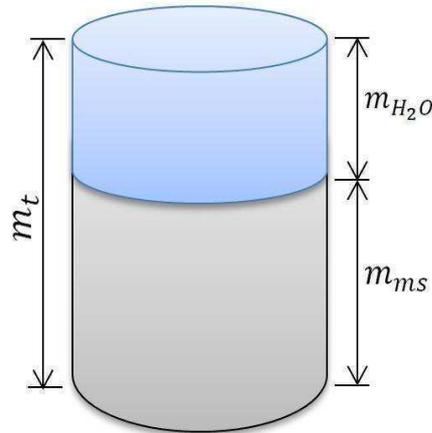
X_{bu} = Teor de umidade, em base úmida (adimensional);

m_{mt} = Massa total do produto (*kg*).

A Figura 04 representa o esquema da composição da massa de um produto biológico, onde se observa que a massa total desse produto, como mostrado na Equação 04, é composta por uma fração de massa de matéria seca e outra de massa de água. Portanto:

$$m_t = m_{ms} + m_{H_2O} \quad (04)$$

Figura 04 - Composição da massa de produtos biológicos.



Fonte: Gomes (2015)

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 Equação 05.

$$X_{bu} = \frac{X_{bs}}{1 + X_{bs}} \quad e \quad X_{bs} = \frac{X_{bu}}{1 - X_{bu}} \quad (05)$$

Assumindo que apenas água seja removida durante o processo de secagem, tem-se que a quantidade de matéria seca se mantém constante e, relacionando as Equação 05, chega-se a Equação 06.

$$m_{msi} = m_{msf} = \frac{m_{ti}}{1 + X_{bsi}} \quad (06)$$

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, em base seca (adimensional).

Logo a quantidade de água removida é expressa pela Equação 07.

$$m_{H_2O i} - m_{H_2O f} = m_{ti} \frac{X_{bsi} - X_{bsf}}{1 + X_{bsi}} \quad (07)$$

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 após o processo de secagem (*kg*);

X_{bsf} = Teor de umidade final, em base seca (adimensional).

2.3.1 Métodos de determinação do teor de umidade

A determinação do teor de umidade em alimentos pode ser feita de diversas formas e a escolha do método a ser utilizado vai depender, dentre outros fatores, da forma como 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, sendo a mais abundante na composição dos alimentos. É perdida facilmente para o ambiente a baixas temperaturas.
- **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. 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.

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

Os métodos de determinação de umidade podem ser classificados de duas formas:

- **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 (DALPASQUALE, 2002). Por exigir um tempo relativamente longo para sua execução, às vezes, este método pode ser desvantajoso, quando, por exemplo, se necessita de resposta imediata no controle de uma determinada operação. Como exemplos de

métodos diretos para determinação dos teores de umidade de um produto, têm-se: estufa, infravermelho e destilação.

- **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).

2.4 Os secadores

Os secadores variam de acordo com diversos fatores dentre os quais destacam-se o tipo de produto a ser seco, a capacidade de secagem, tipo de energia utilizada, etc. (FIOREZE, 2004).

A grande variedade de equipamentos e processos de secagem representa uma das maiores dificuldades na seleção de secadores para se obter um produto de qualidade. Muitos métodos são apresentados na literatura para escolha do modelo mais adequado a cada necessidade, como os baseados em conceitos fenomenológicos e os que dizem respeito aos custos (MACHADO, 2009).

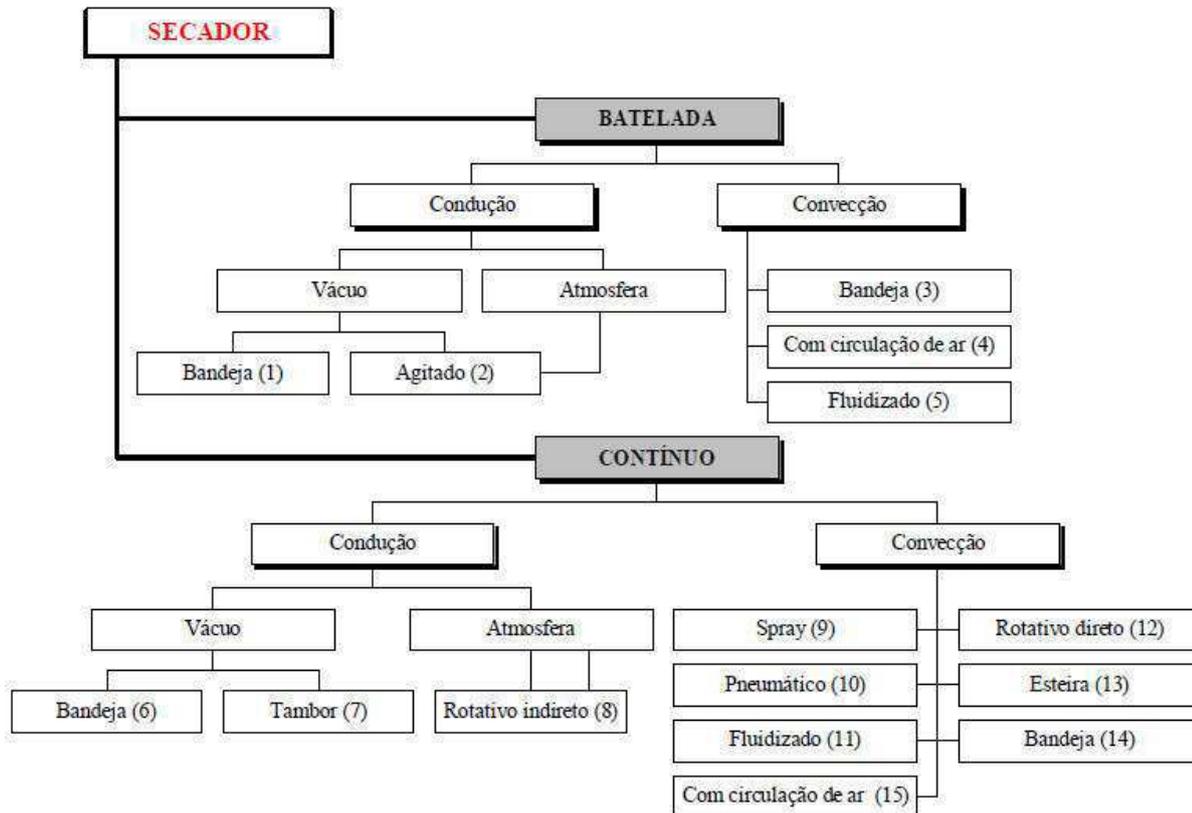
No entanto, dos muitos tipos de secadores para produtos agrícolas, os modelos diferem-se, basicamente, pelo método de operação (contínuo ou batelada), sendo, portanto, de extrema importância o conhecimento como interveem o produto no equipamento.

2.4.1 Tipos de secadores

- **Secadores de Batelada ou Descontínuos:** nos sistemas de secagem por batelada o produto é depositado no secador até que o processo seja concluído e, só então, o produto desidratado é removido e outra porção de produto é depositada, quando é iniciado um novo processo.
- **Secadores Contínuos:** consistem em equipamento de secagem nos quais os produtos a serem secos são depositados de forma que durante a realização do processo outros produtos são inseridos no sistema enquanto os que atingem o teor de umidade desejado são retirados, como o próprio nome sugere, continuamente.

Segundo Park et al. (2007), a classificação dos secadores pode ser obtida com base no método de operação, cujas subclassificações apresentam-se, conforme mostradas, na Figura 5.

Figura 05 - Fluxograma de classificação dos secadores.



Fonte: Park et al. (2007)

Para Gouveia et al. (2003), com a disponibilização de mais equipamentos, com diferentes características (atendendo as diversas demandas), no mercado de processamento de produtos agrícolas, certamente houve um aumento na implantação de indústrias de secagem, reduzindo-se as perdas do excedente da produção dos produtos agropecuários.

2.4.2 Secador solar

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

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 demanda. 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.

Devido ao grande desperdício de alimentos principalmente as frutas, diversos pesquisadores vêm em uma busca constante de alternativas para favorecer principalmente os pequenos agricultores, os seja, a agricultura familiar. O foco principal é a construção de secadores solar com materiais de baixo custo e com boa eficiência (GRILO, 2007; SOUZA et al., 2012; GRILO 2013; PRAKASH e ANILKUMAR, 2013; TUNDE-AKINTUNDE, 2011).

Procurando aproveitar de maneira eficiente os recursos oferecidos pelo Sol, e tendo como objetivo aperfeiçoar cada vez mais os equipamentos, ou seja, os secadores. Para isso, foram pesquisados os trabalhos de alguns pesquisadores de algumas instituições do Brasil que trabalham com os mesmos fins. A seguir são mostrados alguns protótipos de secadores solares de exposição direta e indireta.

2.4.2.1 Secador solar de exposição direta

O secador solar de exposição direta é um equipamento muito simples, de fácil construção, operação e manutenção, sendo composto basicamente de três elementos: o corpo, que é uma caixa em formato de prisma retangular construída de madeira; duas bandejas, onde o produto é colocado para ser seco; e a cobertura do secador, que lhe dá a característica de estufa.

Na Figura 06 é mostrado um protótipo de secador solar de exposição direta desenvolvido no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em Campina Grande por Nunes et al. (2014) e que é largamente utilizado na secagem de abacaxi e banana.

Figura 06 - Secador solar de exposição direta desenvolvido no LEMT/UFMG.



Fonte: Nunes et al. (2014)

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.

Na Figura 07 pode-se observar um secador solar construído por Silva et al. (2006) na UFV em Viçosa, MG.

Figura 07 - Secador solar de exposição direta tipo terreiro.



Fonte: Silva et al. (2006)

Observe que o secador mostrado 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.

O secador mostrado na Figura 08 foi desenvolvido na UFCG por Grilo e Lacerda no ano de 2013.

Figura 08 - Secador solar de exposição direta de formato hexagonal.



Fonte: Grilo e Lacerda (2013)

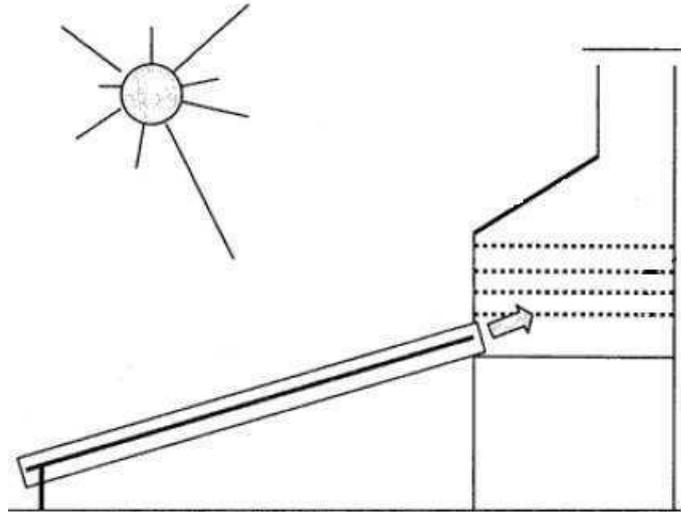
Trata-se de um secador solar de exposição direta com um formato diferente dos secadores solares tradicionais. Este secador tem um *design* inovador, em formato de prisma hexagonal, e foi utilizado na secagem de banana. A partir do projeto e testes deste secador foi escrito uma cartilha que tem sido utilizada para divulgar o uso de energia solar na secagem de banana

2.4.2.2 Secador solar de exposição indireta

Neste tipo de secador solar o produto a ser seco não está diretamente exposto à irradiação solar, isso minimiza a descoloração e rachaduras na superfície o produto a ser seco. A câmara de secagem é utilizada para manter o produto na bandeja.

Na Figura 09 é mostrado um esquema representativo de um secador solar indireto, com câmara de secagem, neste secador a irradiação solar não é diretamente incidente sobre o material a ser seco.

Figura 09 - Representação de um secador solar de exposição indireta.



Fonte: Adaptado de Grilo (2007)

O ar é aquecido em um coletor solar e, em seguida, conduzido para uma câmara de secagem onde se encontra o produto à ser seco.

Na Figura 10 é mostrado o protótipo de um secador híbrido desenvolvido por Nunes et al. (2013).

Figura 10 - Secador híbrido de exposição indireta desenvolvido no LEMT/UFCG.



Fonte: Nunes et al. (2013)

Neste secador o produto a ser seco era colocado em bandejas, em uma câmara de secagem. A energia solar foi utilizada para aquecer o ar que vai para câmara de secagem.

Quando a energia solar não era suficiente ocorria um aquecimento adicional da câmara usando gás liquefeito de petróleo (GLP). A indicação para ativar o sistema auxiliar de GLP, para manter a temperatura no interior da câmara de secagem no valor apropriado, foi realizado por um sistema de monitoramento e aquisição de dados também desenvolvidos na UFCG.

Na Figura 11 pode-se observar um secador híbrido (solar-GLP) de exposição indireta construído na Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Figura 11 - Secador híbrido desenvolvido na Universidade Federal de Sergipe.

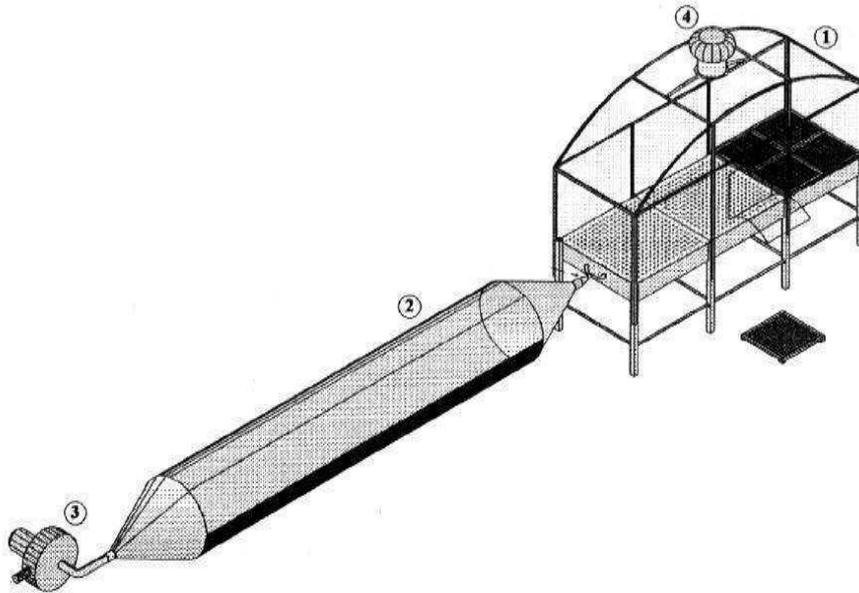


Fonte: Nunes (2016)

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 solar também utiliza GLP, como uma fonte auxiliar de energia. A câmara de secagem apresenta um volume muito grande quando comparado com o volume do coletor solar, isso dificulta a secagem do produto.

A Figura 12 mostra um sistema projetado por Costa (2008), na UFRN para secagem de frutas tropicais utilizando energia solar e eólica.

Figura 12 - Sistema projetado para secagem utilizando energia solar.



Fonte: Costa (2008)

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

Trata-se de um 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.

2.5 A 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.

Segundo Grilo (2007) é a partir do Sol que as plantas e os animais se desenvolvem e são seus resíduos que geram as fontes não renováveis, como petróleo, carvão e gás natural. Assim, também é a irradiação solar que induz a movimentação do ar ambiente gerando os ventos que são usados na energia eólica e causa a evaporação das águas possibilitando a energia hidrelétrica, caracterizando-se, também, como origem das energias renováveis. Dessa forma, a energia solar é a origem de quase todas as outras fontes de energia.

O emprego de fontes não renováveis, como as baseadas em combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) intensificam os riscos ambientais, enquanto que a utilização de fontes renováveis (solar, eólica, hidráulica) amenizam esses danos.

Daí decorre, nos tempos modernos, a busca incansável por mecanismos de geração de energia à base de fontes alternativas que amenizem os impactos ambientais. Em muitas partes do mundo, há uma consciência crescente de que as energias renováveis têm um papel importante a desempenhar na extensão da tecnologia para o agricultor em países em desenvolvimento, aumentando sua produtividade (WAEWSAK, CHINDARUKSA e PUNLEK, 2006).

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.

Como exemplo de restrição ao uso de energia de origem fóssil no processamento de alimentos, por determinação do Conselho Nacional de Petróleo, em 1980 foi proibida a utilização de qualquer derivado do petróleo na secagem de cereais, madeira e fumo, forçando os setores de armazenamento e secagem de produtos agrícolas a encontrar alternativas energéticas que substituíssem os combustíveis fósseis (SILVA, DONZELLES e CORRÊA, 2006).

Mesmo não sendo um tipo de energia massificada, devido à necessidade de um investimento inicial mais elevado, a energia solar representa uma das fontes mais limpas em relação ao impacto ambiental, o que deve ser considerado, no momento de escolha de investimentos neste setor.

As formas mais usuais de utilização tecnológica da energia solar, atualmente, são através da:

- **Arquitetura bioclimática:** as construções que são projetadas dentro do conceito de aproveitamento das condições ambientais locais economizam energia e água privilegiando a ventilação e a iluminação natural e o aproveitamento da água de chuva. É a chamada arquitetura verde que é cada vez mais utilizada por arquitetos e engenheiros.
- **Energia solar fototérmica:** é a utilização da energia proveniente do Sol como fonte de aquecimento de fluidos em geral, principalmente aquecimento de água para substituição do chuveiro elétrico e o aquecimento do ar ambiente usado nos processos de secagem de produtos agrícolas.
- **Energia solar fotovoltaica:** é a conversão direta de energia solar em energia elétrica através da irradiação incidente em painéis fotovoltaicos. Essa é a utilização mais nobre da energia solar, mas que ainda demanda um investimento inicial mais elevado comparativamente a outros processos de geração de eletricidade.

Em meio às diferentes formas de aproveitamento dessa energia, pode-se destacar o aproveitamento térmico e a transformação direta em energia elétrica como formas básicas que podem ser aplicadas nos procedimentos de secagem de alimentos.

2.5.1 Energia solar térmica

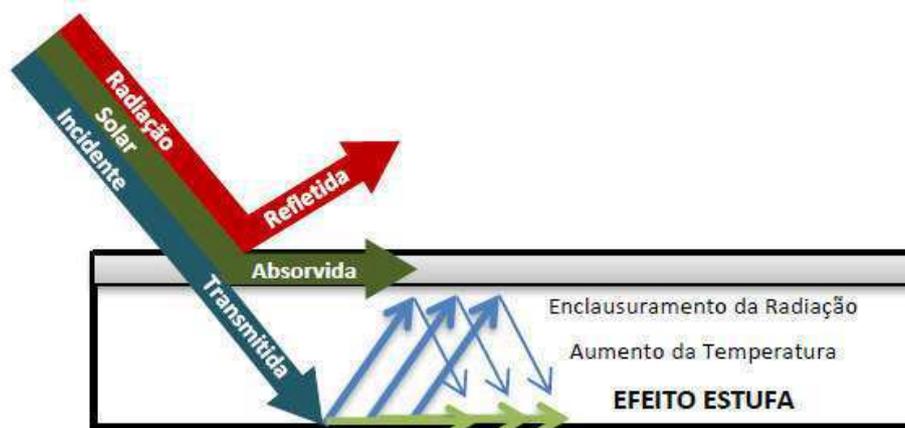
Essa forma térmica de aproveitar o potencial energético do Sol ocorre devido à absorção da irradiação solar que chega à superfície terrestre com o uso de coletores solares ou de concentradores solares.

Ao ser emitida pelo Sol, a radiação solar se propaga na forma de radiação eletromagnética com qualidade espectral em várias faixas de comprimento de onda. A radiação solar que chega a superfície da terra, ao nível do solo, tem comprimento de onda na faixa de 0,10 a 2,50 micrômetros, ou seja, é predominantemente radiação ultravioleta, radiação visível e radiação infravermelha (GRILO, 2007).

Essa radiação ao incidir sobre o coletor de energia solar atravessa a cobertura transparente sendo absorvida no interior do coletor solar, tendo como consequência o aumento da temperatura no interior do mesmo. Esse fenômeno conhecido como efeito estufa é o princípio de funcionamento dos sistemas de aquecimento que utilizam energia solar fototérmica.

Na Figura 13 é mostrado um esquema de funcionamento do efeito estufa a partir da energia solar.

Figura 13 - Representação esquemática do efeito estufa.



Fonte: Gomes (2015)

A energia obtida por meio de coletores solares é utilizada para o aquecimento de água ou ar, a temperaturas relativamente baixas com a finalidade de suprir, principalmente, as

necessidades residenciais. No entanto, o uso desse mecanismo nos setores industriais está tendo uma demanda cada vez maior.

Para aproveitar a energia solar a temperaturas mais elevadas faz-se necessário a utilização de concentradores solares, cujo princípio de funcionamento é a convergência da radiação solar, por meio de superfícies refletoras, de uma grande área para uma área muito menor, aumentando a temperatura incidente nessa área final.

2.5.2 Energia solar fotovoltaica

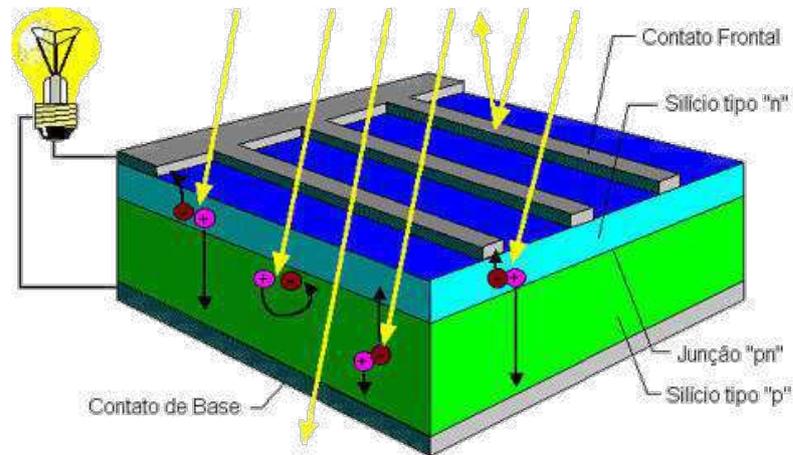
Segundo Braga (2008), a primeira vez que foi verificada a conversão direta de luz em energia elétrica foi em 1839, pelo físico Edmond Becquerel, onde se observou que, quando exposto à luz, ocorria uma diferença de potencial nas extremidades de um material semiconductor.

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 14.

Figura 14 - Representação esquemática de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Blue-sol (2011)

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.

2.6 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.

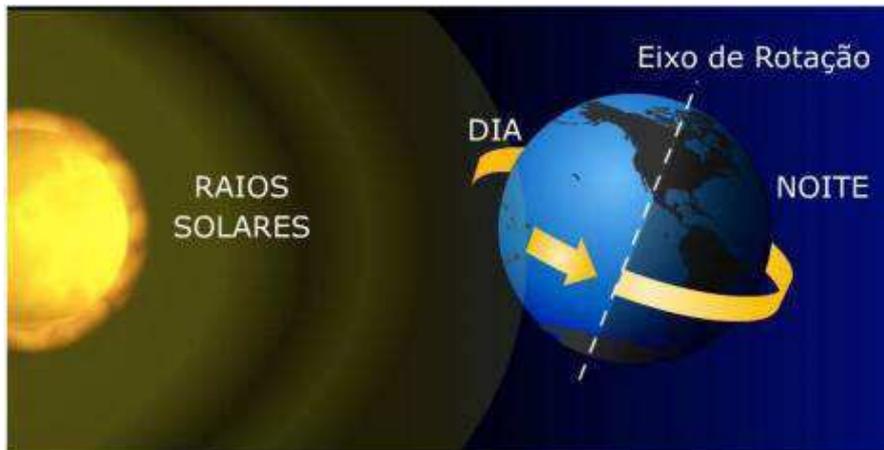
A fim de se obter um melhor aproveitamento da radiação solar, os coletores solares devem ser posicionados de forma que a incidência da radiação ocorra o mais perpendicularmente possível ao plano da superfície coletora.

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 aquecimento 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.

A representação deste movimento pode ser observada na Figura 15.

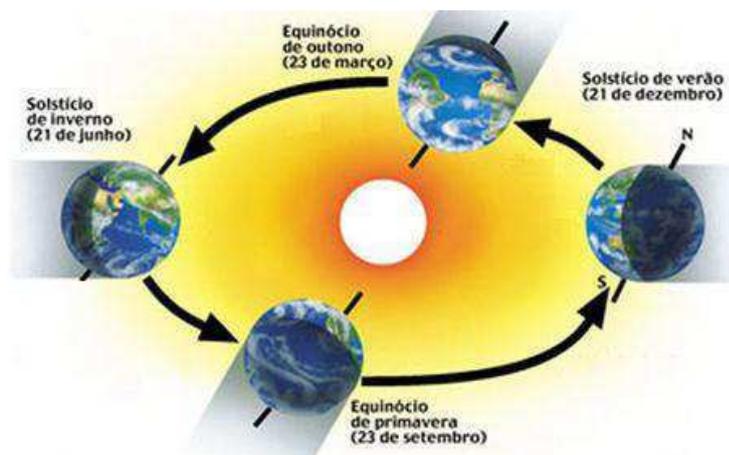
Figura 15 - Representação do movimento de rotação da Terra.



Fonte: http://www.escolamaxima.com.br/universomx/hmpgs/joaopa_luis/rotacao.htm. (2016)

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. Tal movimento pode ser visto representado na Figura 16.

Figura 16 - Representação do movimento de translação da Terra.



Fonte: <http://www.sobiologia.com.br/conteudos/Universo/sistemasolar2.php>. (2016)

Como pode ser visto, a quantidade e o ângulo de incidência da radiação solar sobre a superfície terrestre, para uma determinada localidade, variam ao longo do ano.

No dia 23 de março inicia-se a primavera no hemisfério Norte e o outono no hemisfério Sul. Em seguida, no dia 21 de junho, ocorre o início do verão no hemisfério Norte e do inverno no hemisfério Sul. Em setembro, dia 23, têm-se o início do outono no hemisfério Norte e da primavera no hemisfério Sul. Por fim, dia 21 de dezembro, acontece o início do inverno no hemisfério Norte e do verão no hemisfério Sul.

Segundo Grilo (2007), 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 radiação 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 radiação 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). Assim, neste trabalho, o secador solar ficou virado para o norte, com o coletor solar inclinado em um ângulo de 22° , ou seja, 15° mais 7° .

Capítulo III
MATERIAIS E MÉTODOS

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto de um sistema de secagem é uma atividade de elevado grau de dificuldade, uma vez que os processos de secagem envolvem formas complexas de transferência de calor e massa, principalmente quando se trata da concepção de um secador solar, cuja fonte de energia é intermitente ao longo do período de tempo de utilização, causando com isso grande variação dos parâmetros de temperatura e umidade do ar de secagem, importantes ao processo.

O secador desenvolvido neste trabalho é constituído de três subsistemas: um coletor solar, uma câmara de secagem e um sistema de convecção forçada para circulação do ar no interior do equipamento.

O interesse do estudo é que o equipamento possa retirar água da banana até um teor de umidade em base úmida obtido em processos industriais, ou seja, entre 20% e 25%. Assim, é muito importante o dimensionamento correto de cada componente do secador visto que, para se chegar a tais resultados no processo de secagem utilizando a energia solar, a manutenção dos níveis de energia no interior do equipamento é ideal, uma vez que ocasionalmente existe variações destes níveis em função das condições meteorológicas fazendo com que para cada condição de temperatura e umidade ambiental diferente exista uma condição diferente de equilíbrio do produto.

3.1 Metodologia

As atividades desenvolvidas nos experimentos foram realizadas no LEMT da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da UFCG.

A Figura 17 mostra uma foto do edifício Professor Júlio Goldfarb, onde está sediado o LEMT, localizado na cidade de Campina Grande-PB, que possui posição geográfica com latitude de 7° Sul e longitude de 36° Oeste, a cerca de 600 m de altura em relação ao nível do mar.

Figura 17 - Edifício Professor Júlio Goldfarb, sede do LEMT/UFPG.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 18 mostra o *solarium* do LEMT/UFPG, localizado no segundo e terceiro pavimento da estrutura, onde os equipamentos foram expostos ao sol, sendo possível a realização dos experimentos de secagem com o secador solar e adquiridos os dados necessários as análises do mesmo.

Figura 18 - *Solarium* do LEMT/UFPG.



Fonte: Próprio Autor

3.2 O produto e ser seco (a banana)

O fruto escolhido para ser analisado no trabalho foi a banana, devido principalmente sua representatividade na cultura agrícola e na economia do estado da Paraíba, além de possuir propriedades importantes que propiciam e favorecem o processo de secagem, como alto teor de umidade.

A banana escolhida para a realização dos experimentos foi a conhecida popularmente como banana prata, cujo nome científico é *Musa Spp.*, devido a ser uma das variedades de maior consumo na região e apresentar formato cilíndrico uniforme ao longo do seu comprimento. A Figura 19 apresenta, a título de exemplificação, a penca de banana prata (*Musa Spp.*) que foi utilizada no Experimento 1.

Figura 19 - Banana prata (*Musa Spp.*) utilizada no Experimento 1.



Fonte: próprio autor

Os frutos foram adquiridos no comércio local, junto a pequenos produtores da região, nas feiras livres da cidade, estando ausentes de danos físicos e/ou deterioração provenientes de insetos e/ou fungos.

As bananas utilizadas nos experimentos estavam em perfeito estado de maturação, próprio para consumo imediato. Isto indica um tempo de prateleira de aproximadamente 7 a 10 dias, sob pena de ficarem impróprias para o consumo. Tal análise é feita através de degustação do fruto além de inspeção visual do fruto ainda com casca.

Para avaliação do teor de umidade inicial e final da banana prata (descascada) e a massa seca das amostras de banana ao fim de cada experimento fez-se uso de um método direto de avaliação, sendo utilizada a estufa da UFCG, com circulação mecânica, fabricada pela FANEM modelo 320E, com controlador digital de temperatura, mostrada na Figura 20.

Figura 20 - Estufa utilizada nos experimentos.



Fonte: Próprio autor

Na medição do teor de água presente, as bananas prata utilizadas nos experimentos apresentaram teor de umidade inicial em torno de 65% a 70% em base úmida.

Os valores da massa seca e teores de umidade obtidos em cada experimento estão apresentados nas tabelas do Capítulo IV (Resultados e Discussões).

Para realizar cada um dos experimentos as bananas eram descascadas e tratadas com gotas de limão para deixá-las com uma coloração mais dourada e impedir o seu escurecimento após a secagem. Além disso, as bananas foram cortadas longitudinalmente, e tiveram as suas extremidades (calotas esféricas) removidas, ficando assim com formatos mais próximos de semicilindros retos. A Figura 21 mostra algumas bananas cortadas nesta configuração, antes do experimento.

Figura 21 - Bananas tratadas antes dos experimentos.



Fonte: Próprio autor

3.3 Desenvolvimento do secador solar

O grande desafio do uso da energia solar é sua intermitência ao longo do ano e durante o dia. Assim, a grande dificuldade do trabalho é projetar a câmara de secagem do sistema com características que a torne capaz de manter a temperatura do ar de secagem no seu interior sem grandes variações e de preferência 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 exagerado de energia elétrica, quando em operação, porque, no caso, ocorre uma conversão de energia elétrica em energia térmica, gerando com isso, um elevado custo de manutenção do equipamento e do produto final produzido.

3.3.1 Materiais utilizados na construção do secador

Para desenvolver um equipamento que agregasse elevada eficiência energética e baixo custo, mas que pudesse ter sua tecnologia assimilada pelos pequenos produtores da região, permitindo-os desenvolver seus próprios equipamentos, os materiais utilizados para construção do coletor solar e da câmara de secagem foram selecionados de maneira a atender esses requisitos básicos.

Dessa forma, foram utilizados materiais facilmente encontrados no comércio local, tais como:

- **Painel 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 na confecção de 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;
- **Policarbonato alveolar:** material elaborado à base de resina, que oferece transmissividade elevada à radiação 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 apresenta elevada capacidade absorptiva e condutiva, 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 e o sistema de medição de temperatura e umidade 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;
- **Arduíno:** plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre e de placa única, projetada com um micro controlador com suporte de entrada e saída embutidos. Possui linguagem de programação padrão em C/C++ onde objetivo do projeto é criar ferramentas que são acessíveis, com baixo custo, flexíveis e fáceis de serem usadas por profissionais e amadores. Neste trabalho foram utilizados 3 sensores de temperatura e umidade do tipo (TH11) posicionados em pontos estratégicos do secador e ligados à uma placa controladora que fazia a leitura dos dados de um em um minuto, gravava-os em um cartão de memória, além de mostrá-los em um *display* de cristal líquido para acompanhamento em tempo real.

Nas Figuras 22 e 23 são apresentadas as vistas em perspectiva e superior, respectivamente, do sistema de secagem desenvolvido, permitindo uma visão ampla do equipamento e cada parte que o compõe.

Conforme pode ser visto nas figuras, o sistema construído neste trabalho possui como características construtivas: um coletor solar com volume interno de $0,175 \text{ m}^3$ com uma telha de fibrocimento pintada de preto fosco no seu interior para melhor absorção da energia e cobertura de policarbonato alveolar, que proporciona elevada transmissividade da luz solar para o interior do coletor, causando com isso o efeito estufa desejado. Outro componente do secador solar é a câmara de secagem, a qual possui volume interno $0,035 \text{ m}^3$, com uma bandeja no seu interior para ser colocados os frutos a serem secos e, na saída da câmara de secagem um *cooler* acionado por um painel fotovoltaico com o intuito de promover a circulação forçada de ar no interior do secador. Três sensores tipo TH11 foram colocados na entrada do coletor solar, na junção do coletor com a câmara e na saída da câmara de secagem e conectados a uma placa Arduino com a função de medir em tempo real a temperatura e umidade relativa do ar no interior do mesmo.

Figura 22 - Vista em perspectiva do protótipo.



Fonte: Próprio autor

Figura 23 - Vista superior do protótipo.



Fonte: Próprio autor

3.3.2 Desenvolvimento do coletor solar

O coletor solar, mostrado na Figura 24, é o equipamento responsável pelo aquecimento do ar ambiente que vai ser utilizado para retirar água do produto a ser seco.

Figura 24 - Coletor solar desenvolvido no trabalho.



Fonte: Próprio autor

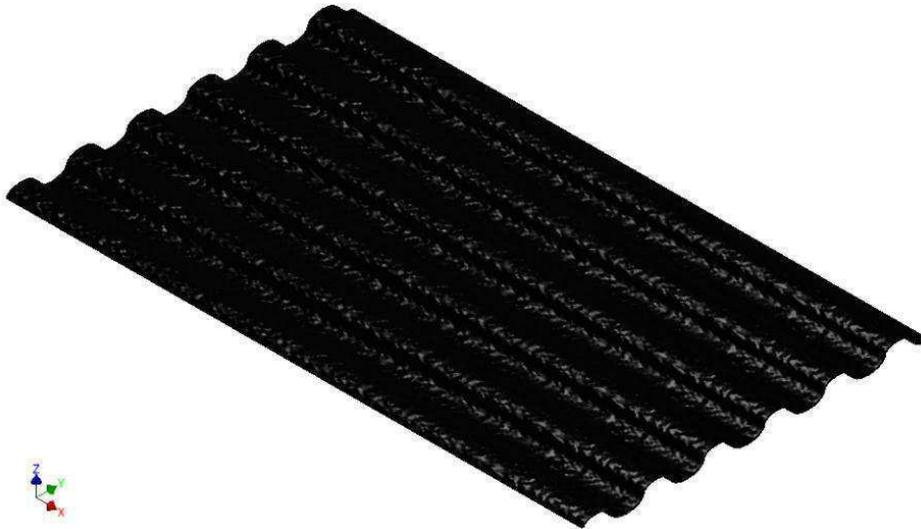
O princípio de funcionamento do coletor solar é baseado no efeito estufa, onde parte da radiação solar incidente na cobertura do coletor é transferida para o interior do coletor devido a elevada transmissividade do material da cobertura, que neste trabalho é de policarbonato. Após essa parcela da radiação solar transpassar a cobertura do coletor solar, ocorre o enclausuramento da mesma, havendo conseqüentemente o aumento da temperatura no interior do equipamento. Trata-se da conversão da radiação eletromagnética proveniente da energia solar em energia térmica para o ar ambiente.

No projeto de um coletor solar deve-se levar em consideração inicialmente sua aplicação. Os coletores solares aplicados à exposição direta possuem um dimensionamento diferente dos coletores de exposição indireta. Nos secadores indiretos, a função do coletor solar, além de aquecer o ar de secagem, é também manter a temperatura no interior do coletor elevada e o mais constante possível, disponibilizando e entregando à câmara de secagem um ar de secagem em quantidade e com qualidade térmica capaz de promover o processo de secagem da banana na câmara de secagem.

Para obtenção destas características, foi utilizada uma telha de fibrocimento de 4 mm de espessura, pintada de preto fosco e posicionada inicialmente dentro do coletor, de forma que suas saliências ficaram transversais ao sentido do fluxo de ar, que funciona como um capacitor térmico.

A Figura 25 mostra uma representação (projetada em software) da telha de fibrocimento utilizada no secador solar como capacitor térmico.

Figura 25 - Representação do capacitor térmico.



Fonte: Próprio autor

O objetivo desta telha é de funcionar como capacitor térmico no interior do coletor solar. Ela armazena energia proveniente do Sol em momentos de maior irradiação e vai liberando esse calor aos poucos, em momentos que a irradiação solar está disponível em menores quantidades, reduzindo assim a variação de temperatura no interior do coletor e atenuando os efeitos da intermitência da incidência da irradiação solar.

Outro fator importante levado em consideração no desenvolvimento do coletor solar, foi de o mesmo ter que possuir uma área de recepção da incidência solar suficiente para aquecer o ar contido no seu volume interno, e esse ganhar energia suficiente para chegar a câmara de secagem com capacidade de secar a banana.

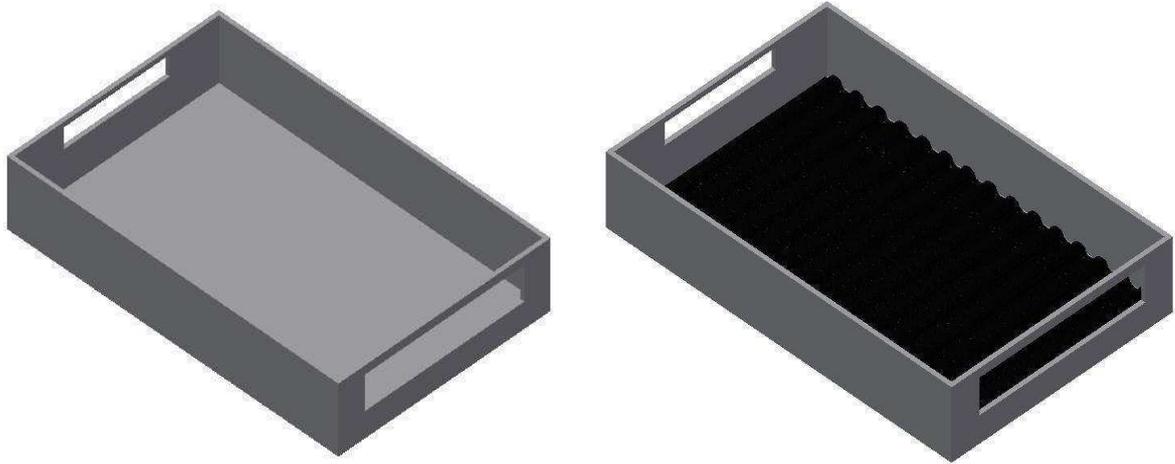
No presente trabalho o coletor solar construído possui dimensões de 1,25 m de comprimento, 0,80 m de largura e 0,20 m de profundidade confeccionado com placas de MDF Ultra de 15 mm de espessura.

Para análise dos efeitos deste capacitor térmico, foram executados experimentos com a telha posicionada de forma que seus picos e vales estivessem transversais ou longitudinais em relação ao sentido do movimento do ar.

A Figura 26 mostra uma representação do de projeto do coletor solar construído, bem como uma das formas (transversal) de posicionamento da telha de fibrocimento no seu interior.

No Apêndice B são apresentados os projetos de construção do coletor e de outras partes do secador, além de suas respectivas dimensões.

Figura 26 - Representação esquemática do coletor solar construído.



Fonte: Próprio autor

As dimensões citadas anteriormente proporcionam ao coletor uma área de incidência de $1,0 \text{ m}^2$ e volume interno de $0,175 \text{ m}^3$ (175 litros). Vale salientar que o coletor ainda possui abertura para entrada do ar medindo $0,60 \text{ m} \times 0,10 \text{ m}$ e para a saída $0,40 \text{ m} \times 0,06 \text{ m}$, tendo assim áreas para entrada e saída do ar medindo respectivamente $0,06 \text{ m}^2$ e $0,024 \text{ m}^2$.

3.3.3 Desenvolvimento da câmara de secagem

A câmara de secagem é o componente do secador solar onde o produto a ser seco é colocado a fim de receber a ação do ar de secagem, promovendo, assim, as trocas de calor e massa necessárias ao processo de secagem. A câmara construída neste trabalho, apresenta em seu interior apenas uma bandeja para a deposição dos frutos.

A Figura 27 mostra a câmara de secagem desenvolvida neste trabalho.

Figura 27 - Câmara de secagem desenvolvida no trabalho.



Fonte: Próprio autor

Durante o processo de desenvolvimento da câmara de secagem, baseando-se empiricamente em trabalhos desenvolvidos no LEMT/UFCG e na literatura da área de secagem, percebeu-se a necessidade de que seu volume interno fosse menor que o volume interno do coletor solar. A proporção de 1:5 escolhida se deu pela necessidade de se estudar os fenômenos ocorridos nesta escala e comparar os resultados com estudos realizados anteriormente no LEMT/UFCG, em que a escala de 1:3 já havia sido testada por Nunes (2016).

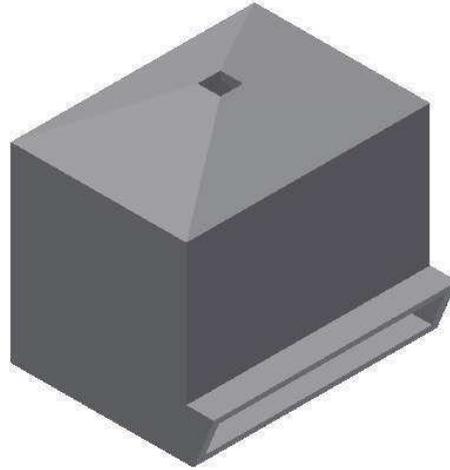
Quanto ao volume da câmara ser menor que o do coletor, o objetivo com isso, é garantir um grande volume de ar de secagem com as características termodinâmicas oriundas do coletor e ensejadas na câmara. Como tais características termodinâmicas do ar, podem ser citadas baixa umidade relativa do ar e elevada temperatura (abaixo de 70°C). Como ao longo do dia o fornecimento de energia solar é intermitente, o projeto de uma câmara de secagem é fundamental para a manutenção dessas características de forma que ocorra a menor variação de temperatura possível no seu interior.

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 câmara de secagem desenvolvida no presente trabalho possui 0,31 m de profundidade, 0,43 m de largura e 0,34 m de altura. Na parte superior existe ainda uma espécie de pirâmide de base 0,43 m x 0,31 m 0,06 m que direciona o ar contido no seu interior para onde se localiza a saída de ar. Toda a câmara de secagem foi confeccionada em MDF Ultra de 15 mm de espessura.

A Figura 28 mostra uma representação da câmara de secagem construída.

Figura 28 - Representação esquemática da câmara de secagem construída.

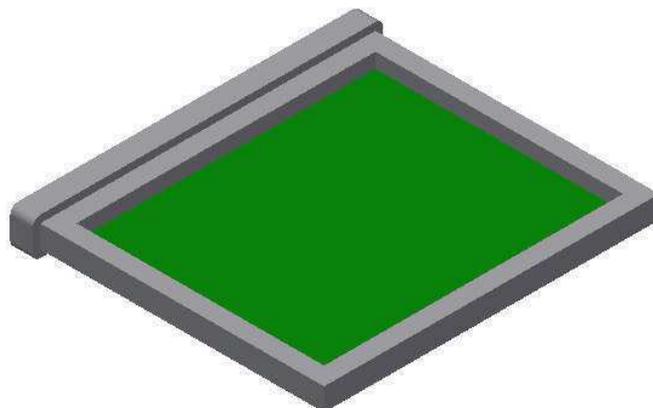


Fonte: Próprio autor

A câmara de secagem tem um volume interno de aproximadamente $0,04 \text{ m}^3$ (40 litros). Esta ainda possui uma entrada de ar com mesmas dimensões da saída de ar do coletor e área de saída no topo de $0,002 \text{ m}^2$ ($0,04 \text{ m} \times 0,04 \text{ m}$).

No interior da câmara existe disposta no centro médio de sua altura uma bandeja para se colocar os produtos a serem secos. Tal bandeja é representada na Figura 29.

Figura 29 - Representação esquemática da bandeja de secagem construída.



Fonte: Próprio autor

A bandeja desenvolvida é inserida na câmara sob a forma de gaveta a uma distância de 147 mm do fundo da câmara de secagem, e possui dimensões de 0,19 m de comprimento e 0,22

m de largura com espessura de 15 mm, sendo confeccionada também em MDF Ultra de 15 mm. As frutas são colocadas na bandeja sobre tela *nylon*, que dispõe de uma área de 0,032 m².

3.3.4 Desenvolvimento do sistema de exaustão

A chaminé consiste num dispositivo de exaustão onde é promovida a retirada forçada do ar de secagem do interior da câmara de secagem, proporcionando assim uma melhor circulação de ar no interior do secador solar, por meio da utilização de um *cooler* da marca GC de 12 Volts e 0,15 Ampères do tipo usado em computador, sendo acionado por um painel fotovoltaico de 12 Volts e 6 Watts.

A Figura 30 mostra a montagem do sistema de exaustão utilizado no trabalho.

Figura 30 - Montagem do sistema de exaustão do secador.



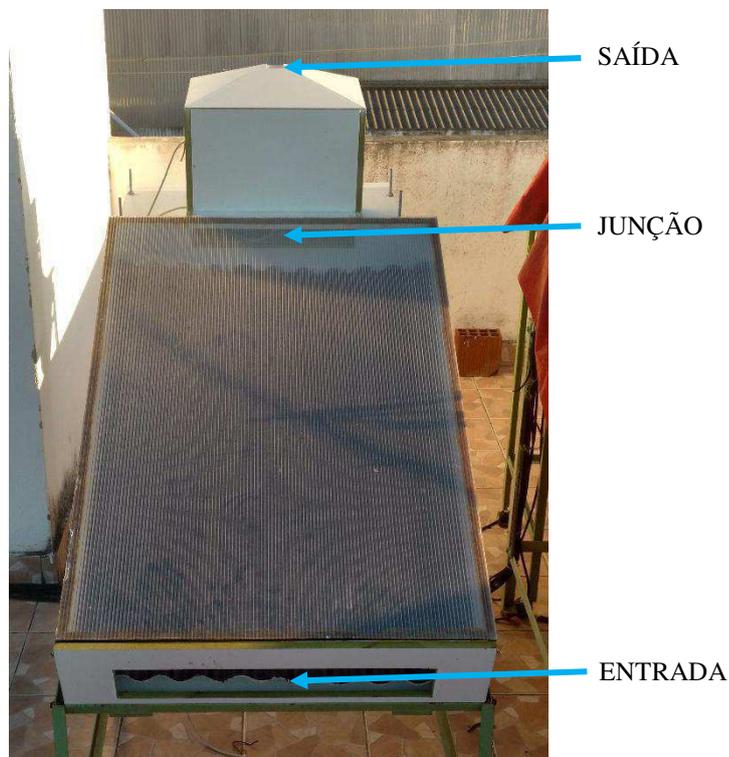
Fonte: Próprio autor.

3.3.5 Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados

As medidas de umidade e temperatura do ar de secagem são fundamentais para observar suas variações ao longo do dia e ensejar medidas para o seu controle de forma a obter condições de otimizadas dessas variáveis no processo de secagem. Para isso, faz-se necessário a medição destas variáveis em diversos pontos do sistema de secagem, como por exemplo: na entrada, no interior e na saída do coletor solar, além de na entrada, no interior e na saída da câmara de secagem, bem como no meio externo ao equipamento, avaliando desta forma, as condições ambientais.

Para realizar estas medições e permitir uma avaliação das variáveis intrínsecas ao 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 deste trabalho. Tal sistema de medição foi confeccionado no sistema Arduino utilizando três sensores de temperatura e umidade do tipo TH11. Estes sensores foram posicionados na estrada do coletor solar, na saída do coletor solar (entrada da câmara de secagem), e saída da câmara de secagem (logo após a bandeja de deposição das frutas), conforme mostrado na Figura 31.

Figura 31 - Posicionamento dos sensores TH11 no secador solar.



Fonte: Próprio autor

Onde a nomenclatura “entrada, junção e saída”, no decorrer do trabalho, para melhor didática, foi representada pelas letras “E, J e S”, respectivamente. A distribuição dos sensores, como mostrada na Figura 31, dá a possibilidade de acompanhamento da variação da qualidade do ar em todo o seu trajeto dentro do secador.

3.3.5.1 O Arduino e suas características

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 livre.

Um micro controlador, também denominado MCU (*Multipoint Control Unit*), é um computador *on-chip*, que contém processador, memória e periféricos de entrada/saída, e pode ser programado para funções específicas, em contraste com outros microprocessadores de propósito geral (como os utilizados nos computadores).

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 (binário) 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.

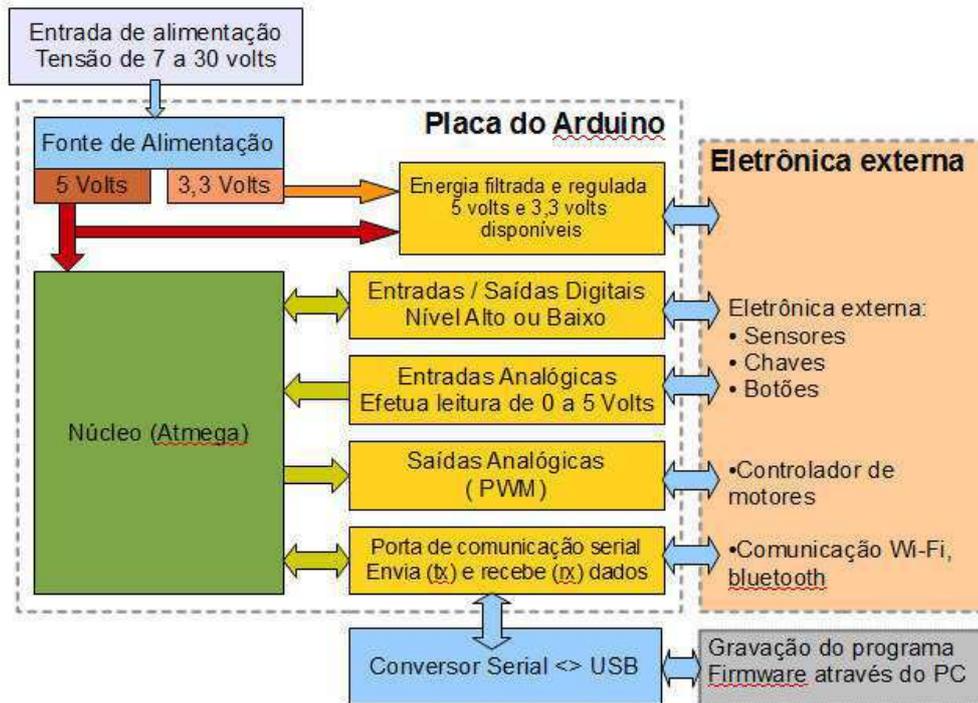
Existem diversas versões do Arduino para múltiplas aplicações, no caso proposto foi empregado a versão do Arduino UNO (Arduino de uma única placa) que é uma das versões mais popular da plataforma e é dotada de um ATmega328 como processador.

Na placa existem 14 pinos de E/S digitais, onde 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 32 apresenta a arquitetura de hardware da placa de Arduino e esquematiza a interface entre seus blocos.

Figura 32 - Arquitetura de hardware da placa de Arduino.



Fonte: Daniel Basconcello Filho (Robotizando, 2016)

A Figura 33 mostra a distribuição dos blocos e seus posicionamentos na placa Arduino.

Figura 33 - Distribuição dos blocos na placa Arduino.



Fonte: Daniel Basconcello Filho (Robotizando, 2016)

A seguir é apresentado cada um desses blocos e algumas de suas características individuais:

- **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.
- **Unidade Central de Processamento (CPU):** 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 2kB de memória RAM (Memória de Acesso Randômico) e 32kB de memória flash (memória secundária).
- **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 ou saída digital, ou seja, são pinos capazes de ler valores de tensão entre 0 V e 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 entradas e saídas 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.

Neste trabalho a leitura dos dados (temperatura e umidade relativa do ar) é feita a cada um minuto e estes são mostrados em um display de LCD (*Liquid Crystal Display*) automaticamente. Além disso, estes dados também são gravados em forma de média numa leitura de 10 em 10 minutos. Para esta gravação, 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 fosse contínua e de forma autônoma.

Na Figura 34 é apresentado o Arduino utilizado no experimento e a caixa que foi desenvolvida para que o mesmo fique dentro, protegido das intempéries ocasionais, presentes nos momentos de execução de experimentos.

Figura 34 - Sistema de aquisição de dados (Arduino) em sua caixa de proteção.



Fonte: Próprio autor

A Figura 35 mostra a parte externa da caixa de proteção do Arduino, onde se pode ver o compartimento para inserção com o próprio cartão SD e o *display* de LCD mostrando uma leitura de temperatura e umidade relativa.

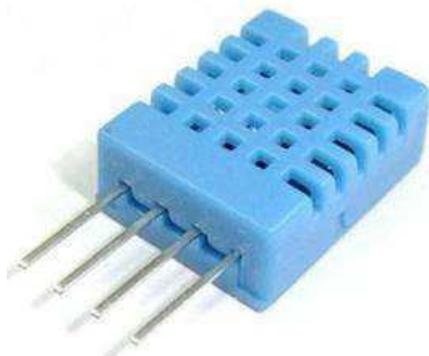
Figura 35 - Apresentação do compartimento do cartão SD e do display LCD.



Fonte: Próprio autor

A Figura 36 mostra o sensor do tipo TH11, responsável pela leitura dos dados de temperatura e umidade relativa do ar e enviá-los a placa Arduino.

Figura 36 - Sensor TH11 para leitura de temperatura e umidade relativa do ar.



Fonte: Arduino e Cia. (2013)

As umidades relativas e as temperaturas do ar de secagem medidas, nas diversas posições de interesse, ao longo do dia, são registradas em uma tabela, onde têm-se os valores expostos separadamente para cada variável medida em cada sensor, especificamente.

A Tabela 01 mostra o modelo da tabela utilizada para coleta e apreciação dos dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem nos diversos experimentos realizados.

Tabela 01 - Modelo de tabela de distribuição de temperatura e umidade no secador.

Data	Tempo de Experimento (min)	Hora	Temperatura			Umidade Relativa		
			$T_e(^{\circ}C)$	$T_j(^{\circ}C)$	$T_s(^{\circ}C)$	$UR_e(\%)$	$UR_j(\%)$	$UR_s(\%)$
//_	0	09:00						
	60	10:00						
	120	11:00						
	180	12:00						
	240	13:00						
	300	14:00						
	360	15:00						
	420	16:00						

Fonte: Próprio autor

Onde:

T_e = Temperatura do ar medida na entrada do coletor solar ($^{\circ}C$);

T_j = Temperatura do ar medida na junção do coletor solar com a câmara de secagem ($^{\circ}C$);

T_s = Temperatura do ar medida na saída da câmara de secagem ($^{\circ}C$);

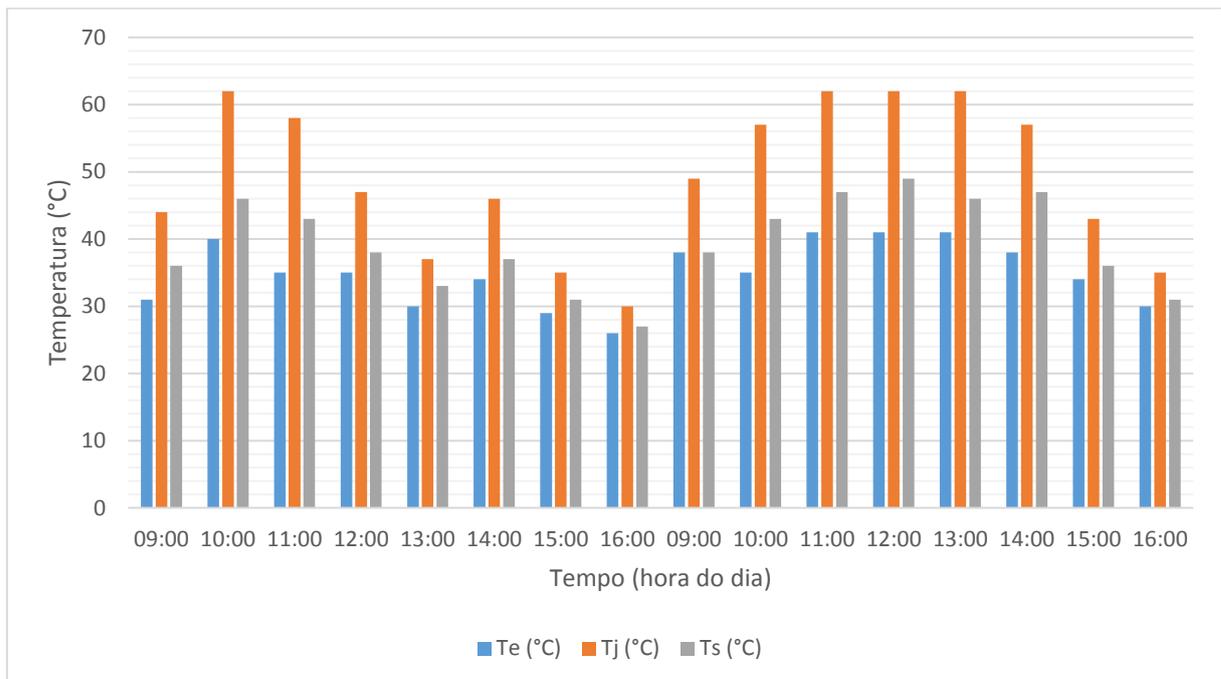
UR_e = Umidade relativa do ar medida na entrada do coletor solar (%);

UR_j = Umidade relativa do ar medida na junção do coletor solar com a câmara de secagem (%);
 UR_s = Umidade relativa do ar medida na saída da câmara de secagem (%).

Os valores de temperatura e umidade relativa do ar inseridos nas tabelas servem de base para obter outras variáveis importantes, como por exemplo, a entalpia específica nos pontos desejados. Além disso, estes dados da tabela podem ser plotados em gráficos que permitem observar a variação dessas variáveis em cada sensor, ou seja, em cada ponto do secador solar ao longo de um dia de experimento.

O Gráfico 01 mostra um exemplo destes tipos de gráficos. No caso mostrado, tem-se um modelo do gráfico de variação de temperatura ao longo de um determinado experimento.

Gráfico 01 - Modelo de gráfico de distribuição da temperatura em um experimento.



Fonte: Próprio autor

Onde “Te, Tj e Ts” são as temperaturas coletadas pelos sensores na entrada do coletor solar, na saída do coletor solar (junção com a câmara de secagem) e na saída da câmara de secagem, respectivamente.

Além do uso do sistema Arduino, utilizou-se um termo-higrômetro de fabricação Minipa e modelo MT-240 para a coleta dos dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente (fora do secador solar).

A Figura 37 mostra o aparelho utilizado na realização dos experimentos.

Figura 37 - Termo-higrômetro Minipa MT-240.



Fonte: Próprio autor

3.4 A utilização da energia solar

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. Com isso, é de se pensar na grande incoerência que há no fato de se utilizar energia elétrica para se gerar calor em um fluido para o processo de secagem. 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 isto, faz-se necessário utilizar essa fonte de energia associada a outras fontes para que se obtenha o máximo controle na regularidade do recurso energético, bem como dos parâmetros termodinâmicos essenciais, ao longo do processo de secagem.

Nesta dissertação foi utilizado apenas o recurso solar como fonte energética o que já se mostrou um problema que precisa ser repensado no processo de desenvolvimento de futuros sistemas de secagem. Uma possibilidade para resolver tais oscilações climáticas seria a utilização de sistemas híbridos como solar-GLP, solar-gás natural, solar-elétrico, etc.

Para determinação da radiação solar incidente, e conseqüentemente, da potência solar por unidade de área (W/m^2), foram utilizados dados da estação meteorológica da UFCG, através do piranômetro, modelo CM21, fabricado pela Kipp & Zonen mostrado na Figura 38.

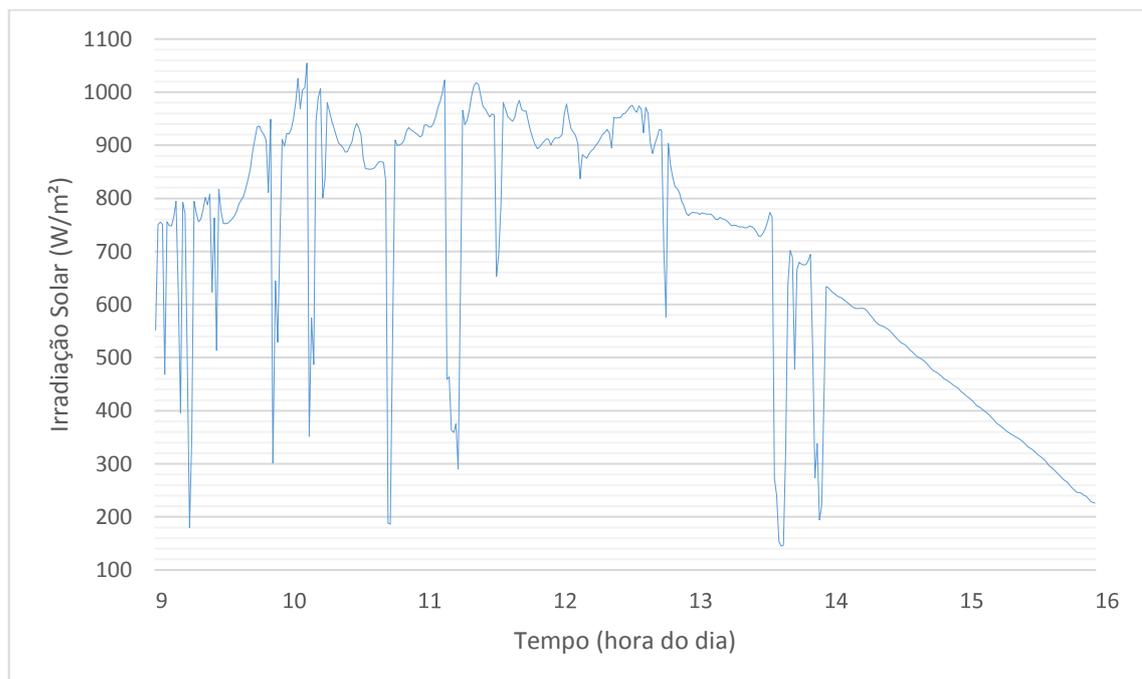
Figura 38 - Piranômetro estação meteorológica da UFCG.



Fonte: Próprio autor

Com os dados da intensidade da radiação solar incidente para cada instante obtidos na estação meteorológica é possível plotar gráficos, como mostrado por exemplo no Gráfico 02 a seguir, onde é possível observar a variação dessa irradiação em função do tempo.

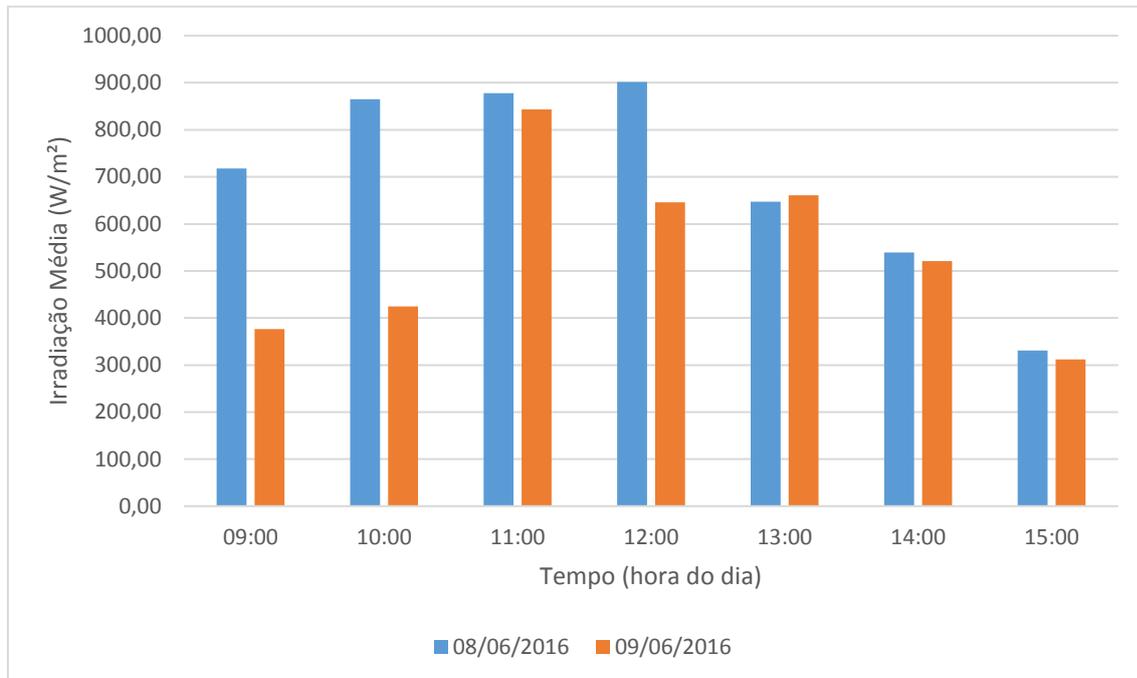
Gráfico 02 - Variação da irradiação solar durante experimento.



Fonte: Próprio autor

A determinação da distribuição de irradiação média para cada hora do dia fica melhor apresentada na forma do Gráfico 03.

Gráfico 03 - Média da irradiação solar a cada hora de experimento.



Fonte: Próprio autor

A vantagem desse tipo de gráfico é que ele permite observar a variação, a cada hora, ao longo do dia mostrando claramente a interferência de nuvens e de outros fenômenos climáticos que acaba se refletindo na variação de temperatura do ar de secagem.

Para obtenção deste tipo de gráfico, a irradiação solar média foi calculada pela Equação 08.

$$\overline{Rad} = \frac{\sum Rad}{n} \quad (08)$$

Onde:

\overline{Rad} = Irradiação solar média $\left(\frac{W}{m^2}\right)$;

Rad = Irradiação solar verificada $\left(\frac{Wh}{m^2}\right)$;

n = Número de verificações (h).

3.5 O processo de secagem

Neste trabalho estão apresentados os resultados dos testes experimentais realizados no equipamento. Dentre os diversos testes realizados e seus respectivos resultados obtidos, foram escolhidos quatro experimentos, nomeados como Experimento 1 (E1), Experimento 2 (E2), Experimento 3 (E3) e Experimento 4 (E4), que foram realizados nos dias:

- E1 – dias 25 e 26 de abril de 2016, Outono;
- E2 – dias 16, 17 e 18 de maio de 2016, Outono;
- E3 – dias 08 e 09 de junho de 2016, Outono;
- E4 – dias 21 e 22 de julho de 2016, Inverno.

Os dados coletados na realização de cada um desses experimentos podem ser visualizados nas Tabelas do Capítulo IV e no 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.

Cada um dos experimentos de secagem durou cerca de 07 horas por dia, tendo início às 9:00 h da manhã e finalizando-se às 16:00 h, durante dois dias, num total de 14 horas.

Os dados experimentais referentes à variação da massa do produto durante o processo de secagem, foram obtidos em intervalos regulares de 01 (uma) hora, fazendo-se a retirada da banana do secador e medindo-se sua massa com uso de uma balança digital modelo i2000 da marca ZGP com precisão de 0,1 g, mostrada na Figura 39.

Figura 39 - Balança digital marca ZGP modelo i2000, utilizada no trabalho.



Fonte: Próprio autor.

A medida da massa observada em cada instante de cada experimento, foi registrada numa tabela, conforme o modelo mostrado a seguir, na Tabela 02, em que constam para cada experimento, o tempo em que ocorre a medição e a respectiva massa, além de outros dados que são calculados em seguida.

Tabela 02 - Tabela utilizada para registrar e calcular os dados de massa.

Data	Tempo de experimento (min)	Hora do dia (h)	Massa total (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	RU (adimensional)
	0	09:00					
	60	10:00					
	120	11:00					
	180	12:00					
/ /					
					
	Última medição	16:00					

Fonte: Próprio autor

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 (RU).

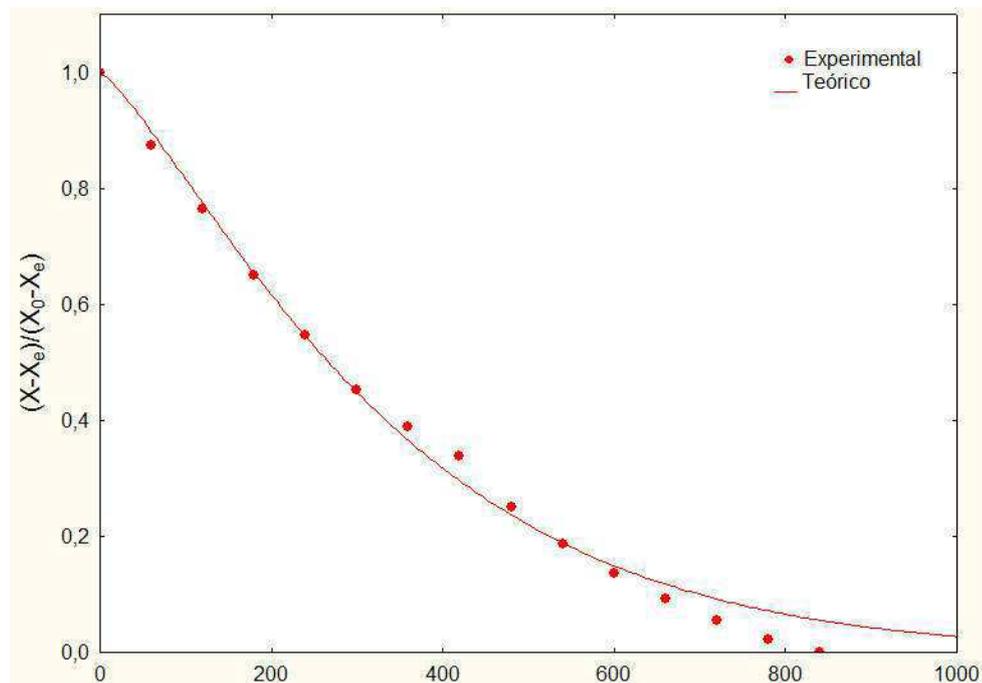
3.5.1 Determinação das curvas de secagem

Segundo Cano-Chauca et al. (2004), as curvas de secagem permitem predizer o momento do processo no qual se atinge o teor de umidade desejado e desta forma obter produto de boa qualidade.

A velocidade com a qual um alimento perde água, quando ele passa por um processo de secagem, não é constante ao longo do processo. Geralmente, com o progresso da secagem, a taxa de remoção de água diminui. Na prática, em condições normais de operação, o nível zero de umidade dificilmente é alcançado (FIOREZE, 2004).

As curvas de secagem, também conhecidas como curvas de cinética de secagem são plotadas em gráficos cujo exemplo pode ser visto no Gráfico 04. Como pode ser observado estes gráficos apresentam a relação entre a razão de umidade em função do tempo de secagem.

Gráfico 04 - Modelo de curva de secagem ajustada pelo modelo de Page.



Fonte: Próprio autor

No Gráfico 04, se apresenta um exemplo de curva de secagem ajustada pelo modelo matemático de Page, os pontos na curva representam os valores reais obtidos experimentalmente para a razão de umidade, e a linha cheia representa o ajuste dos pontos ao modelo matemático proposto.

Convencionou-se a utilização de modelos semi teóricos, para predizer o processo de secagem, devido o menor tempo de solução requerido em relação aos modelos teóricos, além de não serem necessárias considerações quanto à geometria do produto, difusividade mássica e propriedades termo físicas (CONDE, 2004).

Para obtenção das curvas experimentais de secagem em cada experimento foram calculadas a Razão de Umidade (RU), através da Equação 09.

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (09)$$

Onde:

RU = Razão de umidade (adimensional);

X = Teor de umidade em base seca (adimensional);

X_e = Teor de umidade de equilíbrio em base seca (adimensional);

X_0 = Teor de umidade inicial em base seca (adimensional).

Assim, 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 2016 e ajustado ao modelo matemático de Page, mostrado na Tabela 03, utilizando-se o programa computacional *Statistica* versão 7.0, onde se determina o coeficiente de determinação “ R^2 ” para verificar a predição do processo. Onde esse coeficiente de determinação varia de 0 a 1 (0% a 100%) e representa o quanto do processo experimental realizado pode ser representado pela curva teórica do modelo escolhido.

Tabela 03 - Modelo matemático empregado para ajustes das curvas de secagem.

Modelo	Equação	Referência
Page	$RU = exp(-k \cdot t^n)$	Orikasa et al. (2008)

Fonte: Próprio autor.

3.6 Análise energética do desempenho

Para ser avaliado, o desempenho do sistema de secagem proposto deve ser analisado sob dois pontos de vista: O desempenho do equipamento propriamente dito e a eficiência do processo ao qual se destina. Pois se trata de um equipamento térmico destinado a promover a secagem de produtos agrícolas.

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 final da banana, em relação à massa inicial de água no produto.

Neste trabalho, foram coletados os dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem na entrada e na saída do coletor solar e da câmara de secagem. Isto possibilita o cálculo do rendimento do coletor solar e, portanto, do secador solar utilizando duas metodologias. A partir da aplicação do balanço de energia aplicado a cada componente do sistema de secagem, quando se utiliza os dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem e/ou através da equação de rendimento pelo método da potência útil, quando se utiliza apenas os dados de temperatura do ar de secagem.

3.6.1 Cálculo do rendimento térmico a partir do balanço energético

Nesta forma de cálculo, utilizam-se os conceitos termodinâmicos derivados da conservação da massa e da primeira lei da termodinâmica. Para isso, foi necessário levantar os dados de temperatura e umidade relativa do ar, sendo este último, essencial no que se refere a diferença entre este método e o método baseado na potência útil (já aplicado em trabalhos anteriormente) em que não é necessário ter conhecimento da variação de umidade dentro do equipamento que está sendo analisado, e sim apenas de temperatura. Neste trabalho, mesmo obtendo os dados necessários de umidade relativa, foram feitos os cálculos pelas duas metodologias, ou seja, pelo balanço energético e pela potência útil.

3.6.1.1 Conceitos termodinâmicos

Para avaliação do desempenho do secador, alguns conceitos termodinâmicos e da transferência de calor e massa foram aplicados 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, foi possível obter a equação usada para calcular a eficiência térmica do coletor solar e, conseqüentemente do secador solar como um todo.

Para obter os valores da eficiência térmica é necessário medir a temperatura, a umidade relativa e a velocidade do ar de secagem na entrada e na saída de cada componente.

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

3.6.1.2 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 expressão é representada pela Equação 10:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (10)$$

Onde:

$\frac{dm_{vc}}{dt}$ = Variação da massa contida no volume de controle ao longo do tempo $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

\dot{m}_e = Vazão mássica instantânea de entrada de ar no volume de controle $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

\dot{m}_s = Vazão mássica instantânea de saída de ar no volume de controle $\left(\frac{kg}{s}\right)$.

3.6.1.3 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, matematicamente este enunciado é representado pela Equação 11.

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (11)$$

Onde:

$\frac{dE_{vc}}{dt}$ = Taxa temporal da variação da energia contida no volume de controle (W);

\dot{Q}_{vc} = Taxa de transferência de calor através da fronteira do volume de controle (W);

\dot{W}_{vc} = Taxa de transferência de trabalho através da fronteira do volume de controle (W);

\dot{m}_e = Vazão mássica na entrada do volume de controle $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

\dot{m}_s = Vazão mássica na saída do volume de controle $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

h_e = Entalpia específica do ar na entrada no volume de controle $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

h_s = Entalpia específica do ar na saída no volume de controle $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

v_e^2 = Velocidade do ar na entrada do volume de controle $\left(\frac{m}{s}\right)$;

v_s^2 = Velocidade do ar na saída do volume de controle $\left(\frac{m}{s}\right)$;

g = Aceleração da gravidade $\left(\frac{m}{s^2}\right)$;

z_e = Valor absoluto da posição vertical (altura) da entrada do volume de controle (m);

z_s = Valor absoluto da posição vertical (altura) da saída do volume de controle (m).

A vazão mássica do fluido de trabalho para o coletor solar (onde a massa de ar que entra é a mesma que sai), pode ser calculada pela Equação 12.

$$\dot{m} = \rho_e V_e A_e = \rho_s V_s A_s \quad (12)$$

Onde:

\dot{m} = Vazão mássica do fluido de trabalho $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

ρ_e = Massa específica do fluido de trabalho na entrada do volume de controle $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$;

ρ_s = Massa específica do fluido de trabalho na saída do volume de controle $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$;

V_e = Velocidade de entrada do fluido no volume de controle $\left(\frac{m}{s}\right)$;

V_s = Velocidade de saída do fluido no volume de controle $\left(\frac{m}{s}\right)$;

A_e = Área de entrada do fluido no volume de controle (m^2);

A_s = Área de saída do fluido no volume de controle (m^2).

Para isso, medição da velocidade do ar que passa através das seções de entrada e saída do secador, foram executadas pela utilização de um anemômetro digital portátil, mostrado na Figura 40, modelo VEC-GM 8901, marca Vectus.

Figura 40 - Anemômetro digital utilizado no trabalho.



Fonte: Próprio autor.

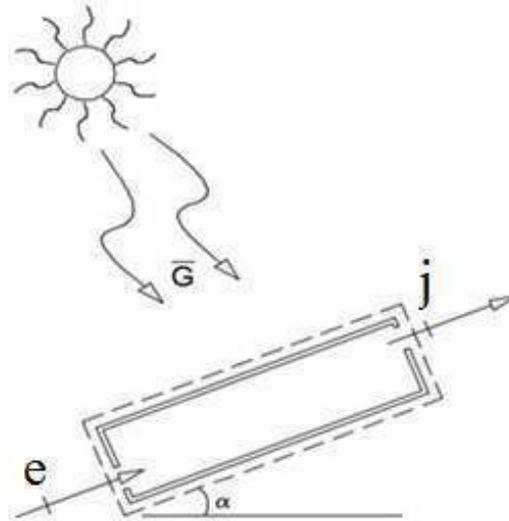
3.6.1.4 Cálculo da eficiência pela primeira lei da termodinâmica

Para a execução dos cálculos será aplicada a primeira lei da termodinâmica em cada componente do secador solar. Para isso, se faz necessário, inicialmente, a definição de um volume de controle e sua respectiva fronteira.

3.6.1.4.1 Coletor solar

A Figura 41 mostra a representação esquemática do volume de controle que foi aplicado ao coletor solar, neste trabalho.

Figura 41 - Representação do volume de controle aplicado ao coletor solar.



Fonte: Próprio autor

Aplicando a primeira lei da termodinâmica, dada pela Equação 11, ao volume de controle do coletor solar, apresentado na Figura 41 e considerando que a variação da energia cinética e a da energia potencial entre a entrada e a saída do coletor solar iguais a zero (o que é perfeitamente aceitável, dado as características construtivas e operacionais do coletor solar):

$$\begin{cases} EC_e = EC_j \\ EP_e = EP_j \end{cases}$$

Com estas considerações, a Equação 11 fica apresentada na forma dada pela Equação 13.

$$\dot{Q}_{e-j} + \dot{m}_e h_e = \dot{m}_j h_j + \dot{W}_{e-j} \quad (13)$$

Onde os pontos denominados “e” e “j” são considerados a entrada do coletor solar e sua saída (junção com a câmara de secagem), respectivamente.

Como o coletor solar não realiza nenhum trabalho, o trabalho realizado pelo coletor solar é nulo, podendo ser expresso como mostra a Equação 14, logo a seguir.

$$\dot{W}_{e-j} = 0 \quad (14)$$

Como a vazão mássica de ar na entrada do coletor é igual a vazão mássica na saída, obtém-se a Equação 15.

$$\dot{m}_e = \dot{m}_j = \dot{m} \quad (15)$$

Logo, com as considerações já citadas, chega-se a Equação 16, que apresenta o balanço de energia no volume de controle correspondente ao coletor solar.

$$\dot{Q}_{e-j} = \dot{m}(h_j - h_e) \quad (16)$$

Onde pode-se dizer que \dot{Q}_{e-s} é o \dot{Q}_{real} , ou seja, é a energia realmente transferida para o fluido de trabalho, que neste caso é o ar de secagem. A obtenção destes dados foi feita através da leitura dos sensores de umidade relativa e temperatura do ar de secagem na entrada e na saída do coletor.

Assim, aplicando o conceito de eficiência térmica, pela primeira lei da termodinâmica para um volume de controle chega-se a expressão que representa o rendimento térmico do coletor solar dado pela Equação 17.

$$\eta_{coletor} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{m}(h_j - h_e)}{A \cdot \dot{Q}_{solar \text{ horária}}} \quad (17)$$

Em que, o cálculo da energia transferida ao ar de secagem pode ser obtido pela Equação 18.

$$\dot{Q}_{solar \text{ horária}} = \int_t^{t+\Delta t} \bar{G} dt \quad (18)$$

Onde:

A = Área da cobertura transparente do coletor solar (m^2);

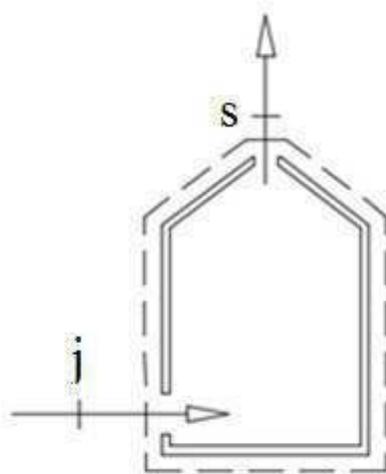
\bar{G} = Média da irradiação solar, incidente sobre o coletor solar, durante o processo de secagem ($\frac{W}{m^2}$).

Desta forma, tem-se que o rendimento térmico do coletor solar é admitido como sendo o rendimento térmico do secador solar.

3.6.1.4.2 Câmara de secagem

A Figura 42 mostra a representação esquemática do volume de controle aplicado à câmara de secagem.

Figura 42 - Representação do volume de controle aplicado à câmara de secagem.



Fonte: Próprio autor.

Na análise volume de controle aplicado à câmara de secagem, o primeiro ponto a se ter atenção, é que diferentemente do coletor solar, a câmara de secagem possui vazões mássicas de entrada e saída diferentes. Neste caso, a massa que sai da câmara de secagem é maior que a massa que entra na mesma, devido a massa que está saindo ser a soma da massa que entrou na câmara oriunda do coletor solar, mais a massa de água que está sendo retirada da fruta durante o processo de secagem. Logo tem-se:

$$\begin{cases} \dot{m}_j \neq \dot{m}_s \\ \dot{m}_j < \dot{m}_s \end{cases}$$

Assim, se obtém a Equação 19, mostrada a seguir.

$$\dot{m}_s = \dot{m}_j + \dot{m}_{\text{água ret da banana}} \quad (19)$$

Onde:

$$\dot{m}_{\text{água da banana}} = \text{Vazão mássica de água removida da banana} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right).$$

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 da câmara de secagem:

$$\begin{cases} EC_j = EC_s \\ EP_j = EP_s \end{cases}$$

Onde “j” e “s” são, respectivamente, a entrada da câmara de secagem (junção com o coletor solar) e a saída.

Considerando também que o trabalho é nulo, porque, neste caso, a câmara de secagem não realiza nenhum trabalho, este pode ser expresso pela Equação 20.

$$\dot{W}_{j-s} = 0 \quad (20)$$

Assim, com tais considerações, a Equação 11 para o volume de controle que representa a câmara de secagem, fica apresentada na forma dada pela Equação 21.

$$\dot{Q}_{j-s} = \dot{m}_s h_s - \dot{m}_j h_j + \dot{E}_b \quad (21)$$

Onde:

$$\dot{E}_b = \text{Energia retirada da banana} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right).$$

Em que:

$$\dot{E}_b = h_v \times \dot{m}_{\text{água ret da banana}} \quad (22)$$

Onde:

h_v = Entalpia de vaporização da água na temperatura média de saída $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

Desta forma, pode-se dizer que a câmara de secagem funciona como um sorvedouro, e que sua eficácia pode ser avaliada pelo cálculo da 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 23, que apresenta os parâmetros necessários a essa determinação.

$$\eta_p = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{inicial\ de\ água}} \times 100 \quad (23)$$

Onde:

η_p = Eficiência mássica do processo de secagem (%);

$m_{inicial}$ = Massa inicial do produto (kg);

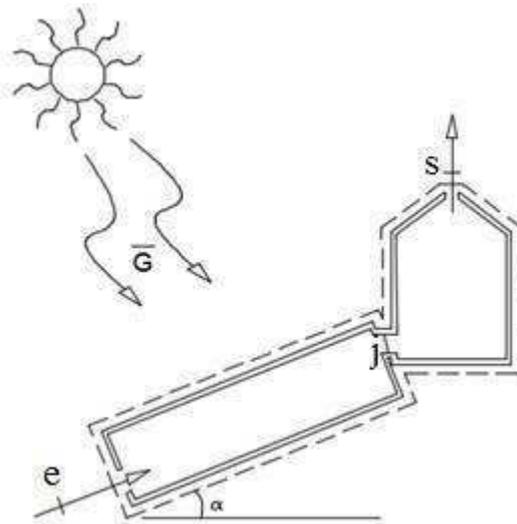
m_{final} = Massa final do produto (kg);

$m_{inicial\ de\ água}$ = Massa inicial (total) de água presente no produto a ser seco (kg).

3.6.1.4.3 Secador solar (coletor solar mais câmara de secagem)

A Figura 43 mostra a representação esquemática do volume de controle aplicado ao secador solar como um todo, ou seja, aplicado ao coletor solar acoplado à câmara de secagem.

Figura 43 - Representação do volume de controle aplicado ao secador solar.



Fonte: Próprio autor.

Em se tratando do rendimento do secador solar como um todo, este, pode ser considerado como sendo o rendimento térmico do coletor solar, da forma já apresentada anteriormente. Assim, tem-se que:

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

Após os cálculos realizados, os dados obtidos do rendimento térmico do equipamento, do desempenho do processo de secagem, da perda de massa e variação do teor de umidade, entre outros, de cada experimento realizado serão apresentados em tabelas, permitindo a comparação entre estes.

As tabelas serão apresentadas no Capítulo IV e terão o formato das Tabelas 04 e 05.

Tabela 04 - Modelo da tabela do rendimento do secador solar pelo balanço energético.

Experimentos	Datas	$\eta_{\text{coletor}}(\%)$
1	25 e 26/04/2016	
2	16 à 18/05/2016	
3	08 e 09/06/2016	
4	21 e 22/07/2016	

Fonte: Próprio autor.

Tabela 05 - Modelo da tabela das eficiências dos processos de secagem.

Experimentos	Datas	X_{buf} (%)	$m_{inicial}$ (g)	m_{final} (g)	m_{H_2O} (g)	η_p (%)
1	25 e 26/04/2016					
2	16 à 18/05/2016					
3	08 e 09/06/2016					
4	21 e 22/07/2016					

Fonte: Próprio autor.

3.6.2 Cálculo do rendimento térmico a partir da potência útil

Esta forma de cálculo, ainda hoje é bastante utilizada para se chegar ao valor da eficiência do sistema de secagem. Isso se deve ao fato de, no equacionamento, não ser necessário dados de umidade relativa, e sim, apenas de temperatura, vazão mássica e irradiação incidente, que são facilmente mensuráveis.

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 secador solar pode ser determinado pela Equação 24.

$$\eta_t = \frac{P_u}{A \cdot \bar{G}} \cdot 100 \quad (24)$$

Onde:

η_t = Rendimento do secador solar (%);

P_u = Potência transferido ao fluido de trabalho (W);

A = Área da cobertura transparente do coletor solar (m^2);

\bar{G} = Média da irradiação solar incidente durante o experimento ($\frac{W}{m^2}$).

A potência transferida ao fluido de trabalho, também chamada de potência útil, é determinada pela Equação 25, e representa a quantidade de energia transferida ao fluido de trabalho, neste caso, o ar ambiente:

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (25)$$

Onde:

\dot{m} = Vazão mássica do fluido de trabalho $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

c_p = Calor específico do fluido de trabalho $\left(\frac{J}{kg \times K}\right)$;

ΔT = Variação 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.

Assim, da mesma forma que calculado pelo método da primeira lei da termodinâmica, o rendimento do coletor solar é admitido como sendo o rendimento do secador solar como um todo. Com isso, partindo das análises termodinâmicas realizadas, é necessário esclarecer que os valores dos rendimentos calculados pelas duas metodologias apresentadas, teoricamente, devem ser iguais. Para a realização da comparação entre esses dados calculados, também será apresentada ao final do Capítulo IV a tabela com os valores do rendimento térmico do secador solar calculado pelo método da potência útil, a qual terá formatação igual à do modelo apresentada na Tabela 06.

Tabela 06 - Modelo da tabela do rendimento do secador solar pelo método da potência útil.

Experimentos	Datas	$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$ (W)	$\eta_t = \frac{P_u}{A_1 \cdot \bar{G}} \cdot 100$
1	25 e 26/04/2016		
2	16 à 18/05/2016		
3	08 e 09/06/2016		
4	21 e 22/07/2016		

Fonte: Próprio autor.

Capítulo IV
RESULTADOS E DISCUSSÕES

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes experimentais dos dias 25 e 26 de abril de 2016 (E1), 16, 17 e 18 de maio de 2016 (E2), 08 e 09 de junho de 2016 (E3), 21 e 22 de julho de 2016 (E4), totalizando quatro experimentos, seguindo-se a análise dos resultados.

Para cada experimento realizado, os valores obtidos para variação de massa da banana prata (*Musa Spp.*) e para variação das demais características do ar de secagem estão apresentados em tabelas do Apêndice A. Para todos os experimentos foram calculados o rendimento do equipamento utilizando tanto o método da potência útil (sem levar em conta os valores de umidade relativa do ar de secagem) quanto o método do balanço energético, onde as análises contemplam a temperatura e a umidade do ar que são os dois parâmetros mais importantes para o processo de secagem.

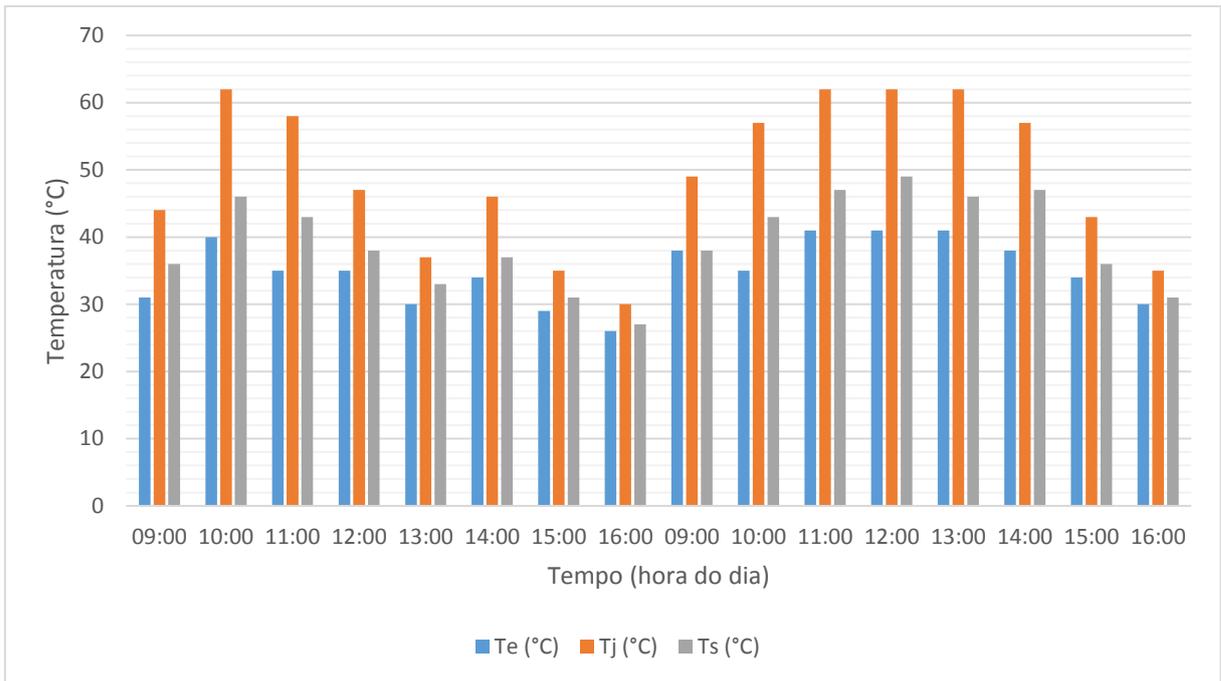
A partir desses valores obtidos, são calculados e apresentados os demais parâmetros necessários à construção das respectivas curvas de secagem, do cálculo do rendimento térmico do secador solar, da câmara de secagem e do sistema de secagem completo. Também é apresentada e discutida os resultados da eficiência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

4.1 Experimento 1 (E1), realizado em 25 e 26 de abril de 2016

Nos Gráficos 05 e 06 podem ser observados os respectivos valores obtidos para as temperaturas e umidades relativas do ar medidas no equipamento a cada hora durante o E1.

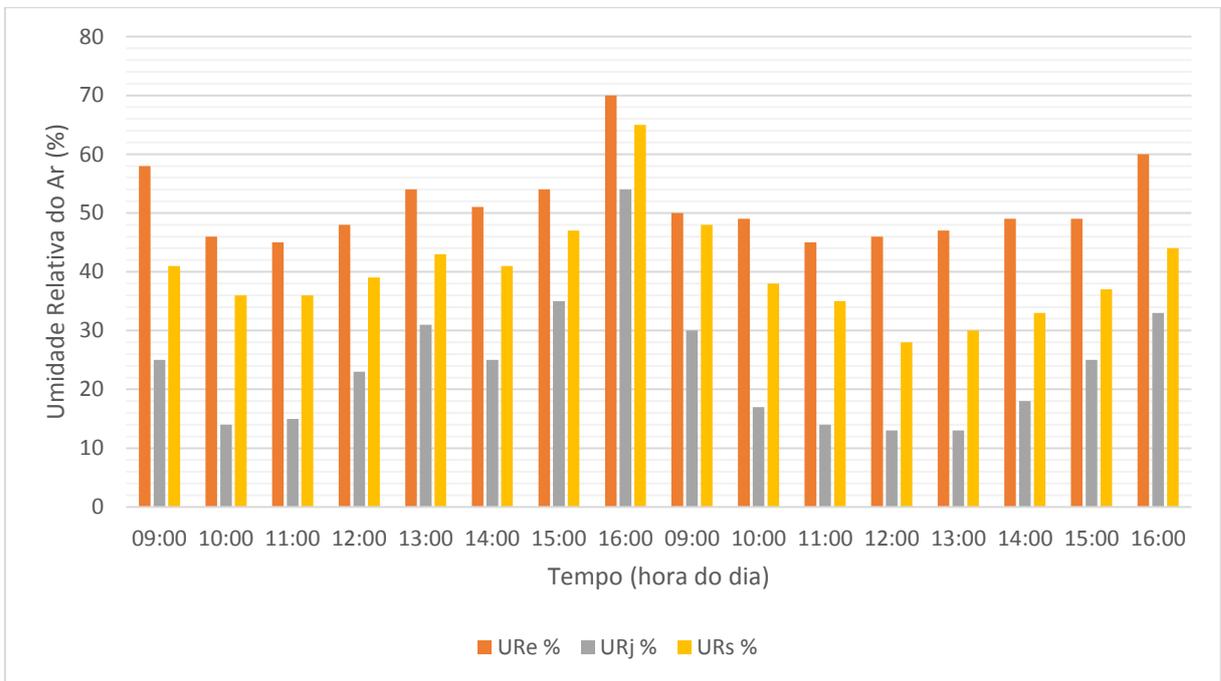
Um detalhe importante de ser observado analisando os Gráficos 05 e 06, é a simetria existente entre a variação de temperatura e a variação de umidade relativa, proporcionando entre estas duas grandezas uma relação inversamente proporcional, onde percebe-se claramente que nos momentos onde a temperatura é máxima a umidade relativa é mínima. Como pode ser visto, essa proporcionalidade se mantém ao longo de todo o Experimento 1, bem como se repete nos outros experimentos realizados e apresentados no decorrer do trabalho.

Gráfico 05 - Distribuição de temperatura no secador solar durante o E1.



Fonte: Próprio autor

Gráfico 06 - Distribuição de umidade relativa do ar de secagem no secador solar no E1.



Fonte: Próprio autor

Onde analogamente ao que já foi apresentado para os dados de temperatura, “UR_e, UR_j e UR_s” são os dados medidos da umidade relativa do ar na entrada do coletor solar, na junção do coletor solar com a câmara de secagem e na saída da câmara de secagem, respectivamente.

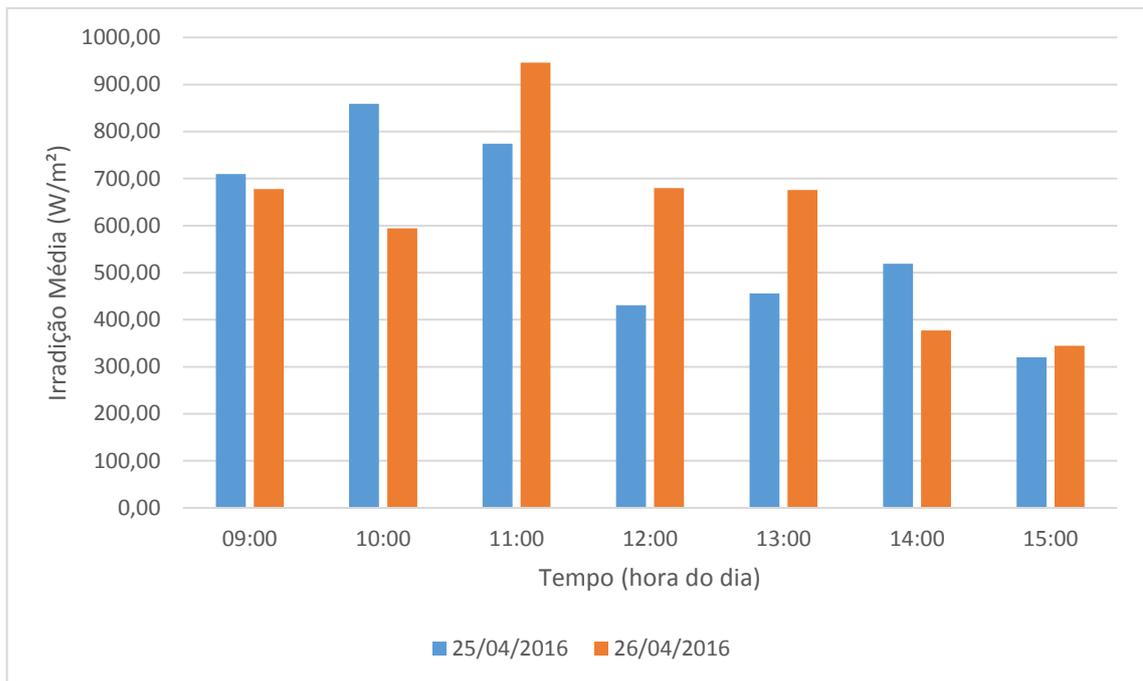
Observando-se os valores obtidos e mostrados nos Gráficos 05 e 06, percebe-se que as temperaturas do ar na junção (entrada da câmara de secagem) estiveram, na maior parte do experimento, acima de 40°C, ficando alguns momentos em torno de 60°C, exceto nas últimas medições do dia, geralmente realizada as 16:00 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, devido a intermitência normal que existe nos processos que utilizam a fonte solar. Isso decorre de que a intensidade de radiação 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 se intensifica no início e no final do dia.

Esses valores de temperatura obtidos, normalmente são conseguidos com uso intensivo de energia elétrica nos secadores de fruta atualmente em uso comercial. Portanto, a economia de energia elétrica resultante deve ser utilizada para demonstrar a viabilidade técnica do equipamento desenvolvido e sua funcionalidade operacional.

Com relação a variação de umidade relativa do ar no interior do secador, pode ser observado que existe uma significativa queda de umidade relativa do ar ao passar pelo coletor solar se dirigindo para à câmara de secagem. Essa baixa umidade média de 24,06%, credencia o ar a estar adequado para o processo de secagem. Esse valor de umidade média é obtido devido ao aumento de temperatura ocorrido no interior do coletor solar, muito devido, a implantação da telha de fibrocimento como capacitor térmico.

O Gráfico 07 traz a média horária da intensidade de radiação solar nos dias em que foram feitos os testes experimentais E1, comprovando que a média dessas intensidades foram muito baixas, principalmente a partir do início da tarde até o fim do experimento, em ambos dos dias.

Gráfico 07 - Média das irradiações durante o E1.



Fonte: Próprio autor

Como pode ser visto no Gráfico 07, a irradiação solar nos dois dias de experimento foi bem abaixo da esperada. A irradiação solar por volta das 12:00 h do primeiro dia teve média de 430,87 W/m², sendo muito abaixo do esperado para essa hora do dia. No segundo dia, já por volta das 14:00 h a irradiação média ficou abaixo de 376,97 W/m², comprometendo assim, os resultados finais da secagem. A média da irradiação solar durante todo o experimento foi de 598,89 W/m².

Na Tabela 07 são apresentados os valores obtidos para massa de banana a cada 60 minutos de teste, sendo a primeira medição as 9:00 h e a última do dia as 16:00 h, para os dois dias do experimento E1 (25 e 26 de abril de 2016). Na mesma tabela são apresentados os valores calculados para as variáveis: massa seca (que foi obtido através da estufa da UFCG), teor de umidade em base seca (X_{bs}), teor de umidade em base úmida (X_{bu}) e razão de umidade (RU).

Tabela 07 - Dados de massa obtidos no Experimento 1.

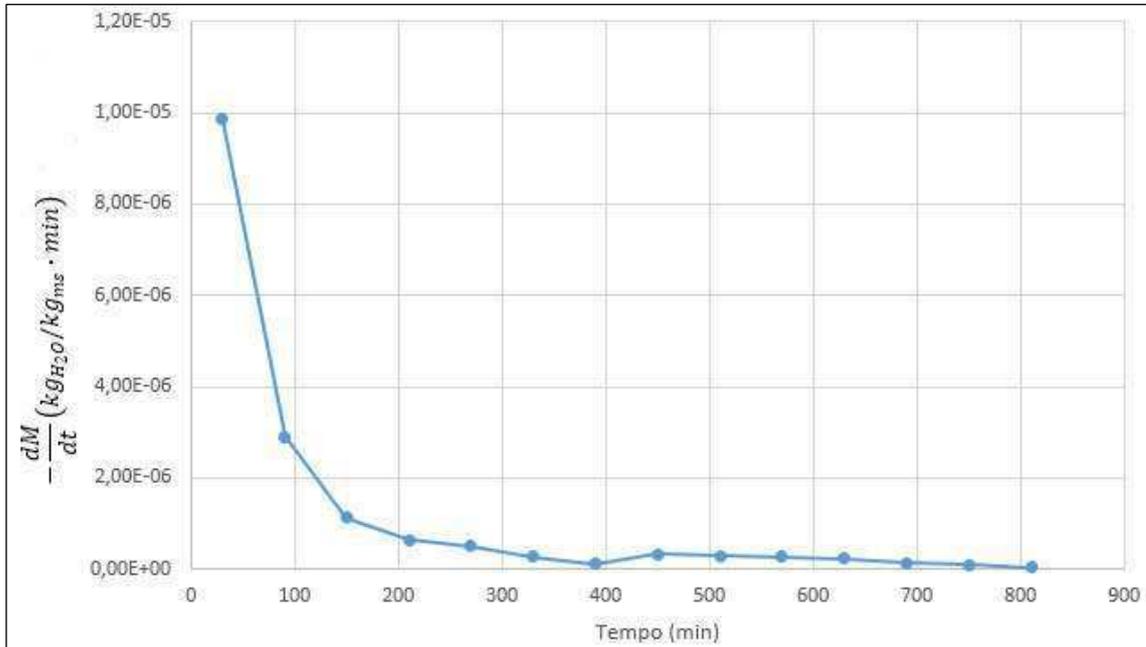
Data	Tempo de Experimento (min)	Horas	Massa Total (g)	Massa Seca (g)	Teor de Água (b.u.)	Teor de Água (b.s.)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$
25/04/16	0	09:00	30,0	8,8	0,71	2,41	1,00
	60	10:00	27,4	8,8	0,68	2,11	0,85
	120	11:00	25,1	8,8	0,65	1,85	0,71
	180	12:00	23,6	8,8	0,63	1,68	0,62
	240	13:00	22,4	8,8	0,61	1,55	0,55
	300	14:00	21,2	8,8	0,58	1,41	0,48
	360	15:00	20,4	8,8	0,57	1,32	0,44
	420	16:00	20,0	8,8	0,56	1,27	0,41
26/04/16	420	09:00	19,8	8,8	0,56	1,25	0,40
	480	10:00	18,7	8,8	0,53	1,13	0,34
	540	11:00	17,4	8,8	0,49	0,98	0,26
	600	12:00	16,0	8,8	0,45	0,82	0,18
	660	13:00	14,7	8,8	0,40	0,67	0,10
	720	14:00	13,9	8,8	0,37	0,58	0,05
	780	15:00	13,3	8,8	0,34	0,51	0,02
	840	16:00	13,0	8,8	0,32	0,48	0,00

Fonte: Próprio autor

Para este experimento, observa-se que o teor de umidade inicial da banana em base úmida era de 71% e que, depois de 14 h (quatorze) horas de secagem, o teor de umidade final foi de 32,31%. Este teor final, está acima do ideal para ser considerado uma fruta seca. Isso se deu ao fato de, nesses dias do experimento, não se ter irradiação solar suficiente para o aquecimento adequado do ar de secagem, devido à alta nebulosidade.

O Gráfico 08 traz a curva da taxa de secagem ao longo de todo o experimento. Os dados necessários à plotagem deste gráfico foram obtidos a partir da Tabela 07 mostrada anteriormente.

Gráfico 08 - Taxa de secagem do Experimento 1.

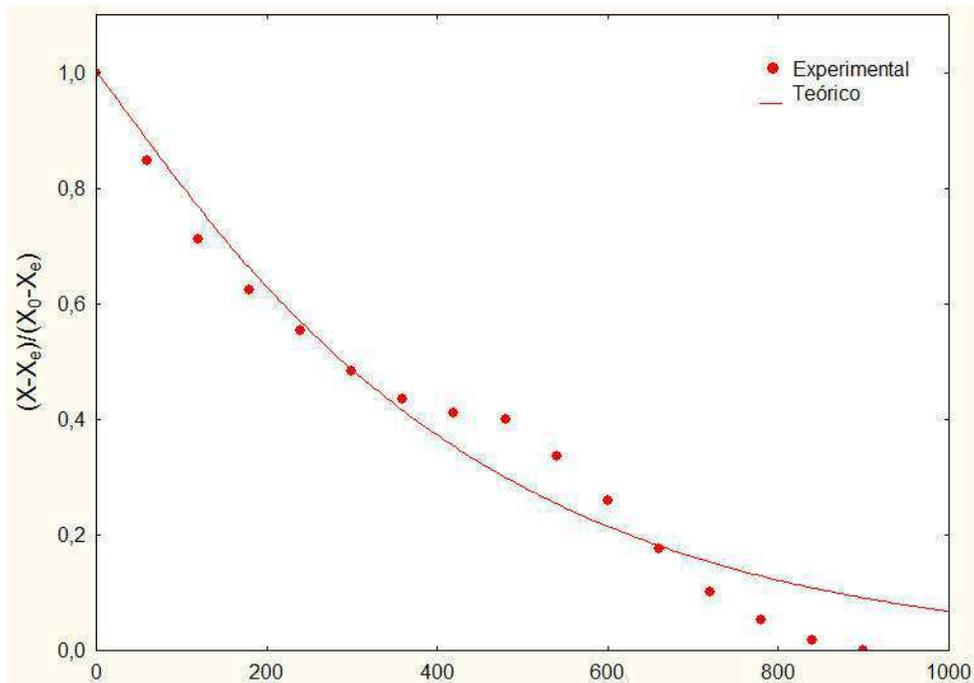


Fonte: Próprio autor

No Gráfico 8 é possível perceber como a perda de massa é acentuada no início do processo de secagem, onde o produto possui mais água em seu interior, e tende a se estabilizar em níveis mais baixos ao longo do processo, até que se chegue ao ponto de equilíbrio, onde para aquelas condições de secagem, o fruto não perderá mais água, conseqüentemente não ocorrerá mais variação de sua massa.

A curva de secagem mostrada no Gráfico 09, foi obtida através dos dados apresentados na Tabela 07, 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.

Gráfico 09 - Cinética de secagem do Experimento 1 ajustada ao modelo de Page.



Fonte: Próprio autor

Nota-se que os valores experimentais obtidos no primeiro dia do experimento se encontram próximos (acompanhando a curva) da linha do modelo matemático de Page até próximo do fim do primeiro dia de experimento (em torno de 400 minutos), onde após isso a pouca irradiação se reflete na lenta taxa de queda da razão de umidade no final do primeiro dia. Já no segundo dia (a partir de 420 minutos de experimento) tem-se novamente a acentuação do ritmo de queda da razão de umidade até que novamente ocorra uma perda de ritmo, devido principalmente a dois fatores: baixa irradiação solar a partir da metade do segundo dia de experimento e a massa de água presente da banana já ser baixa, devido a sua maior parte ter sido removida no primeiro dia, sendo naturalmente mais difícil sua retirada quando se tem menor quantidade. 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.

O coeficiente de determinação do gráfico da cinética de secagem do E1 ajustado ao modelo matemático de Page foi de 97,96%, assegurando que, através desta curva, é possível prever o tempo necessário de secagem até ser atingido o teor de umidade desejado.

Para o cálculo do rendimento térmico, foram utilizados dois métodos. Pelo balanço energético e pela potência útil.

No método da potência útil, onde não se utiliza os dados de umidade relativa do ar, foram utilizadas as Equação 24 e 25, da maneira que se segue.

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (25)$$

Encontrados:

$$\dot{m} = 0,01058 \frac{kg}{s}$$

$$c_p = 1,005 \frac{kJ}{kg \cdot K} \text{ a } 300 \text{ K (Moran e Shapiro, 2009)}$$

$$\overline{\Delta T} = 49,13 - 34,88 = 14,25 \text{ K}$$

Logo, substituindo tem-se:

$$P_u = 0,01058 \frac{kg}{s} \times 1,005 \frac{kJ}{kg \cdot K} \times 14,25 \text{ K} = 0,151519 \frac{kJ}{s} = 151,519 \text{ W}$$

Como a área de incidência do coletor solar mede 1 m^2 e a média da irradiação solar nos dias do E1 foi de $598,89 \text{ W/m}^2$, chega-se ao rendimento térmico do coletor solar no Experimento 1 (η_{t1}).

$$\eta_t = \frac{P_u}{A \cdot G} \cdot 100 \quad (24)$$

$$\eta_t = \frac{151,519 \text{ W}}{1 \text{ m}^2 \cdot 598,89 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \cdot 100 = 25,30\%$$

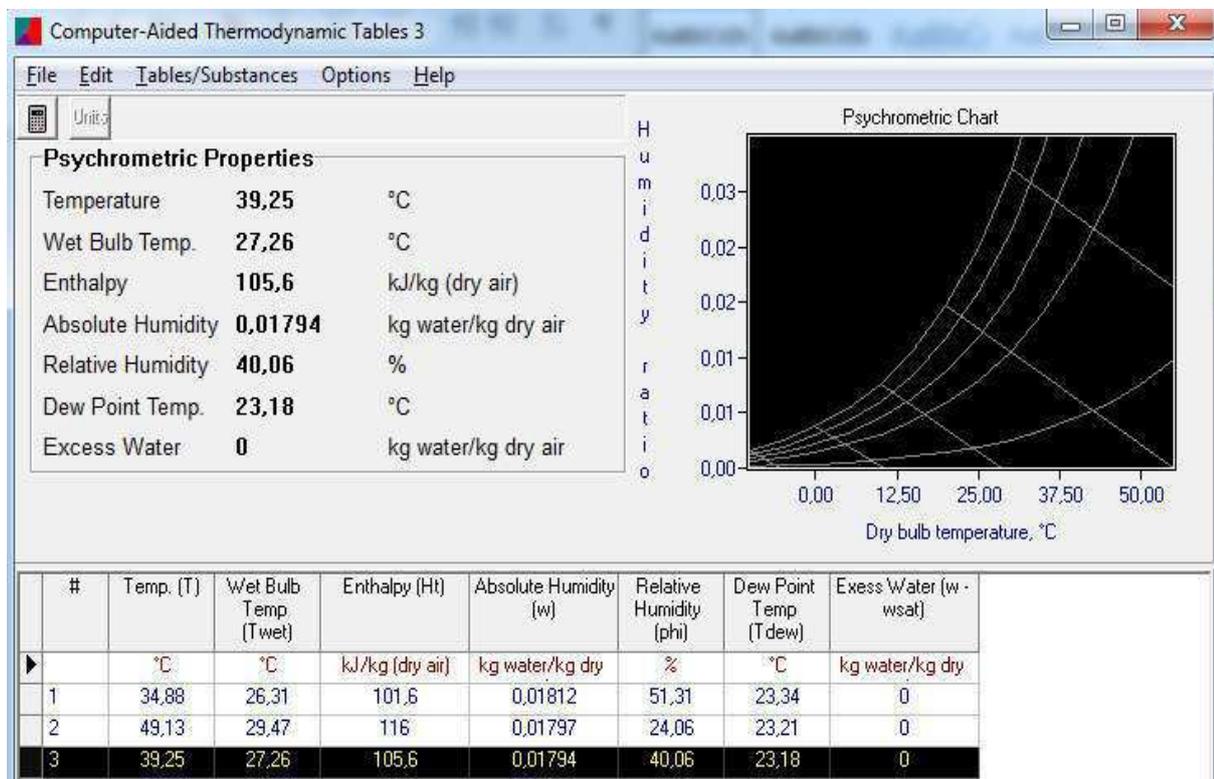
No método do balanço energético, foram utilizados os dados tanto de temperatura quanto os de umidade relativa do ar de secagem, e baseando-se na primeira lei da termodinâmica utilizou-se as Equação 17 e 23, da forma que se segue.

Primeiramente encontra-se o rendimento térmico do coletor solar através da Equação 17.

$$\eta_{coletor} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{m}(h_j - h_e)}{A \cdot \dot{Q}_{solar \text{ horária}}} \quad (17)$$

Os dados de entalpia específica da entrada e saída do coletor, h_e e h_j , respectivamente, foram encontrados utilizando-se o *software Computer Aided Thermodynamic Tables (CATT)*, entrando apenas com os dados medidos da temperatura e umidade relativa do ar. O CATT, conforme pode ser visto na Figura 44, apresenta como resultado os valores de entalpia e as demais propriedades termodinâmicas resultantes das medições realizadas, para os 3 pontos onde estão localizados os sensores de medição.

Figura 44 - Dados termodinâmicos do E1 obtidos pelo CATT.



Fonte: Próprio autor

Desta forma, tem-se:

$$\dot{m} = 0,01058 \frac{kg}{s}$$

$$h_e = 101,6 \frac{kJ}{kg} \quad \text{e} \quad h_j = 116,0 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_{solar \text{ horária}} = 598,89 \text{ W/m}^2$$

Assim, chega-se ao rendimento do coletor solar:

$$\eta_{coletor} = \frac{0,01058 \frac{kg}{s} (116,0 \frac{kJ}{kg} - 101,6 \frac{kJ}{kg})}{1m^2 \cdot 598,89 W/m^2} = 25,44\%$$

Com isso, é possível dizer que o rendimento térmico do equipamento como um todo, no Experimento 1, foi:

$$\eta_{secador solar} = \eta_{coletor solar}$$

$$\eta_{secador solar} = 25,44\%$$

Para calcular a eficiência mássica do processo de secagem no E1 (obtido com isso, a eficácia da câmara de secagem) deve ser utilizada a Equação 23, onde se substitui os valores da massa inicial e final da banana (obtidos da Tabela 07) no numerador e a massa total de água da banana no denominador.

$$\eta_p = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{inicial de água}} \times 100 \quad (23)$$

$$\eta_p = \frac{30,0 - 13,0}{21,2} \times 100 = 80,19\%$$

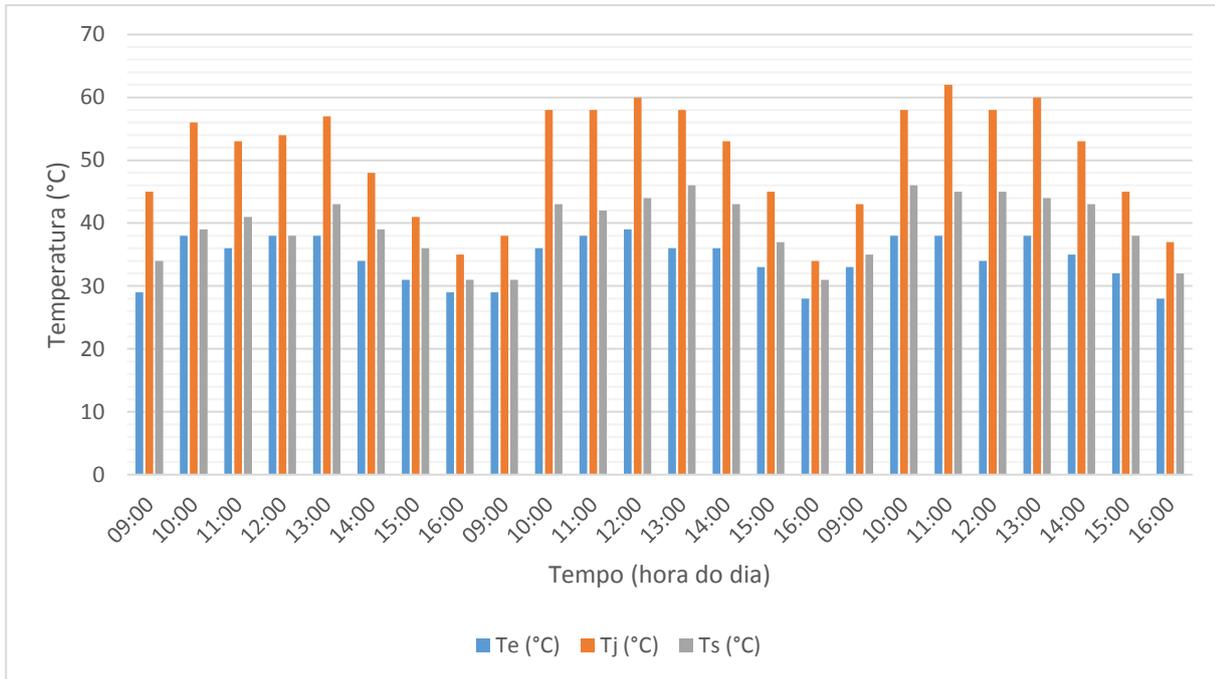
Tal eficiência mássica do processo de secagem mesmo sendo abaixo do esperado, já pode ser considerada significativa, demonstrando que mesmo sob condições adversas como os do E1, a energia solar se apresenta como uma fonte competitiva frente à processos que utilizam GLP ou eletricidade.

4.2 Experimento 2 (E2), realizado em 16, 17 e 18 de maio de 2016

Neste experimento, as condições climáticas foram semelhantes às do experimento 1, portanto, decidiu-se que seria analisado como seria o processo de secagem, e consequentemente, o desempenho do equipamento, com um experimento que durasse 3 dias.

No Gráfico 10 podem ser vistos os valores para as temperaturas medidas durante o E2.

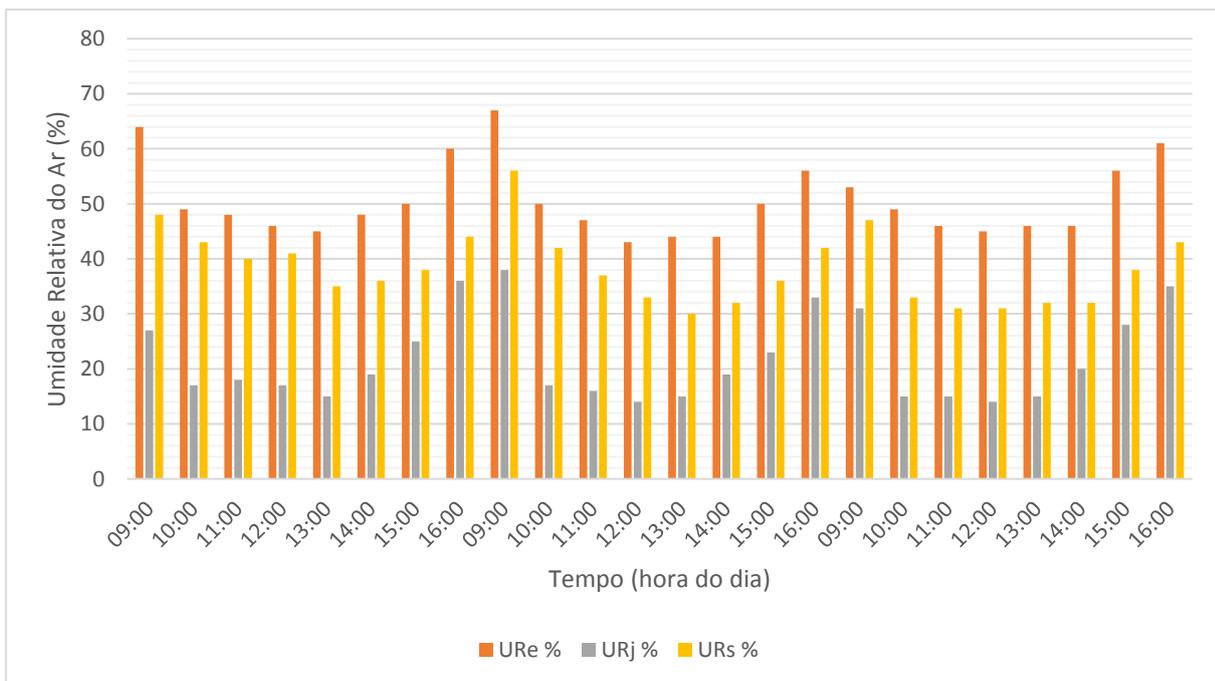
Gráfico 10 - Distribuição de temperatura no secador solar no E2.



Fonte: Próprio autor

O Gráfico 11 mostra os valores obtidos para a umidade relativa do ar no E2.

Gráfico 11 - Distribuição de umidade relativa do ar de secagem no secador solar no E2.

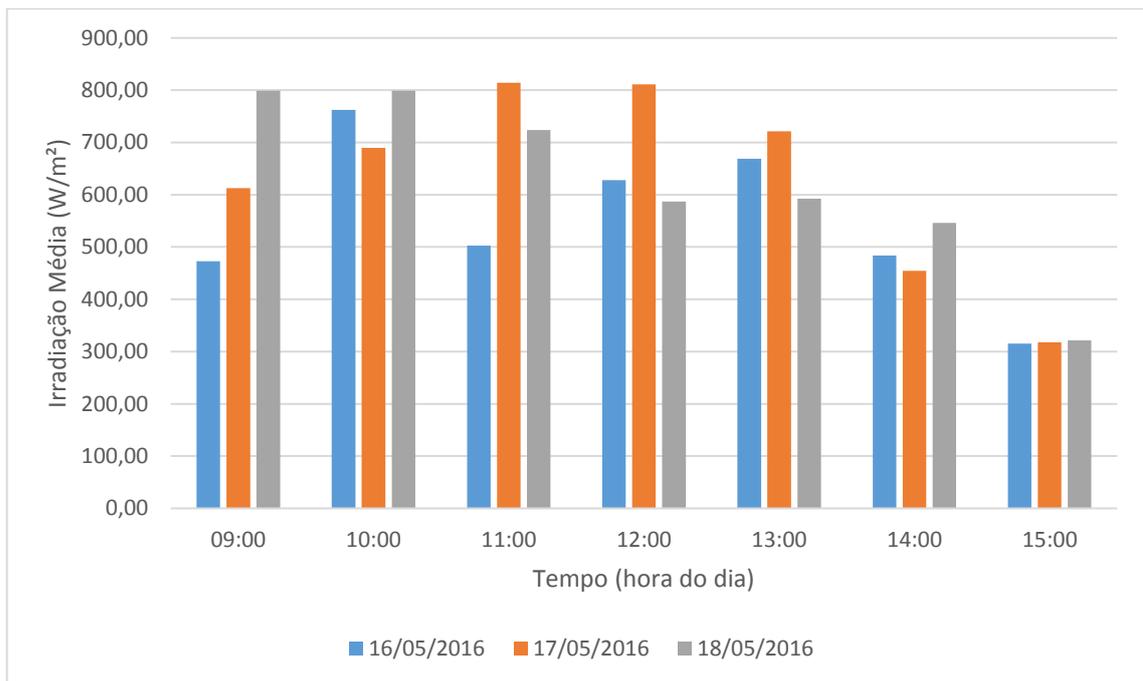


Fonte: Próprio autor

Analisando os Gráficos 10 e 11, é possível perceber que as médias de temperatura e umidade relativa medidos, foram, bem próximas das obtidas no Experimento 1, confirmando com isso a necessidade de um terceiro dia de experimento para que fosse atingido o valor de teor de umidade final da banana abaixo de 25%.

Essa informação é validada quando analisamos o Gráfico 12, onde são apresentadas as médias de irradiação solar para o Experimento 2.

Gráfico 12 - Média das irradiações durante o E2.



Fonte: Próprio autor

Pode-se verificar que as irradiações foram muito baixas durante todo o experimento, sendo que no primeiro dia foi o mais crítico. O segundo e terceiro dias foram mais constante, porém apresentando grande queda de irradiação a partir do meio dia até o fim do experimento. Com isso, a média de irradiação, considerando todo o experimento foi de 600,46 W/m², assim sendo, pouco acima da apresentada no Experimento 1.

Na Tabela 08 são apresentados os valores obtidos para massa de banana a cada hora, sendo a primeira medição as 9:00 h e a última do dia as 16:00 h, para os três dias do experimento E2 (16, 17 e 18 de maio de 2016). Na mesma tabela são apresentados os valores calculados para as variáveis: massa seca (que foi obtido através da estufa da UFCG), teor de umidade em base seca (X_{bs}), teor de umidade em base úmida (X_{bu}) e razão de umidade (RU).

Tabela 08 - Dados de massa obtidos no Experimento 2.

Data	Tempo de experimento (min)	Horas	Massa Total (g)	Massa Seca (g)	Teor de Água (b.u.)	Teor de Água (b.s.)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$
16/05/16	0	09:00	30,0	8,8	0,71	2,41	1,000
	60	10:00	28,7	8,8	0,69	2,26	0,93
	120	11:00	27,3	8,8	0,68	2,10	0,85
	180	12:00	25,8	8,8	0,66	1,93	0,77
	240	13:00	23,7	8,8	0,63	1,69	0,66
	300	14:00	22,5	8,8	0,61	1,56	0,60
	360	15:00	21,4	8,8	0,59	1,43	0,53
	420	16:00	20,9	8,8	0,58	1,37	0,51
17/05/16	420	09:00	20,9	8,8	0,58	1,37	0,51
	480	10:00	19,9	8,8	0,56	1,26	0,45
	540	11:00	18,1	8,8	0,51	1,06	0,36
	600	12:00	16,7	8,8	0,47	0,90	0,28
	660	13:00	15,9	8,8	0,45	0,81	0,24
	720	14:00	15,1	8,8	0,42	0,72	0,19
	780	15:00	14,5	8,8	0,40	0,65	0,16
	840	16:00	14,2	8,8	0,38	0,61	0,15
18/05/16	840	09:00	14,2	8,8	0,38	0,61	0,15
	900	10:00	13,4	8,8	0,34	0,52	0,10
	960	11:00	12,8	8,8	0,31	0,45	0,07
	1020	12:00	12,5	8,8	0,30	0,42	0,05
	1080	13:00	12,1	8,8	0,27	0,37	0,03
	1140	14:00	11,9	8,8	0,26	0,35	0,02
	1200	15:00	11,7	8,8	0,25	0,33	0,01
	1260	16:00	11,5	8,8	0,23	0,31	0,00

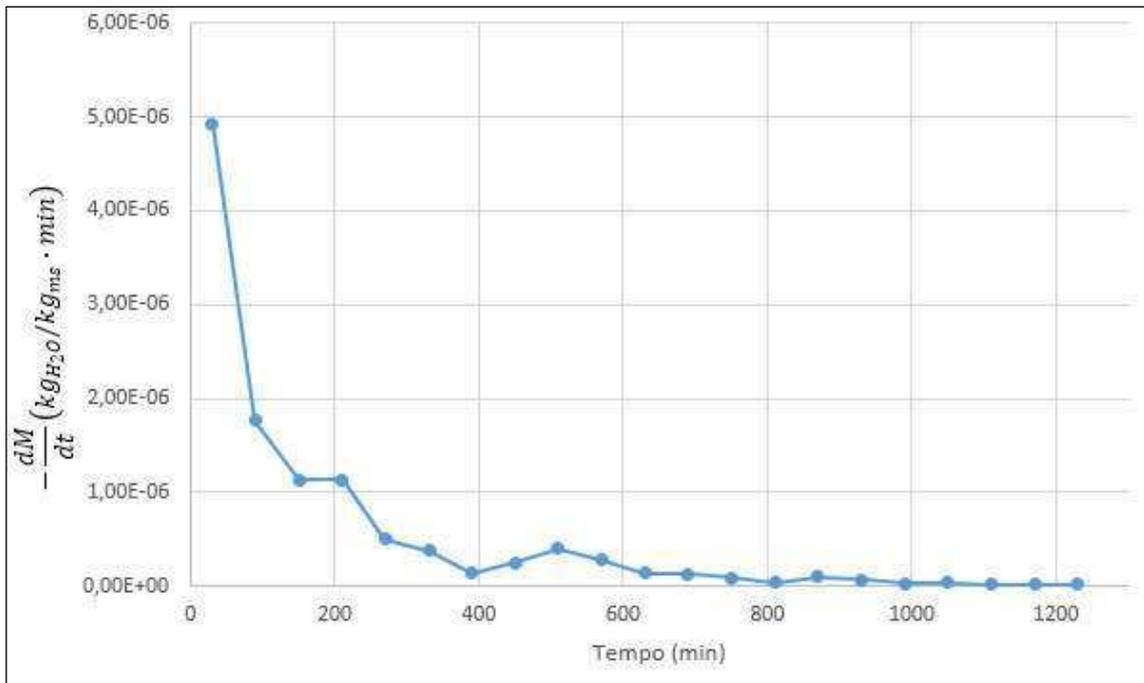
Fonte: Próprio autor

No E2, observa-se que o teor de umidade inicial da banana em base úmida era de 71% e que, só após 21 h (vinte e uma horas) de secagem, é atingido o teor de umidade final foi de 23,0%, sendo considerado satisfatório e estando dentro do esperado para uma fruta ser considerada seca, de acordo com a resolução nº 272 da ANVISA. O fato de ter atingido o teor ideal, só comprova a viabilidade operacional do equipamento, porém, o fator irradiação é de

fundamental importância para a velocidade do processo. Isto evidencia a dificuldade que é lidar com uma fonte de energia intermitente como a energia solar.

O Gráfico 13 traz a curva da taxa de secagem ao longo do Experimento 2. Os dados necessários à plotagem deste gráfico foram obtidos a partir da Tabela 08.

Gráfico 13 - Taxa de secagem no Experimento 2.

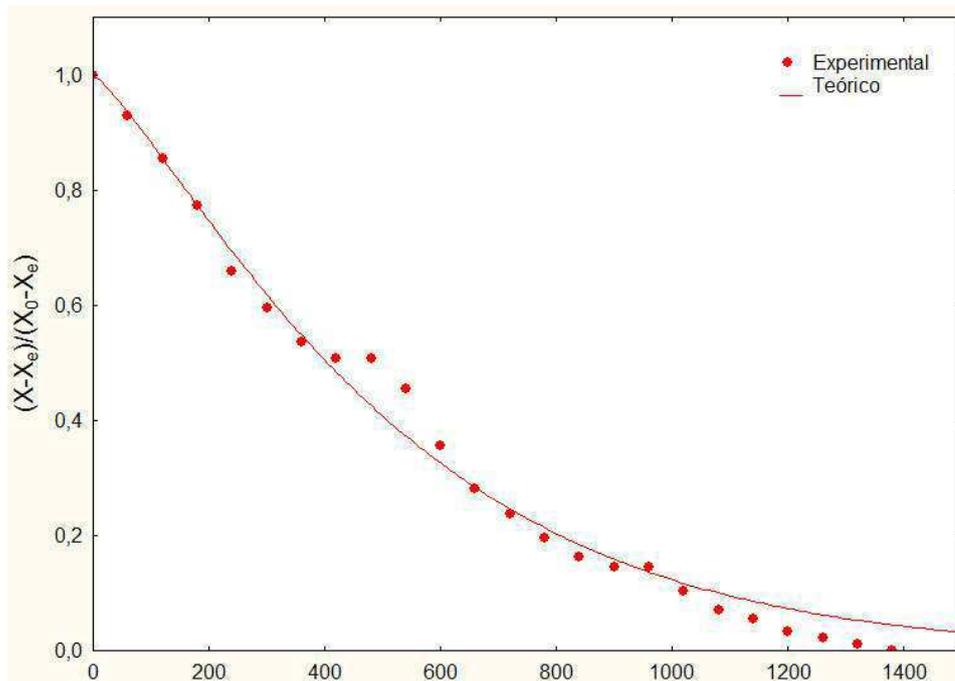


Fonte: Próprio autor.

Conforme pode ser observado no Gráfico 13, o comportamento da curva da taxa de secagem mantém como no experimento anterior, onde é possível verificar que a maior taxa de perda de massa do produto é no início do processo de secagem.

A curva de secagem mostrada no Gráfico 14, foi obtida através dos dados apresentados na Tabela 08, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem ajustada ao modelo matemático de Page.

Gráfico 14 - Cinética de secagem do Experimento 2 ajustada ao modelo de Page.



Fonte: Próprio autor

No Gráfico 14, nota-se que os valores experimentais obtidos no primeiro dia do experimento se encontram próximos (acompanhando a curva) da linha do modelo matemático de Page até próximo do fim do primeiro dia de experimento (em torno de 400 min), onde após isso, a pouca irradiação se reflete na lenta taxa de queda da razão de umidade e o consequente desvio dos pontos que representam o final do primeiro dia do E2. Já no segundo dia (a partir de 420 minutos de experimento) temos novamente a acentuação do ritmo de queda da razão de umidade até que a curva dos pontos se aproxime da linha de cinética novamente. No trecho do gráfico que diz respeito ao terceiro dia, é possível perceber uma ligeira divergência entre os pontos experimentais e a curva de Page, até que é atingido o equilíbrio. Como já mencionado anteriormente, as discrepâncias observadas 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, oscilando em torno da curva de cinética de secagem ajustada.

O coeficiente de determinação obtido a partir do ajuste do gráfico da cinética de secagem do E2 ao modelo matemático de Page foi de 99,40%, se mostrando bastante significativo, garantindo que através desta curva, é possível predizer o tempo necessário de secagem até que se chegue ao teor de umidade desejado no produto.

Para o cálculo do rendimento térmico utilizando método da potência útil, onde não se utiliza os dados de umidade relativa do ar, foram utilizadas as Equação 24 e 25, da maneira que se segue.

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (25)$$

Encontrados:

$$\dot{m} = 0,01058 \frac{kg}{s}$$

$$c_p = 1,005 \frac{kJ}{kg \cdot K} \text{ a } 300 \text{ K (Moran e Shapiro, 2009)}$$

$$\overline{\Delta T} = 50,38 - 34,33 = 16,05 \text{ K}$$

Logo, substituindo tem-se:

$$P_u = 0,01058 \frac{kg}{s} \times 1,005 \frac{kJ}{kg \cdot K} \times 16,05 \text{ K} = 0,170658 \frac{kJ}{s} = 170,658 \text{ W}$$

Como a área de incidência do coletor solar mede 1 m² e a média da irradiação solar nos dias do E2 foi de 600,46 W/m², chega-se ao rendimento térmico do coletor solar.

$$\eta_t = \frac{P_u}{A \cdot \overline{G}} \cdot 100 \quad (24)$$

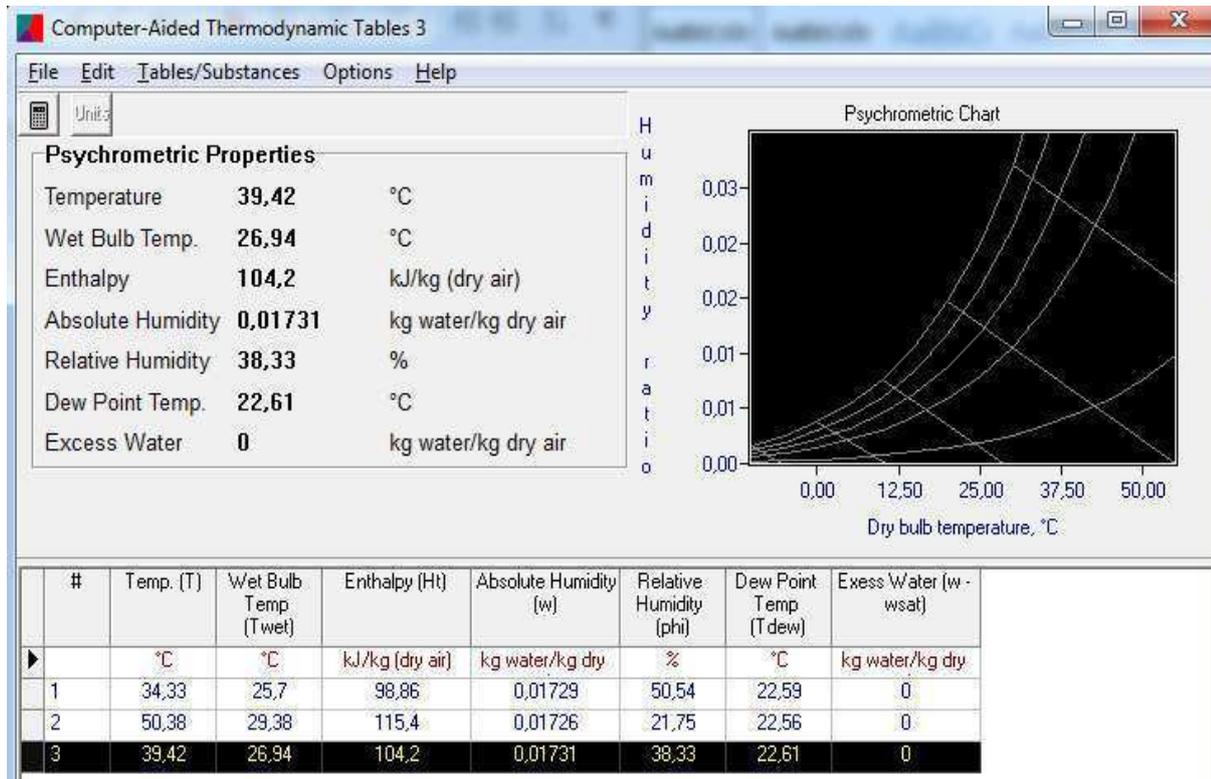
$$\eta_t = \frac{170,658 \text{ W}}{1 \text{ m}^2 \cdot 600,46 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \cdot 100 = 28,42\%$$

No método do balanço energético, foram utilizados os dados tanto de temperatura quanto os de umidade relativa do ar de secagem, e baseando-se na primeira lei da termodinâmica foram utilizadas, novamente, as Equações 17 e 23.

Primeiramente foram buscados os dados de entalpia específicas, necessárias às equações termodinâmicas. Tais dados foram encontrados a partir das informações de temperatura e umidade relativa do ar já coletadas anteriormente e inseridas no CATT.

A Figura 45 apresenta como resultado os valores de entalpia e as demais propriedades termodinâmicas resultantes das medições realizadas, para os 3 pontos onde estão localizados os sensores de medição.

Figura 45 - Dados termodinâmicos do E2 obtidos pelo CATT.



Fonte: Próprio autor

Desta forma, tem-se:

$$\dot{m} = 0,01058 \frac{kg}{s}$$

$$h_e = 98,86 \frac{kJ}{kg} \text{ e } h_j = 115,4 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_{solar \text{ horária}} = 600,46 \text{ W/m}^2$$

Assim, chega-se ao rendimento do coletor solar:

$$\eta_{coletor} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{m}(h_j - h_e)}{A \cdot \dot{Q}_{solar \text{ horária}}} \quad (17)$$

$$\eta_{coletor} = \frac{0,01058 \frac{kg}{s} (115,4 \frac{kJ}{kg} - 98,86 \frac{kJ}{kg})}{1m^2 \cdot 600,46 W/m^2} = 29,14\%$$

Com isso, é possível afirmar que o rendimento térmico do equipamento como um todo, no Experimento 2 foi:

$$\eta_{secador solar} = \eta_{coletor solar}$$

$$\eta_{secador solar} = 29,14\%$$

Para calcular a eficiência mássica do processo de secagem no E2, deve ser utilizada a Equação 28, onde se substitui os valores da massa inicial e final da banana no numerador e a massa total de água da banana no denominador. Tais valores são encontrados na Tabela 08.

$$\eta_p = \frac{30,0 - 11,5}{21,3} \times 100 = 86,85\%$$

Esta elevada eficiência do processo de secagem comprova, comparativamente com o E1, a viabilidade do uso da energia solar na secagem de frutas.

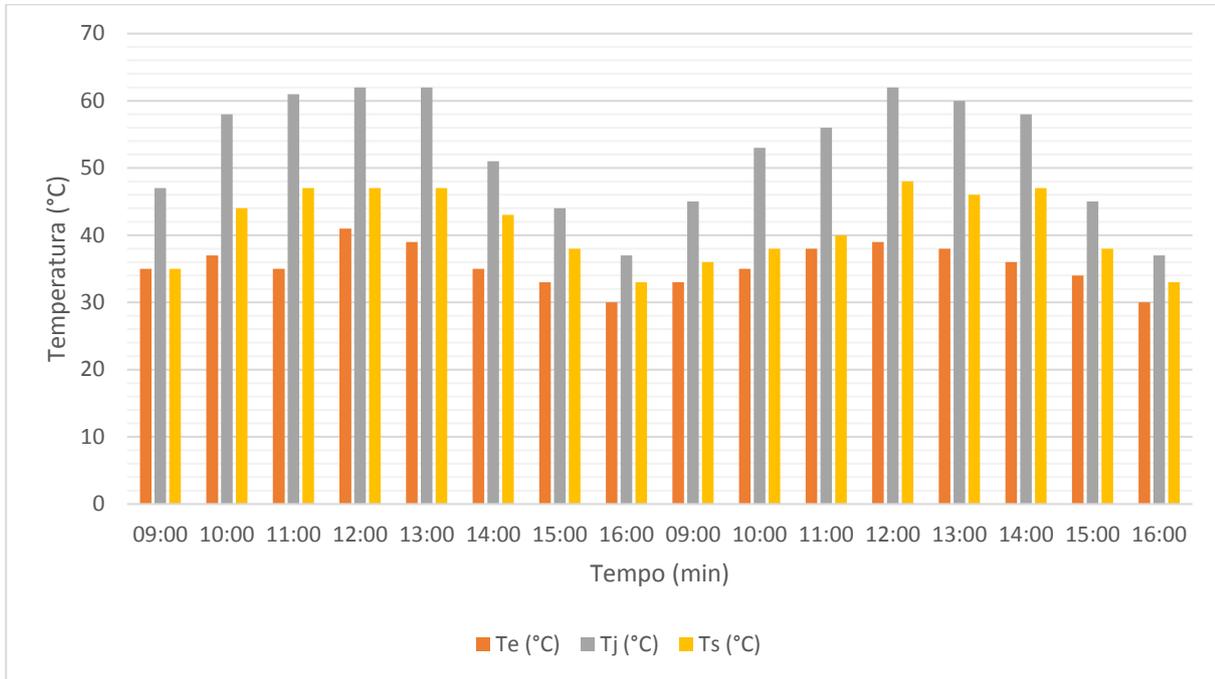
Também comparativamente ao E1, o E2 teve um rendimento térmico melhor. Apesar de o E2 ter sido realizado em três dias, ele apresentou o teor de umidade final adequado ao de uma fruta seca. Apresentou eficiência do processo de secagem e rendimento térmico do equipamento superiores. Se for comparado as irradiações solares médias incidentes nestes dois experimentos, nota-se que são praticamente iguais. Como o trabalho com uma fonte intermitente, onde os dois experimentos decorreram em dias de pouca irradiação solar, é notório que no E2, com três dias de experimento, foram obtidos os melhores resultados comparando-se estes dois experimentos iniciais.

4.3 Experimento 3 (E3), realizado em 08 e 09 de junho de 2016

Neste experimento, as condições climáticas foram bem melhores que às apresentadas no experimento 1 e 2. Com isso, no decorrer do experimento, a partir das características obtidas do fruto, percebeu-se que não havia a necessidade de mais que dois dias de experimento.

No Gráfico 15 podem ser vistos os valores para as temperaturas medidas durante o E3.

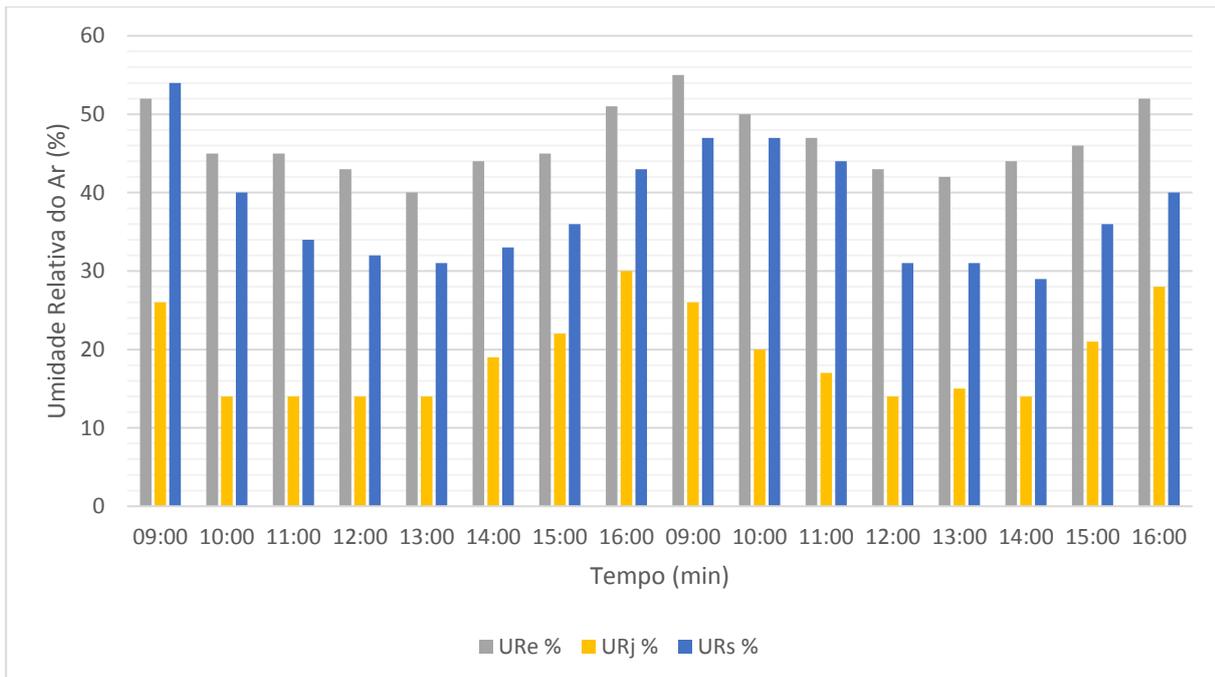
Gráfico 15 - Distribuição de temperatura no secador solar no E3.



Fonte: Próprio autor

O Gráfico 16 mostra a distribuição das umidades relativas do ar medidas durante o E3.

Gráfico 16 - Distribuição de umidade relativa do ar de secagem no secador solar no E3.



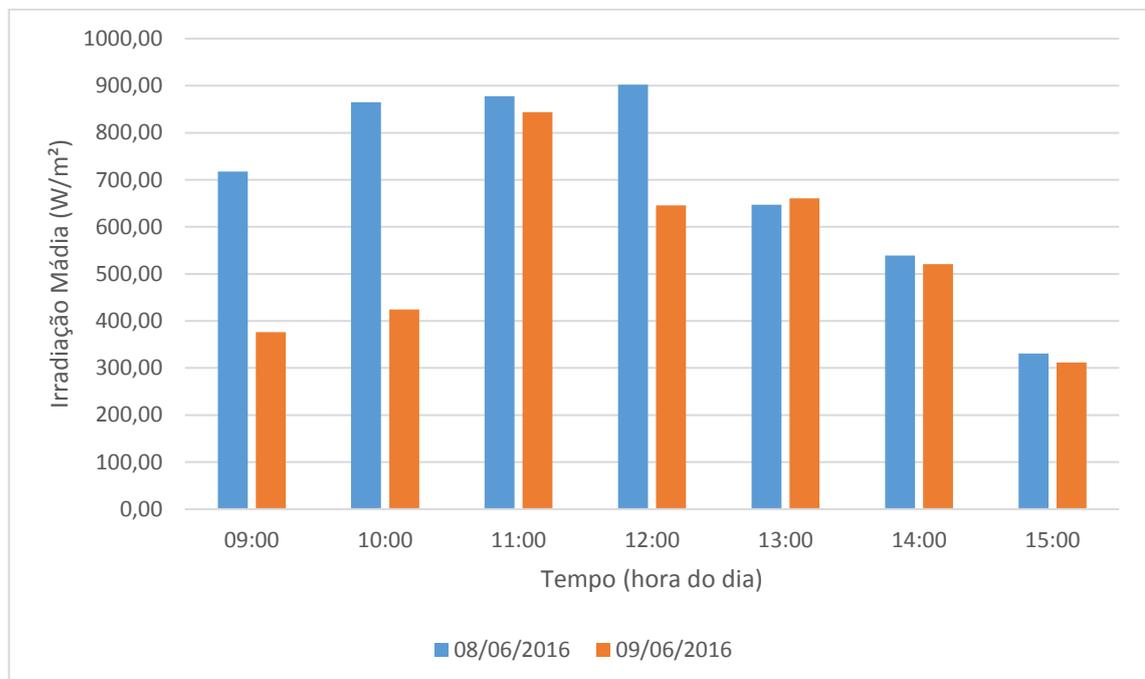
Fonte: Próprio autor.

Observando-se os valores obtidos e mostrados nos gráficos acima percebe-se que as temperaturas do ar na junção (entrada da câmara de secagem) estiveram, na maior parte do teste, em torno de 60°C, exceto nas últimas medições de cada dia, geralmente realizada as 16:00 h. É de se notar, também, que tais valores de temperatura obtidos, foram os maiores apresentados dentre os experimentos até então realizados, devido principalmente as condições climáticas favoráveis dos dias escolhidos para realização do Experimento 3. Estas condições foram importantes para que em dois dias fosse atingido o teor de umidade desejado no produto, sendo mais uma oportunidade de se comprovar a viabilidade do equipamento, desta vez, sob melhores condições operacionais.

Com relação a variação de umidade relativa do ar no interior do secador, pode ser observado novamente a influência da boa condição climática na qual o experimento foi realizado. A média de umidade relativa do ar na junção foi de 19,25%, sendo a mais baixa obtida até então no equipamento, credenciando ainda mais o ar ao processo de secagem.

O Gráfico 17 mostra a média horária da intensidade de radiação solar nos dias em que foram feitos os testes experimentais E3 e comprovam que a média dessas intensidades é maior, em comparação aos experimentos realizados anteriormente.

Gráfico 17 - Média das irradiações durante o E3.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com o Gráfico 17 é notório que no decorrer do primeiro dia as irradiações médias foram bem maiores, estando em torno 850 W/m^2 , até após a metade do primeiro dia de teste, onde devido a nebulosidade tem-se uma queda desse dado. Essa nebulosidade se apresentou no início do segundo dia de experimento, onde as irradiações foram da ordem de 400 W/m^2 , sendo inadequadas ao processo de secagem, até que na terceira medição a ausência de nuvens favoreceu o aumento da irradiação, contribuindo ao processo de secagem até o fim do E3.

Na Tabela 09 são apresentados os valores obtidos para massa de banana a cada 60 minutos de teste, sendo a primeira medição as 9:00 h e a última do dia as 16:00 h, para os dois dias do E3 (08 e 09 de junho de 2016). Na mesma tabela são apresentados os valores calculados para as variáveis: massa seca (que foi obtido através da estufa da UFCG), teor de umidade em base seca (X_{bs}), teor de umidade em base úmida (X_{bu}) e razão de umidade (RU).

Tabela 09 - Dados de massa obtidos no Experimento 3.

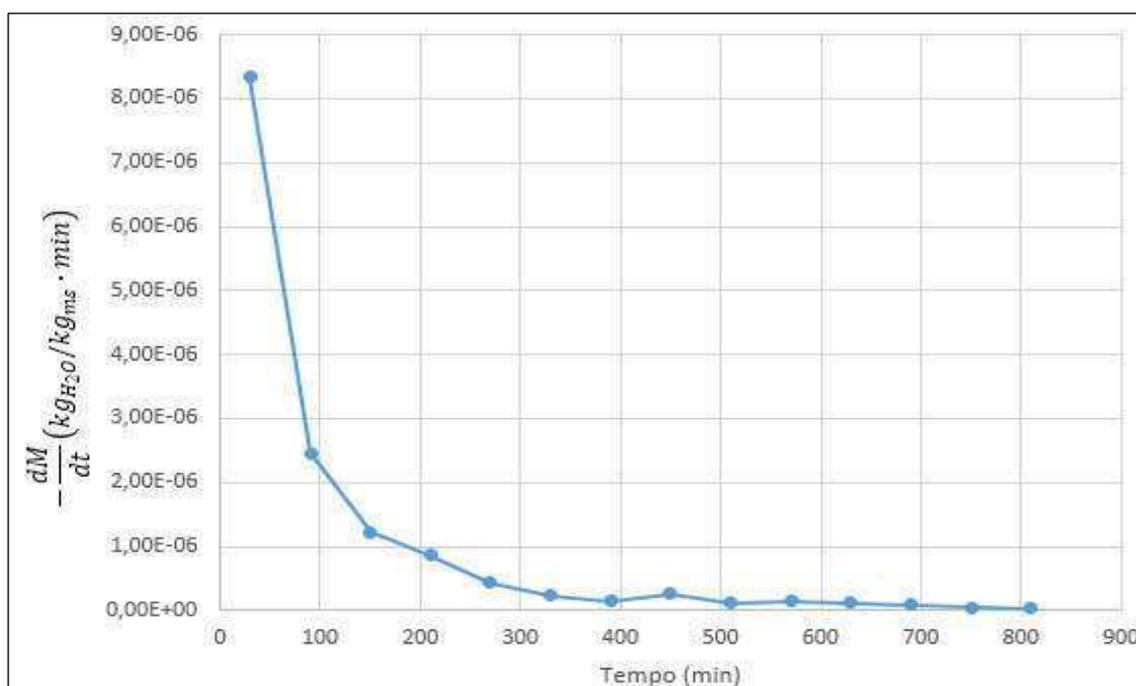
Data	Tempo de experimento (min)	Hora	Massa Total (g)	Massa Seca (g)	Teor de Água (b.u.)	Teor de Água (b.s.)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$
08/06/16	0	09:00	30,0	10,4	0,65	1,88	1,00
	60	10:00	27,4	10,4	0,62	1,63	0,84
	120	11:00	25,1	10,4	0,59	1,41	0,69
	180	12:00	23,2	10,4	0,55	1,23	0,57
	240	13:00	21,3	10,4	0,51	1,05	0,46
	300	14:00	20,1	10,4	0,48	0,93	0,38
	360	15:00	19,3	10,4	0,46	0,86	0,33
	420	16:00	18,7	10,4	0,44	0,80	0,29
09/06/16	420	09:00	18,7	10,4	0,44	0,80	0,29
	480	10:00	17,5	10,4	0,41	0,68	0,22
	540	11:00	16,9	10,4	0,38	0,62	0,18
	600	12:00	16,0	10,4	0,35	0,54	0,12
	660	13:00	15,2	10,4	0,32	0,46	0,07
	720	14:00	14,6	10,4	0,29	0,40	0,04
	780	15:00	14,2	10,4	0,27	0,36	0,01
	840	16:00	14,0	10,4	0,26	0,35	0,00

Fonte: Próprio autor

De acordo com a Tabela 09 que representa o E3, observa-se que o teor de umidade inicial da banana em base úmida foi de 65%. Este teor apresentado é considerado raro dentro da margem de teores apresentados na literatura, que variam em torno de 70% a 80% para a banana prata. Contudo, após 14 h (quatorze horas) de secagem, foi atingido o teor de umidade final foi de 25,7%, podendo ser considerado satisfatório e para o que se espera do teor de uma fruta considerada seca. O fato de ter atingido este teor de umidade final, no prazo de dois dias de experimento comprova que sob condições climáticas adequadas, o equipamento se mostra cada vez mais viável quanto a sua operacionalidade. Neste caso, o fator irradiação foi o que determinou o melhor desempenho do equipamento, quando comparado com os experimentos anteriores.

O Gráfico 18 traz a curva da taxa de secagem ao longo do Experimento 3. Os dados necessários à plotagem deste gráfico foram obtidos a partir da Tabela 09.

Gráfico 18 - Taxa de secagem no Experimento 3.



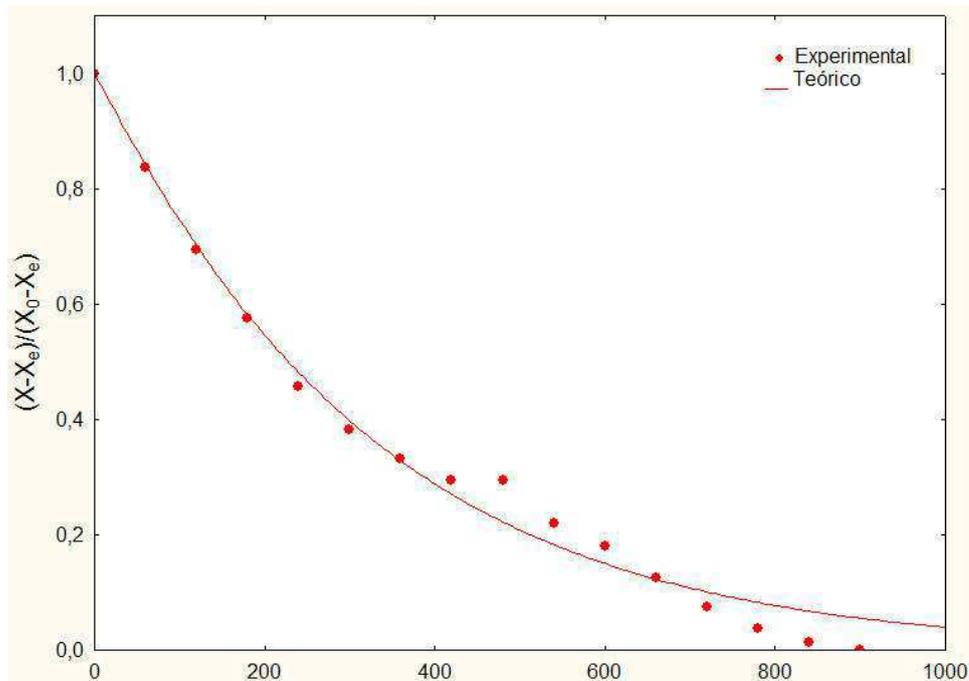
Fonte: Próprio autor

Mais uma vez observa-se que o comportamento da curva da taxa de secagem está adequado ao que era esperado, tendo sua maior variação no início do processo até se chegar à uma certa constância próximo do final do processo de secagem.

A curva de secagem mostrada no Gráfico 19 foi obtida através dos dados apresentados na Tabela 09, 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.

Gráfico 19 - Cinética de secagem do Experimento 3 ajustada ao modelo de Page.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com o Gráfico 19 é possível ver um ajuste bem adequado entre a curva de cinética e os pontos obtidos experimentalmente, até o momento que se aproxima do final do primeiro dia de experimento (em torno de 420 minutos), onde predomina a baixa irradiação que se reflete na lenta taxa de queda da razão de umidade. Já no segundo dia de experimento as divergências entre os pontos experimentais e a curva de cinética são maiores devido ao aumento da velocidade de secagem no início do dia por causa do aumento da irradiação e no final do dia devido à queda da velocidade de secagem por causa da aproximação do estado de equilíbrio e da dificuldade cada vez maior da perda de água do produto.

Pelo gráfico da cinética de secagem do E3 ajustado ao modelo matemático de Page, obteve-se um coeficiente de determinação de 99,34%, o que é significativo, assegurando que através desta curva, é possível prever o tempo necessário de secagem até que se chegue ao teor de umidade desejado no produto.

Para o cálculo do rendimento térmico utilizando método da potência útil, onde não se utiliza os dados de umidade relativa do ar, foram utilizadas as Equação 24 e 25, da maneira que se segue.

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (25)$$

Encontrados:

$$\dot{m} = 0,01058 \frac{kg}{s}$$

$$c_p = 1,005 \frac{kJ}{kg.K} \text{ a } 300 \text{ K (Moran e Shapiro, 2009)}$$

$$\overline{\Delta T} = 52,38 - 35,50 = 16,88 \text{ K}$$

Logo, substituindo tem-se:

$$P_u = 0,01058 \frac{kg}{s} \times 1,005 \frac{kJ}{kg.K} \times 16,88 \text{ K} = 0,179483 \frac{kJ}{s} = 179,483 \text{ W}$$

Como a área de incidência do coletor solar mede 1 m^2 e a média da irradiação solar nos dias do E3 foi de $618,13 \text{ W/m}^2$, chega-se ao rendimento térmico do coletor solar.

$$\eta_t = \frac{P_u}{A \cdot \overline{G}} \cdot 100 \quad (24)$$

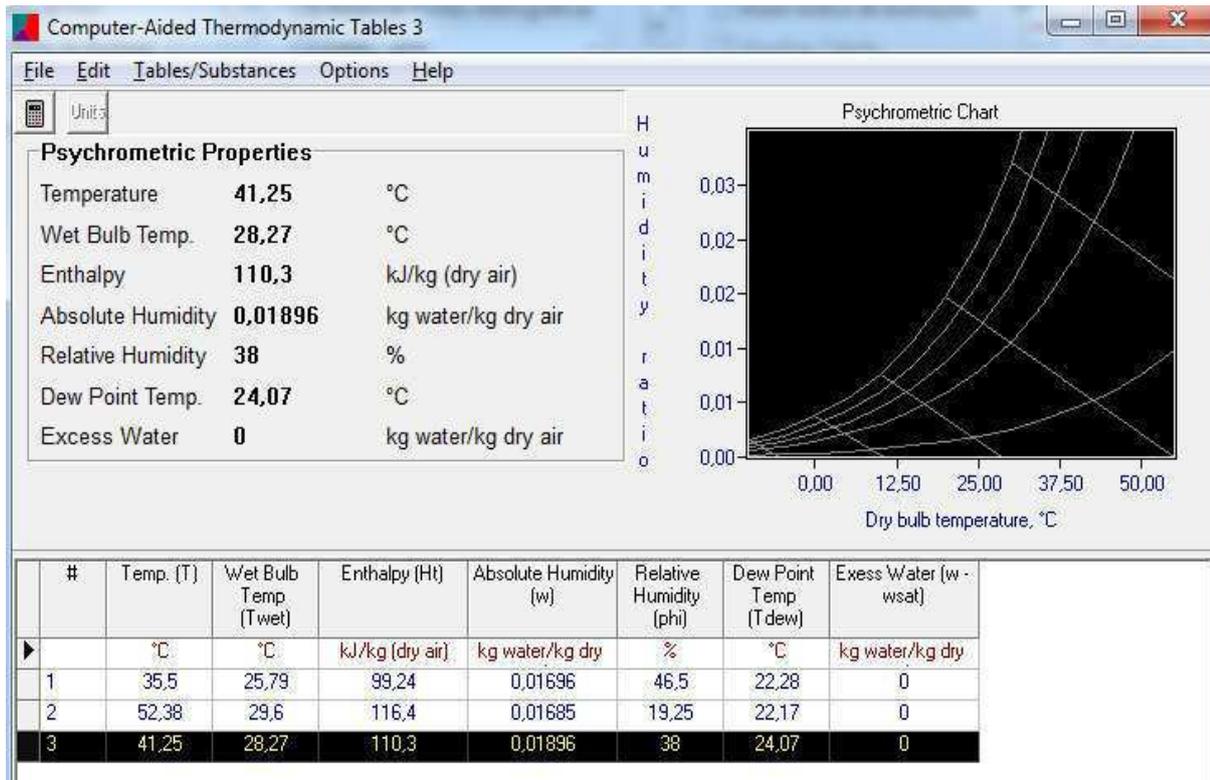
$$\eta_t = \frac{179,483 \text{ W}}{1 \text{ m}^2 \cdot 618,13 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \cdot 100 = 29,03\%$$

No método do balanço energético, foram utilizados os dados tanto de temperatura quanto os de umidade relativa do ar de secagem, e baseando-se na primeira lei da termodinâmica utilizou-se novamente as Equações 17 e 23.

Primeiramente foram buscados os dados de entalpia específicas, necessárias às equações termodinâmicas. Tais dados foram encontrados a partir das informações de temperatura e umidade relativa do ar já coletadas anteriormente e inseridas no CATT.

A Figura 46 apresenta como resultado os valores de entalpia e as demais propriedades termodinâmicas resultantes das medições realizadas, para os 3 pontos onde estão localizados os sensores de medição.

Figura 46 - Dados termodinâmicos do E3 obtidos pelo CATT



Fonte: Próprio autor

Desta forma, tem-se:

$$\dot{m} = 0,01058 \frac{kg}{s}$$

$$h_e = 99,24 \frac{kJ}{kg} \text{ e } h_j = 116,4 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_{solar \text{ horária}} = 618,13 \text{ W/m}^2$$

Assim, chega-se ao rendimento do coletor solar:

$$\eta_{coletor} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{m}(h_j - h_e)}{A \cdot \dot{Q}_{solar \text{ horária}}} \quad (17)$$

$$\eta_{coletor} = \frac{0,01058 \frac{kg}{s} (116,4 \frac{kJ}{kg} - 99,24 \frac{kJ}{kg})}{1 \text{ m}^2 \cdot 618,13 \text{ W/m}^2} = 29,37\%$$

Com isso, é possível chegar ao o rendimento do equipamento como um todo:

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

$$\eta_{\text{secador solar}} = 29,37\%$$

Para calcular a eficiência mássica do processo de secagem no E3, deve ser utilizada a Equação 28, onde se substitui os valores da massa inicial e final da banana no numerador e a massa total de água da banana no denominador. Tais valores são obtidos na Tabela 09.

$$\eta_p = \frac{30,0 - 14,0}{19,6} \times 100 = 81,63\%$$

Esta elevada eficiência do processo de secagem, equivalente à de processos que utilizam energia elétrica ou GLP, comprova a viabilidade do uso da energia solar na secagem de frutas.

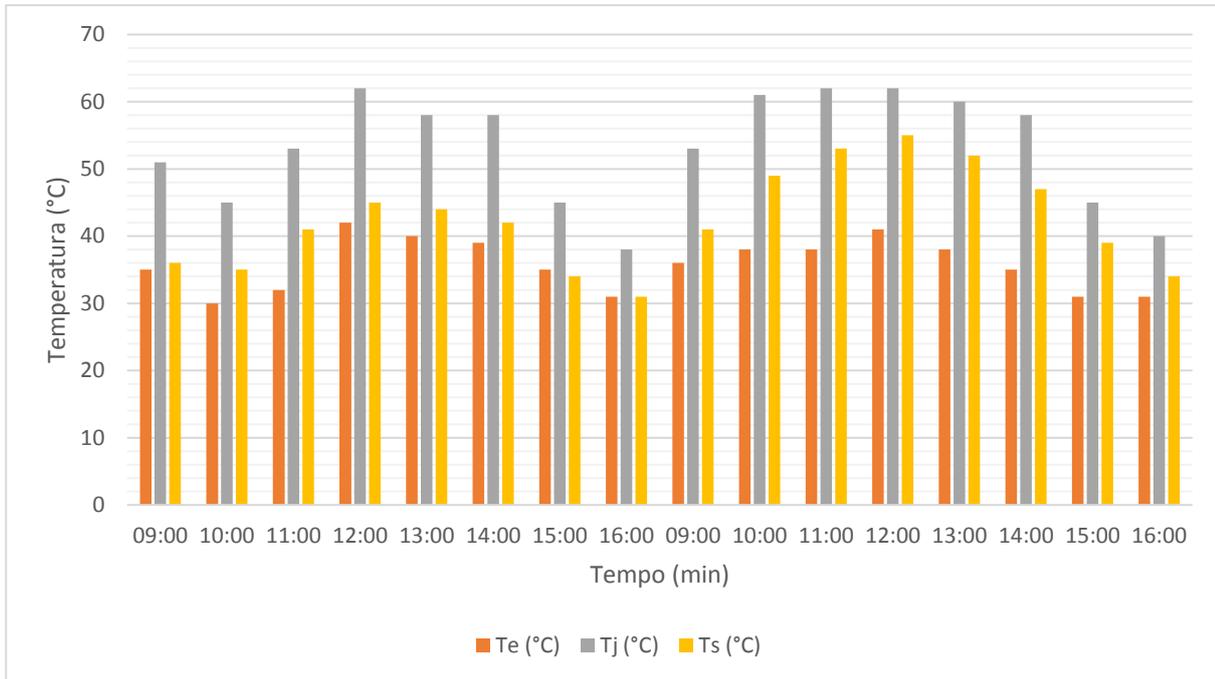
Comparativamente aos experimentos até então realizados, o E3 foi o que apresentou um rendimento térmico melhor. Isso ratifica a boa operacionalidade e viabilidade do sistema de secagem desenvolvido, principalmente quando posto em operação em condições favoráveis de irradiação solar, visto que neste experimento foi possível se chegar ao teor esperado de umidade final do produto e dentro do prazo estimado de dois dias. Além disso, é válido salientar que a irradiação média verificada neste experimento (618,13 W/m²) ainda não foi tão alta quanto esperado, causando assim, uma expectativa de que quanto maior a irradiação no momento do experimento, melhor o rendimento térmico obtido e a eficiência do processo de secagem, reduzindo-se o prazo para o produto atingir o teor de umidade final desejado.

4.4 Experimento 4 (E4), realizado em 21 e 22 de julho de 2016

O Experimento 4 foi o primeiro experimento realizado no período de inverno, porém, foi o que se realizou nas melhores condições climáticas. Com isso, foram necessários apenas dois dias de secagem para se obter um teor de umidade abaixo de 25% b.u. no produto. Este patamar de umidade do produto foi verificado inicialmente a partir da análise das características físicas do produto, ainda no processo de secagem, e posteriormente ratificada a partir da determinação da massa seca e do teor de umidade final do produto através da estufa.

Observa-se, no Gráfico 20, a distribuição de temperatura no secador solar durante o E4.

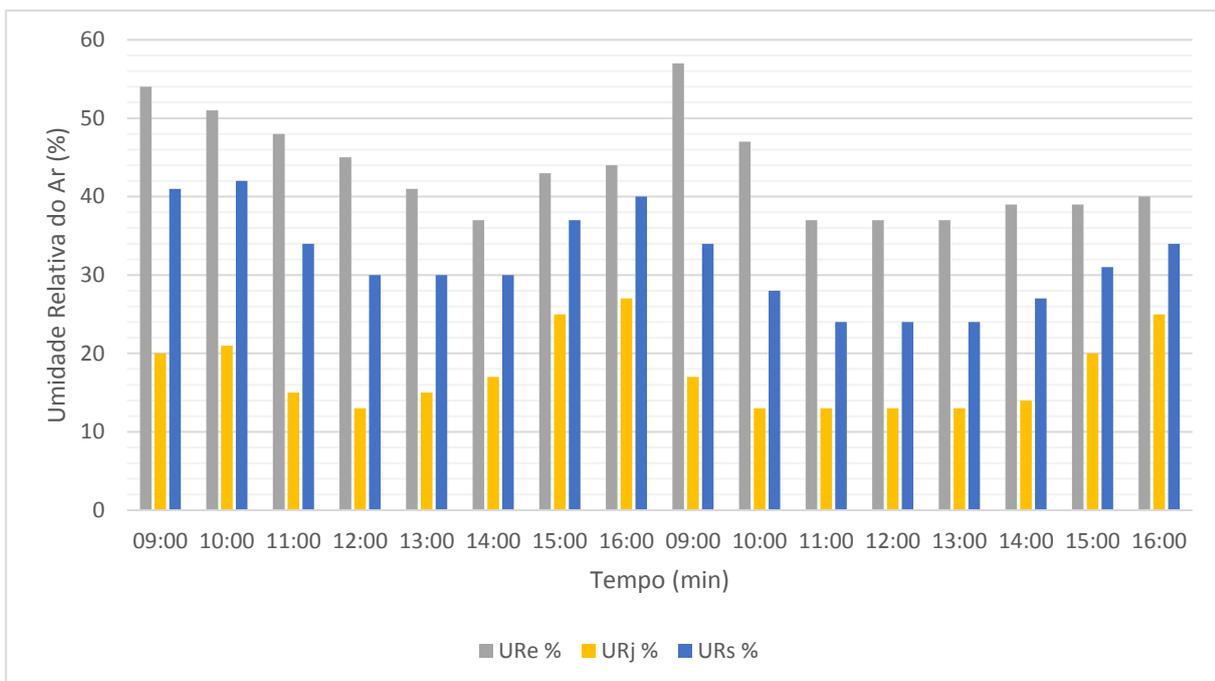
Gráfico 20 - Distribuição de temperatura no secador solar no E4.



Fonte: Próprio autor

O Gráfico 21 traz as umidades relativas do ar medidas no secador solar durante o E4.

Gráfico 21 - Distribuição de umidade relativa do ar de secagem no secador solar no E4.



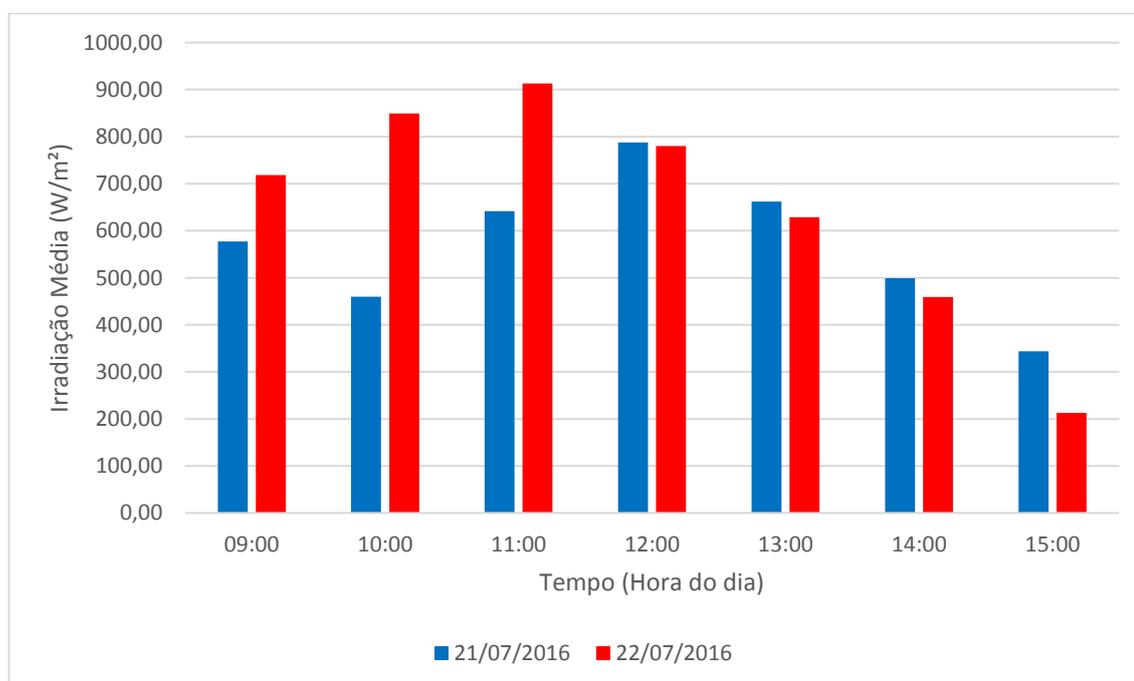
Fonte: Próprio autor.

Observando-se os valores obtidos e mostrados nos gráficos anteriores percebe-se que as temperaturas do ar na junção (entrada da câmara de secagem) estiveram, na maior parte do experimento, em torno de 60°C, exceto nas primeiras e últimas medições de cada dia. É de se notar, também, que tais valores de temperatura obtidos, foram os maiores apresentados dentre os experimentos até então realizados, devido principalmente as condições climáticas favoráveis dos dias escolhidos para realização do Experimento 4. Estas condições foram importantes para que em dois dias fosse atingido o teor de umidade abaixo dos 25% desejados, comprovando a viabilidade do equipamento, desta vez, operando sob melhores condições climáticas.

Com relação a variação de umidade relativa do ar no interior do secador, pode ser observado novamente a influência da boa condição climática na qual o experimento foi realizado. A média de umidade relativa do ar na junção foi de 17,56%, sendo a mais baixa obtida até então no equipamento, garantindo a melhor qualidade do ar de secagem para a remoção de umidade do produto.

O Gráfico 22 mostra a média horária da intensidade de radiação solar nos dias em que foram feitos os testes experimentais E4.

Gráfico 22 - Média das irradiações durante o E4.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com o Gráfico 19 é possível observar que os níveis de irradiação foram bem elevados e, principalmente, uniformes se forem comparados o primeiro e o segundo dia de

experimento. Com exceção das medições das 10:00 h e 11:00h, onde ocorreu uma variação de irradiação significativa, nos outros horários é possível observar a proximidade dos valores medidos nos dois dias. Isso se mostrou primordial para o bom desempenho do equipamento no processo de secagem. Diferentemente dos experimentos realizados até então, o E4 foi o que apresentou maior uniformidade nos índices de irradiação solar incidente. Nos outros experimentos realizados foi possível ver grande variação da irradiação, tanto em um mesmo dia, como quando era comparado um dia de secagem com o seguinte.

Neste experimento obteve-se uma irradiação média de 608,61 W/m², onde este índice poderia ser ainda melhor caso não tivesse ocorrido a presença súbita de grande nebulosidade entre as 10:00 h e 11:00 h do segundo dia de experimento.

Os reflexos desses níveis de irradiação apresentados no E4 podem ser observados nos índices de temperatura e umidade relativa do ar no secador solar, conforme podem ser vistos nos Gráficos 17 e 18. É notório que o aumento da temperatura do ar no interior do equipamento e redução da umidade relativa do ar estão diretamente ligados aos níveis de irradiação medidos. Assim, pode-se perceber claramente que as temperaturas e umidades relativas do ar observadas a cada hora, no primeiro e segundo dia de testes, estão condizentes com os seus respectivos níveis de irradiação solar incidente no equipamento.

Na Tabela 10, são apresentados os valores obtidos para massa de banana a cada 60 minutos de teste, sendo a primeira medição as 9:00 h e a última do dia as 16:00 h, para os dois dias do E4 (21 e 22 de junho de 2016). Na mesma tabela são apresentados os valores calculados para as variáveis: massa seca (que foi obtido através da estufa da UFCG), teor de umidade em base seca (X_{bs}), teor de umidade em base úmida (X_{bu}) e razão de umidade (RU).

Tabela 10 - Dados de massa obtidos no Experimento 4.

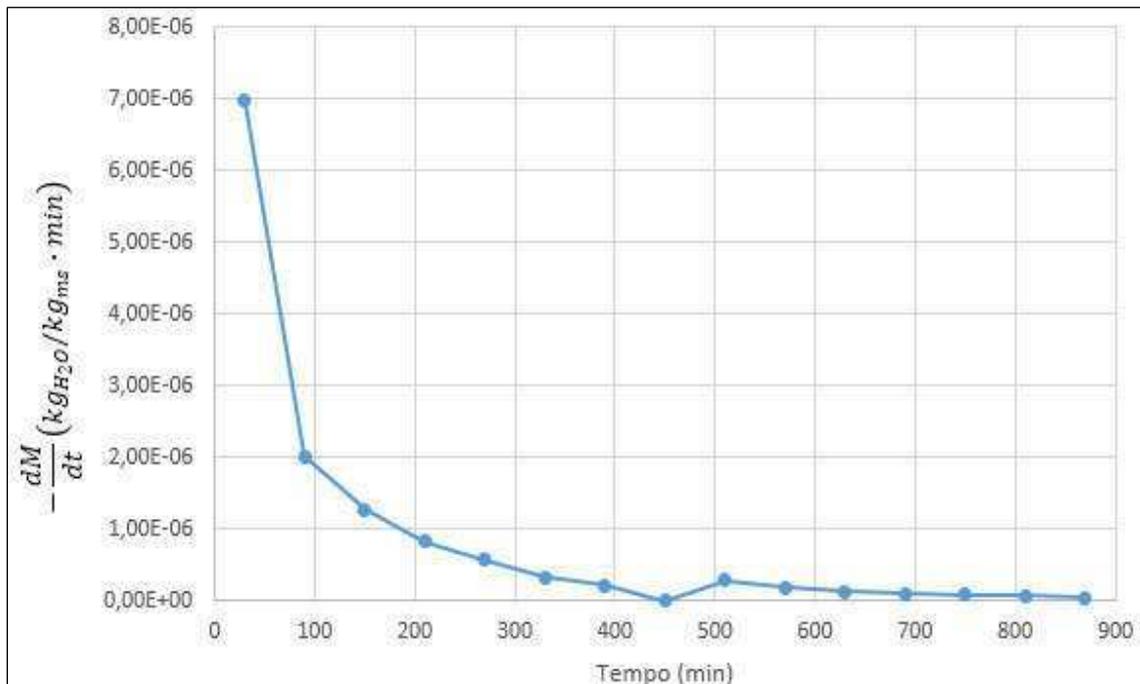
Data	Tempo de experimento (min)	Hora	Massa Total (g)	Massa Seca (g)	Teor de Água (b.u.)	Teor de Água (b.s.)	$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$
21/07/16	0	09:00	32,0	11,0	0,66	1,91	1,00
	60	10:00	29,7	11,0	0,63	1,70	0,87
	120	11:00	27,7	11,0	0,60	1,52	0,76
	180	12:00	25,6	11,0	0,57	1,33	0,65
	240	13:00	23,7	11,0	0,54	1,15	0,55
	300	14:00	22,0	11,0	0,50	1,00	0,45
	360	15:00	20,8	11,0	0,47	0,89	0,39
	420	16:00	19,9	11,0	0,45	0,81	0,34
22/07/16	420	09:00	19,9	11,0	0,45	0,81	0,34
	480	10:00	18,3	11,0	0,40	0,66	0,25
	540	11:00	17,1	11,0	0,36	0,55	0,19
	600	12:00	16,2	11,0	0,32	0,47	0,14
	660	13:00	15,4	11,0	0,29	0,40	0,09
	720	14:00	14,7	11,0	0,25	0,34	0,05
	780	15:00	14,1	11,0	0,22	0,28	0,02
	840	16:00	13,7	11,0	0,20	0,24	0,00

Fonte: Próprio autor

De acordo com a Tabela 10, observa-se que o teor de umidade inicial da banana em base úmida foi de 66%. Este teor apresentado é considerado abaixo dos teores apresentados na literatura, que variam em torno de 70% a 80% para a banana prata. Contudo, após 14 h (quatorze horas) de secagem, foi atingido o teor de umidade final foi de 20,0%, sendo considerado teor ideal para a banana seca. O fato de ter atingido este teor de umidade final, dentro do prazo de dois dias de experimento ratifica que sob condições climáticas adequadas, o equipamento se mostra cada vez mais viável quando a sua operacionalidade, sendo a irradiação solar determinante para o melhor desempenho do equipamento e do processo.

O Gráfico 23 traz a curva da taxa de secagem ao longo do Experimento 4. Os dados necessários à plotagem deste gráfico foram obtidos a partir da Tabela 10.

Gráfico 23 - Taxa de secagem no Experimento 4.

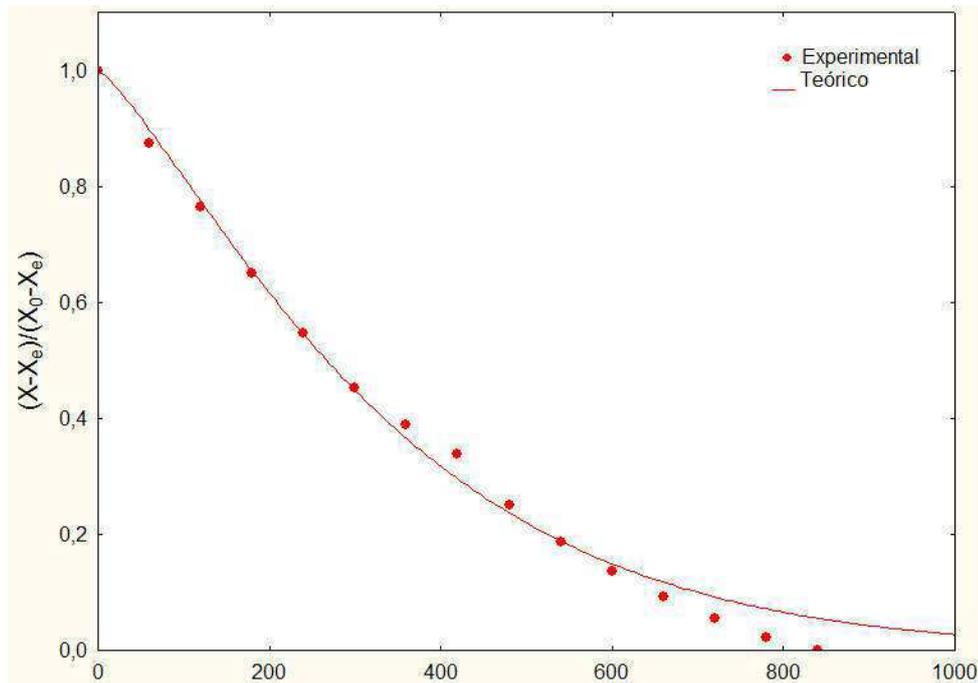


Fonte: Próprio autor

Com a apresentação das curvas das taxas de secagem (Gráficos 8, 13, 18 e 23), percebe-se que a taxa de secagem da banana prata (*Musa Spp.*) para todos os quatro experimentos, ocorreu exclusivamente no período de taxa decrescente. Este resultado é compatível com os trabalhos de Nunes (2016), Rodrigues (2014) e Farias (2011). O que viabiliza ainda mais o uso do modelo matemático empírico de Page.

A curva de secagem mostrada no Gráfico 24, foi obtida através dos dados apresentados na Tabela 10, 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.

Gráfico 24 - Cinética de secagem do Experimento 4 ajustada ao modelo de Page.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com o Gráfico 24 é possível notar um ótimo ajuste entre a curva de cinética e os pontos obtidos experimentalmente, ao longo de todo o experimento. Isso foi possível devido aos índices de radiação incidente serem bem equivalentes entre o primeiro e o segundo dia de experimento, sem oferecer grandes oscilações de irradiação, proporcionando com isso uma secagem mais constante e uniforme durante todo o processo.

Através do ajuste do gráfico da cinética de secagem do E4 ao modelo matemático de Page, chegou-se a um coeficiente de determinação de 99,55%, se mostrando significativo, assegurando que através desta curva, é possível prever o tempo necessário de secagem até que se chegue ao teor de umidade desejado no produto.

Para o cálculo do rendimento térmico utilizando método da potência útil, onde não se utiliza os dados de umidade relativa do ar, foram utilizadas as Equação 24 e 25, da maneira que se segue.

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (25)$$

Encontrados:

$$\dot{m} = 0,01058 \frac{kg}{s}$$

$$c_p = 1,005 \frac{kJ}{kg.K} \text{ a } 300 \text{ K (Moran e Shapiro, 2009)}$$

$$\overline{\Delta T} = 53,19 - 35,75 = 17,44 \text{ K}$$

Logo, substituindo tem-se:

$$P_u = 0,01058 \frac{kg}{s} \times 1,005 \frac{kJ}{kg.K} \times 17,44 \text{ K} = 0,18544 \frac{kJ}{s} = 185,44 \text{ W}$$

Como a área de incidência do coletor solar mede 1 m^2 e a média da irradiação solar nos dias do E4 foi de $608,61 \text{ W/m}^2$, chega-se ao rendimento térmico do coletor solar.

$$\eta_t = \frac{P_u}{A \cdot \overline{G}} \cdot 100 \quad (24)$$

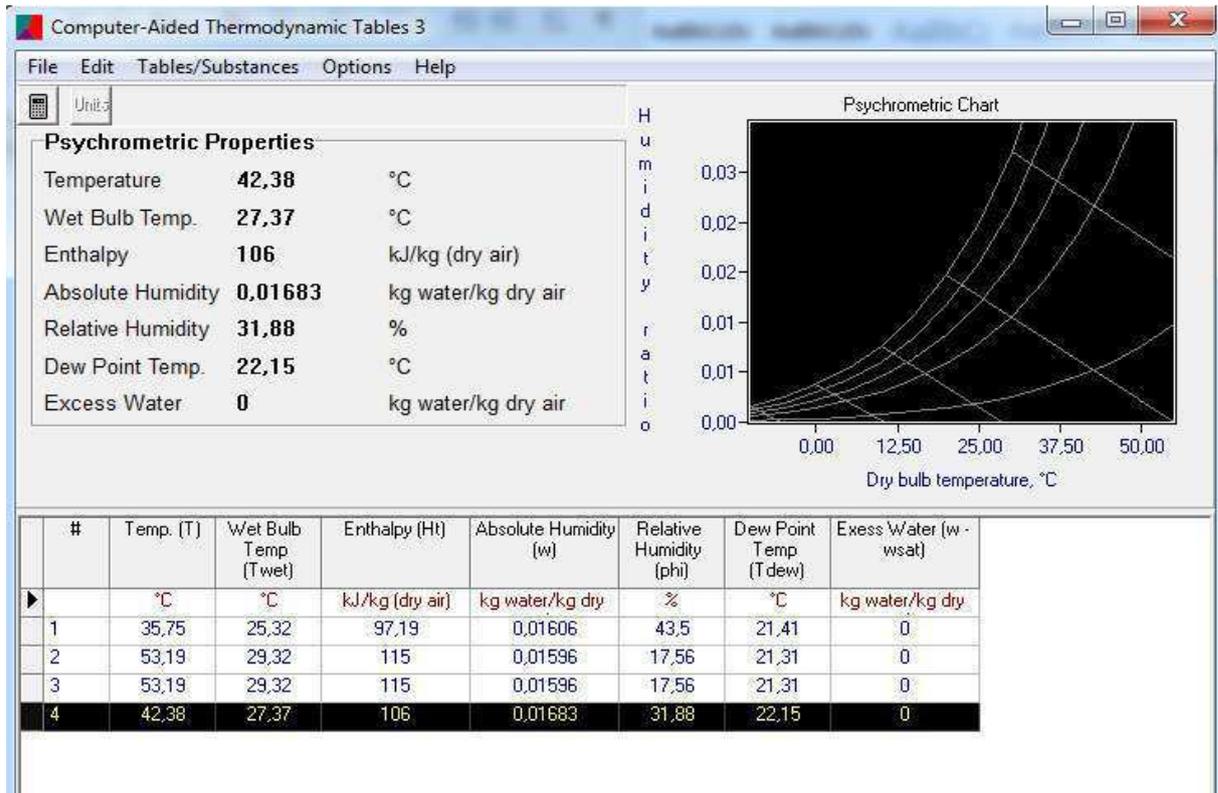
$$\eta_t = \frac{185,44 \text{ W}}{1 \text{ m}^2 \cdot 608,61 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \cdot 100 = 30,46\%$$

No método do balaço energético, foram utilizados os dados tanto de temperatura quanto os de umidade relativa do ar de secagem, e baseando-se na primeira lei da termodinâmica utilizou-se novamente as Equações 17 e 23.

Primeiramente foram buscados os dados de entalpia específicas, necessárias às equações termodinâmicas. Tais dados foram encontrados a partir das informações de temperatura e umidade relativa do ar já coletadas anteriormente e inseridas no CATT.

A Figura 47, apresenta como resultado os valores de entalpia e as demais propriedades termodinâmicas resultantes das medições realizadas, para os 3 pontos onde estão localizados os sensores de medição.

Figura 47 - Dados termodinâmicos do E4 obtidos pelo CATT.



Fonte: Próprio autor

Desta forma, tem-se:

$$\dot{m} = 0,01058 \frac{kg}{s}$$

$$h_e = 97,19 \frac{kJ}{kg} \text{ e } h_j = 115,0 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_{solar \text{ horária}} = 608,61 \text{ W/m}^2$$

Assim, chega-se ao rendimento do coletor solar:

$$\eta_{coletor} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{m}(h_j - h_e)}{A \cdot \dot{Q}_{solar \text{ horária}}} \quad (17)$$

$$\eta_{coletor} = \frac{0,01058 \frac{kg}{s} (115,0 \frac{kJ}{kg} - 97,19 \frac{kJ}{kg})}{1m^2 \cdot 608,61 \text{ W/m}^2} = 30,96\%$$

A partir disto, tem-se que o rendimento do equipamento como um todo foi, para o Experimento 4:

$$\eta_{\text{secador solar}} = \eta_{\text{coletor solar}} \quad (27)$$

$$\eta_{\text{secador solar}} = 30,96\%$$

Para calcular a eficiência mássica do processo de secagem no E4, deve ser utilizada a Equação 28, onde se substitui os valores da massa inicial e final da banana no numerador e a massa total de água da banana no denominador. Tais valores são obtidos na Tabela 10.

$$\eta_p = \frac{32,0 - 13,7}{21,0} \times 100 = 87,14\%$$

Esta elevada eficiência do processo de secagem, equivalente à de processos que utilizam energia elétrica ou GLP, comprova a viabilidade do uso da energia solar na secagem de frutas.

Comparativamente, dentre os quatro experimentos realizados, o E4 foi o que apresentou um rendimento térmico melhor. Esta evolução é notável ao longo do período em que foram feitos os experimentos e uma hipótese para esta evolução pode estar no fato de cada vez mais, com o passar do tempo, se aproximar a primavera e o verão, que são estações de temperaturas mais elevadas que o outono e o inverno, períodos em que se ocorreram os experimentos.

4.5 Análise das eficiências mássicas de secagem

Na Tabela 11 estão os dados de teor de umidade final alcançados (X_{buf}), bem como, a massa 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 11 - Parâmetros de massa e eficiência mássica de secagem de cada experimento.

Experimento	Datas	$X_{bui}(\%)$	$X_{buf}(\%)$	$m_{inicial}(g)$	$m_{final}(g)$	$m_{\text{água}}(g)$	$\eta_p(\%)$
1	25 e 26/04/2016	71,0	32,3	30,0	13,0	21,2	80,19
2	16 à 18/05/2016	70,7	23,5	30,0	11,5	21,3	86,85
3	08 e 09/06/2016	65,3	25,7	30,0	14,0	19,6	81,63
4	21 e 22/07/2016	65,6	19,7	32,0	13,7	21,0	87,14

Fonte: Próprio autor

A partir dos dados apresentados na Tabela 11, pode-se chegar ao valor médio das eficiências dos processos de secagem. Tal valor chegou a 83,95%, sendo uma eficiência mássica considerada elevada, demonstrando o potencial do equipamento e ratificando sua viabilidade operacional para o processo ao qual se destina.

4.6 Análise dos rendimentos médios do secador solar

A Tabela 12 apresenta os dados obtidos das médias de temperatura, umidade relativa do ar e irradiação média em todos os experimentos realizados.

Tabela 12 - Média dos parâmetros medidos nos processos de secagem.

Experimento	Datas	$\bar{G} \left(\frac{W}{m^2} \right)$	$\bar{T}_e (^{\circ}C)$	$\bar{T}_j (^{\circ}C)$	$\bar{T}_s (^{\circ}C)$	$\overline{UR}_e (\%)$	$\overline{UR}_j (\%)$	$\overline{UR}_s (\%)$
1	25 e 26/04/2016	598,89	34,88	49,13	39,25	51,31	24,06	40,06
2	16 à 18/05/2016	600,46	34,33	50,38	39,42	50,54	21,75	38,33
3	08 e 09/06/2016	618,13	35,50	52,38	41,25	46,50	19,25	38,00
4	21 e 22/07/2016	608,61	35,75	53,19	42,38	43,50	17,56	31,88

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 13 apresenta os valores referentes à potência transferida ao fluido de trabalho durante cada processo e, por conseguinte, o rendimento térmico do equipamento calculado pelo método da potência útil.

Tabela 13 - Rendimento térmico do coletor solar calculado pelo método da potência útil.

Experimentos	Datas	$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T (W)$	$\eta_t = \frac{P_u}{A_1 \cdot \bar{G}} \cdot 100$
1	25 e 26/04/2016	151,519	25,30
2	16 à 18/05/2016	170,658	28,42
3	08 e 09/06/2016	179,483	29,03
4	21 e 22/07/2016	185,438	30,46

Fonte: Próprio autor

Analisando os dados da Tabela 13, é possível perceber que o rendimento térmico médio do coletor solar pelo cálculo da potência útil foi de 28,30%.

A Tabela 14, mostrada a seguir, traz os valores dos rendimentos térmicos do coletor solar, da câmara de secagem e, conseqüentemente, do secador solar, calculados pelo método do balanço energético.

Tabela 14 - Rendimento térmico do coletor solar calculado pelo balanço energético.

Experimentos	Datas	$\eta_{coletor}(\%)$
1	25 e 26/04/2016	25,44
2	16 à 18/05/2016	29,14
3	08 e 09/06/2016	29,37
4	21 e 22/07/2016	30,96

Fonte: Próprio autor.

De posse dos dados da Tabela 14, pode-se verificar que o rendimento térmico médio do coletor solar calculado pelo método do balanço energético, utilizando as equações derivadas da primeira lei da termodinâmica, foi de 28,72%. Sendo assim, pode-se perceber que as duas metodologias de cálculo levam a valores equivalentes e, portanto, são aceitas. É necessário salientar ainda que estes rendimentos encontrados, estão acima da média para equipamentos semelhantes, relatados na literatura, que segundo Hubackova et al. (2014) e Joshi et al. (2005), estão entre 15 a 20%. A obtenção desse rendimento superior se deu, devido a implantação das inovações, como o uso do capacitor térmico e da proporção escolhida entre os volumes da câmara de secagem em relação ao coletor solar, que foi de 1:5.

4.7 Análise dos ajustes das curvas de cinética de secagem

Para verificação da significância estatística da correlação obtida entre os valores oriundos da curva de secagem e os valores obtidos experimentalmente faz-se necessário analisar os valores encontrados para os coeficientes de correlação (R^2).

Na Tabela 15, mostrada a seguir, são apresentados, para cada experimento, os valores de R^2 (coeficiente de determinação) e dos parâmetros n e k .

Tabela 15 - Coeficientes de determinação dos experimentos, ajustados ao modelo de Page

Experimentos	Datas	Parâmetros		
		n	k	R^2 (%)
1	25 e 26/04/2016	1,0928	0,0015	97,96
2	16 à 18/05/2016	1,2225	0,0004	99,40
3	08 e 09/06/2016	1,0410	0,0024	99,34
4	21 3 22/07/2016	1,2464	0,0006	99,56

Fonte: Próprio autor.

Segundo Rodrigues e Iemma (2009), para que uma equação possa ser utilizada na predição de um processo, o coeficiente de determinação deve ser superior a 95%. Portanto, o modelo matemático analisado serve para predizer o momento no qual o processo atinge o teor de umidade desejado.

O modelo de Page apresentou um coeficiente de determinação média de 99,06% e, portanto, é recomendado para análise do processo de secagem de banana com o secador solar desenvolvido. Desta forma pode-se afirmar que aproximadamente 99,06% das curvas obtidas experimentalmente podem ser representadas pelas curvas do modelo adotado.

Capítulo V
CONCLUSÕES

5 CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos e já apresentados, é possível concluir que o secador solar, desenvolvido neste trabalho e testado no processo de secagem de banana, mostrou-se compatível com os resultados esperados, funcionando plenamente e produzindo como resultado um produto final de elevado padrão de qualidade.

Os resultados obtidos nos experimentos comprovam que o dimensionamento e a implantação do capacitor térmico no interior do coletor solar, bem como o dimensionamento da câmara de secagem na proporção escolhida (1/5 do volume do coletor solar) foram tecnicamente importantes.

A presença do *cooler* na saída da câmara de secagem, acionado por um mini painel fotovoltaico, garantiu uma melhor circulação do ar de secagem, proporcionando a convecção forçada deste e promovendo um tempo de secagem menor.

O sistema de aquisição de dados, formado pelos três sensores e pela placa de Arduino, tornou possível calcular o rendimento do coletor solar através da medição de temperatura e umidade relativa do ar, através do balanço de energia e da aplicação destes valores nas equações oriundas da primeira lei da termodinâmica.

A obtenção de uma eficiência mássica média no processo de secagem em torno de 83,95%, é compatível com valores relatados na literatura, e mostra a viabilidade técnica e operacional do equipamento. O rendimento térmico médio do coletor solar, foi de 28,30% no método da potência útil e de 28,72% no método do balanço energético, mostrando que existe equivalência entre estas duas formas de cálculo das eficiências. Estes resultados são ligeiramente superiores aos descritos na literatura para equipamentos de secagem que utilizam energia solar como fonte de energia.

Os resultados mostraram que para as curvas de secagem, o modelo matemático de Page foi representativo, dados os valores elevados dos coeficientes de determinação que foram de 99,06%, comprovando-se com isso, que o modelo matemático adotado é aceitável para se afirmar, com precisão, o tempo necessário para a banana atingir os valores desejados de teor de umidade em base úmida em torno de 25%.

Os resultados obtidos nos experimentos do sistema de secagem foram compatíveis com os relatados na literatura, apresentando uma ligeira redução no tempo de secagem devido ao aumento de temperatura obtida e a conseqüente redução da umidade relativa do ar de secagem promovendo uma melhor qualidade das propriedades do ar de secagem no interior da câmara.

O incremento do capacitor térmico no interior do coletor solar e as proporções escolhidas na relação entre o coletor solar e a câmara de secagem, foram fundamentais para o bom desempenho do equipamento, demonstrando que tais inovações são relevantes para o desenvolvimento de futuros equipamentos de secagem solar. Além disso, o equipamento desenvolvido foi construído com materiais de baixo custo, facilmente encontrados no comércio local, garantindo que o secador solar possa ter sua tecnologia disseminada no ambiente da agricultura familiar, atendendo as demandas dos produtores da região.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Como a energia solar é uma fonte de energia intermitente, testar um sistema de secagem híbrido com uso de energia solar e de outra fonte energética auxiliar tipo GLP ou gás natural;
- Testar a utilização de uma célula de carga ligada ao sistema de aquisição de dados para medir a massa do produto a ser seco automaticamente, em intervalos de tempo programados, sem a necessidade do operador do secador se deslocar até o equipamento para fazer a medida da massa manualmente;
- Testar a aplicação de materiais mais sofisticados no secador solar, a fim de observar se o incremento no rendimento térmico do secador e da eficiência mássica do processo de secagem, justificam o aumento no custo de produção do equipamento.

REFERÊNCIAS

AKINOLA, O. A.; AKINYEMI, A. A.; BOLAJI, B. O. Evaluation of traditional and solar fish drying systems towards enhancing fish storage and preservation in Nigeria (Abeokuta Local Governments as Case Study). **Journal of Fisheries International**, Vol. 1, n. 2, p. 44-49, 2006.

ALONSO, Luís Felipe Toro. **Algoritmo de Seleção e Dimensionamento de Secadores**. 2001. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 2001.

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução - RDC nº 272, de 22 de setembro de 2005. Características mínimas de qualidade a que devem obedecer os produtos vegetais. Brasília, DF, 2005.

Arduino e Cia. **Sensor de umidade e temperatura DHT11**. 20/05/2013. Disponível em: <<http://www.arduinoocia.com.br/2013/05/sensor-de-umidade-e-temperatura-dht11.html>>. Acesso em: 26/05/2016.

BARBOSA, José Rui Perez. **Estudo da viabilidade de uso de secadores solares fabricados com sucatas de luminárias**. 2001. 35 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2011.

BlueSol Educacional. **Energia Solar: Como funciona o efeito fotovoltaico**. 23/12/2011. Disponível em: <<http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-o-efeito-fotovoltaico/>>. Acesso em: 26/03/2016.

BORGES, Soraia Vilela; MANCINI, Maurício Cordeiro; CORRÊA, Jefferson Luiz Gomes; LEITE, Julia Benedito. Secagem de bananas prata e d'água por convecção forçada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, SP, v. 30 (3), p.605-612, 2010.

BRAGA, Renata Pereira. **Energia Solar Fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. 2008. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2008.

BROOKER, Donald B.; BAKKER-ARKEMA, Fred W.; HALL, Carl W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold. 450p. 1992.

CANO-CHAUCA, Milton.; RAMOS, Afonso M.; STRINGHETA, Paulo C.; MARQUES, José Antônio; SILVA, Pollyana Ibrahim. **Curvas de secagem e avaliação da atividade de água da banana passa**. Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, v.22 (1), p.121-132, 2004.

CONDE, Frederico Massaud. **Simulação de secagem de cenoura (*Daucus carota L.*) em secador de bandeja**. 2004. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2004.

COSTA, Antônio Raimundo da Silva. **Sistema de secagem solar para frutos tropicais e modelagem da secagem de banana em um secador de coluna estática**. 2008. 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2008.

DALPASQUALE, Valdecir Antônio. Procedimentos essenciais de recepção e limpeza de grãos. In: LORINI, Irineu; MIIKE, Lincoln Hiroshi; SCUSSEL, Vildes Maria. **Armazenagem de grãos**. 1ª Edição. Campinas, SP: Instituto Biogenesis, p.191-212, 2002.

FILHO, Daniel Basconcello. **Curso de Arduino – Aula 2 – Arquitetura do Hardware de uma placa**. 20/02/2016. Disponível em <<http://www.robotizando.com.br/pt-br/category/mini-curso-on-line/>>. Acesso em: 12/05/2016.

EMPREGO & RENDA. **Frutas desidratadas - uma opção de saúde e renda**. Disponível em: <<http://www.empregoerenda.com.br/ideias-de-negocios/cursos/158-frutas-desidratadas-uma-opcao-de-saude-e-renda>>. Acesso em: 27/03/2016.

FARIAS, Raimundo Pereira de. **Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos**. 2011. 68 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2011.

FIOREZE, Romeu. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. 1ª Edição. João Pessoa, PB: Editora Universitária da UFPB, 229p, 2004.

GUERRA, Maria Isabel da Silva; VARELLA, Fabiana Karla de Oliveira Martins. Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo na cidade de Mossoró-RN. **Revista Holos**. Mossoró, RN. Ano 30, Vol. 4, p. 241-268, 2014.

GOMES, Ítalo de Andrade. **Desenvolvimento Experimental de um Secador Solar de Frutas com Aproveitamento Multienergético**. 2015. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2015.

GOMES, Ítalo de Andrade; NUNES, Antonio Gomes; GRILO, Marcelo Bezerra. **Testes experimentais em um secador termo solar de exposição indireta usado para produzir banana-passa**. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, V CBES, 2014, Recife. *Anais do V CBES*, Vol. 1, p. 1-8, Recife, PE: ABENS, 2014.

GOUVEIA, Josivanda Palmeira Gomes de; ALMEIDA, Francisco de Assis Cardoso; FARIAS, Eliana da Silva; SILVA, Manassés Mesquita da; CHAVES, Maria da Conceição Veloso; REIS, Ligia Sampaio. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB. Ed. Especial, n.1, p. 65-68, 2003.

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

GRILO, Marcelo Bezerra; LEITE, Antônio Pralon Ferreira; ANDRADE, Rodrigo Ronelli Duarte; BELO Francisco Antônio; MEUNIER, Francis. 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 UFCG, 10 p. 2013.

HUBACKOVA, Anna; KUCEROVA, Iva; CHRUN, Rithy; CHALOUPOKOVA, Petra; BANOUT, Jan. Development of solar drying model for selected Cambodian fish species. **The Scientific World Journal**. v.2014, 10p, 2014.

IBRAF – Instituto Brasileiro de Frutas. **Panorama da cadeia produtiva das frutas em 2012 e projeções para 2013**. Brasília, 127 p. 2013.

JIANG, Hao; ZHANG, Min; MUJUMDAR, Arun S. Microwave Freeze-Drying Characteristics of Banana Crisps. **Drying Technology**, v. 28, p. 1377-1384, 2010.

JOSHI, Chandra B.; GEWALI, Mohan B.; BHANDARI, Ranchandra C. Performance of Solar Drying: A Case Study of Nepal. **IE (I)-Journal-ID**, v.85, p.53-57, 2004.

LEITE, Julia Benedito; MANCINI, Maurício Cordeiro; BORGES, Soraia Vilela. Effect of drying temperature on the quality of dried bananas cv. Prata and d'água. **Lebensmittel Wissenschaft and Technology**, v. 40, n. 2, p. 319-323, 2007.

LEVY-COSTA, Renata Bertazzi; SICHIERI, Rosely; PONTES, Nézio dos Santos; MONTEIRO, Carlos Augusto. Disponibilidade domiciliar de alimentos no Brasil: distribuição e evolução (1974-2003). **Revista Saúde Pública**, Vol. 39, n. 4, p. 530-540, 2005.

LIMA, Antônio Gilson Barbosa de. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de banana**. 1999. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 1999.

LIMA, Antônio Gilson Barbosa de; NEBRA, Silvia Azucena; QUEIROZ, Marlene Rita de. Aspectos científico e tecnológico da banana. Comunicado técnico. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB. v.2, n.1, p.87-101, 2000.

MACHADO, Antônio Victor. **Estudo da secagem do pedúnculo do caju em sistema convencional e solar: modelagem e simulação do processo**. 2009. 72 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2009.

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**. (Série Frutas Tropicais, 3), São Paulo, SP: Secretaria da Agricultura. 197p. 1978.

MELO, B.; SILVA, C. A.; ALVES, P.R.B. **Processamento mínimo de hortaliças e frutas**. Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Ciências Agrárias, Núcleo de Estudos em Fruticultura no Cerrado. 2003. Disponível em <<http://www.fruticultura.iciag.ufu.br/pminimo.htm>>. Acesso em: 28/03/2016.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Rio de Janeiro. LTC, 2009.

NGUYEN, Minh-Hue; PRICE, William 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, Antonio Gomes; GOMES, Ítalo de Andrade; JÚNIOR, José Jorge da Silva; GRILO, Marcelo Bezerra. 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, ISSN 2236-4420, setembro, 2013.

NUNES, Antonio Gomes; GOMES, Ítalo de Andrade; GRILO, Marcelo Bezerra. **Testes experimentais com secador solar de exposição direta para desidratação de abacaxi**. In: VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014, Uberlândia, MG. *Anais do CONEM* 2014, v. 8, p. 1-7, 2014.

NUNES, Antonio Gomes. **Desenvolvimento experimental de um secador solar multienergético para a secagem de frutas**. 2016. 198 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2016.

ORIKASA, Takahiro; WU, Long; SHIINA, Takeo; TAGAWA, Akio. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. **Journal of Food Engineering**. v. 85, n. 2, p. 303-308, 2008.

PAN, Zhongli; SHIH, Connie; MCHUGH, Tara H.; HIRSCHBERG, Edward; Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying. **LTW – Food Science and Technology**. v. 41, p. 194-195, 2008.

PARK, Kil Jin Brandini; ALONSO, Luiz Felipe Toro; CORNEJO, Felix Emilio Prado; FABBRO, Inácio Maria Dal; PARK, Kil Jin. Seleção de secadores: fluxograma. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB. v. 9, n. 2, p. 179-202, 2007.

PENEIRO, Júlio Cesar; MELO, Liliane Pimenta de; CORADI, Thiago Billato. Construção de aquecedor solar de baixo custo sem cobertura: análise experimental da eficiência térmica para vários ensaios. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Nova Iguaçu. v.10, n.1, p.18-34, 2010.

PHOUNGCHANDANG, Singhanat; WOODS, J. L. Moisture diffusion and desorption isotherms for banana. **Journal of Food Science**, v. 65, p. 651-657, 2000.

PRAKASH, Om; ANILKUMAR, Anil. Solar greenhouse drying: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 905-910, 2013.

RODRIGUES, Andréa Fernandes. **Modelagem Matemática do Estudo Experimental das Secagens Contínua e Intermitente de Bananas**. 197 p. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, PB. 2014.

RODRIGUES, Maria Isabel; IEMMA, Antônio Francisco. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 2ª Edição. São Paulo, SP, 358p. 2009.

SANTOS, Jailson Charles dos; SANTOS, Rodolfo de Sousa; BARROS, Glauco Demóclito Tavares de; SANTOS, Jacques César dos; GURGEL, José Maurício; MARCONDES, Francisco. **Estudo Numérico da Cinética de Secagem em Bananas**. In: IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, PB. 2010.

SAVICKI, Darci Luiz. **Análise numérica tridimensional e investigação experimental do comportamento térmico e hidrodinâmico de reservatórios térmicos cilíndricos**. 2007. 111f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2007.

SILVA, Juarez de Sousa e; DONZELLES, Sergio Maurício Lopes; CORRÊA, Paulo César. **Secagem de Grão com Energia Solar**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, p.171-189, 2006.

SILVA, Idelfonso Generôzo da. **Viabilidade técnica e econômica de secadores solar e elétrico na desidratação de bananas no estado do Acre**. 2010. 55f. Dissertação (Mestrado

em Agronomia). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, AC. 2010.

SILVA, Wilton Pereira da; SILVA, Cleide M.D.P. da S. e; GAMA, Fernando J.A; GOMES, Josivanda Palmeira. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 13 p. 67-74, 2013.

SMITABHINDU, R.; JANJAI, Serm; CHANKONG, Vira. Optimization of a solar-assisted for drying banana. **Renewable Energy**, v. 33, p. 1523-1531, 2008.

SOARES, Antonio Gomes. **Desperdício de alimentos no brasil – um desafio político e social a ser vencido**. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA, 5 p. 2002.

Só Biologia. **Os Planetas: Movimento de Rotação** Disponível em: <<http://www.sobiologia.com.br/conteudos/Universo/sistemasolar2.php>>. Acesso em: 26/03/2015.

SOUZA, Luiz Guilherme Meira de; Mota, Maria Kalionara de Freitas; COSTA, João Batista de Sousa; BARBOSA, José Rui Peres; BATISTA, Salomão Sávio; LIMA, Flávio Anselmo Silva de. **Construção de um secador solar a partir de sucatas de tambor de lixo**. In: VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luís, MA. 2012.

TRIGUEIRO, André. **Mundo Sustentável 2: novos rumos para um planeta em crise**. São Paulo, SP: Globo, 2012.

TUNDE-AKINTUNDE, Toyosi Y. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. **Renewable Energy**, v. 36, p. 2139-2145, 2011.

WAEWSAK, Jompob; CHINDARUKSA, Sirinuch, PUNLEK, Chantana. A mathematical modeling study of hot air drying for some agricultural products. **Thammasat International Journal of Science and Technology**, v. 11, n. 1, p. 14-20, 2006.

APÊNDICES

Apêndice A – Tabelas de distribuição de temperatura e umidade relativa do ar em cada experimento;

Apêndice B – Projeto do secador solar.

Apêndice A
TABELAS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO
AR EM CADA EXPERIMENTO

Tabela A1 - Distribuição de temperatura e umidade relativa do ar no secador solar durante o E1

Data	Tempo de Experimento (min)	Hora	Temperatura			Umidade Relativa		
			$T_e(^{\circ}C)$	$T_j(^{\circ}C)$	$T_s(^{\circ}C)$	$UR_e(\%)$	$UR_j(\%)$	$UR_s(\%)$
25/04/2016	0	09:00	31	44	36	58	25	41
	60	10:00	40	62	46	46	14	36
	120	11:00	35	58	43	45	15	36
	180	12:00	35	47	38	48	23	39
	240	13:00	30	37	33	54	31	43
	300	14:00	34	46	37	51	25	41
	360	15:00	29	35	31	54	35	47
	420	16:00	26	30	27	70	54	65
26/04/2016	420	09:00	38	49	38	50	30	48
	480	10:00	35	57	43	49	17	38
	540	11:00	41	62	47	45	14	35
	600	12:00	41	62	49	46	13	28
	660	13:00	41	62	46	47	13	30
	720	14:00	38	57	47	49	18	33
	780	15:00	34	43	36	49	25	37
	840	16:00	30	35	31	60	33	44

Fonte: Próprio autor.

Tabela A2 - Distribuição de temperatura e umidade relativa do ar no secador solar durante o E2

Data	Tempo de Experimento (min)	Hora	Temperatura			Umidade Relativa		
			$T_e(^{\circ}C)$	$T_j(^{\circ}C)$	$T_s(^{\circ}C)$	$UR_e(\%)$	$UR_j(\%)$	$UR_s(\%)$
16/05/2016	0	09:00	29	45	34	64	27	48
	60	10:00	38	56	39	49	17	43
	120	11:00	36	53	41	48	18	40
	180	12:00	38	54	38	46	17	41
	240	13:00	38	57	43	45	15	35
	300	14:00	34	48	39	48	19	36
	360	15:00	31	41	36	50	25	38
	420	16:00	29	35	31	60	36	44
17/05/2016	420	09:00	29	38	31	67	38	56
	480	10:00	36	58	43	50	17	42
	540	11:00	38	58	42	47	16	37
	600	12:00	39	60	44	43	14	33
	660	13:00	36	58	46	44	15	30
	720	14:00	36	53	43	44	19	32
	780	15:00	33	45	37	50	23	36
	840	16:00	28	34	31	56	33	42
18/05/2016	840	09:00	33	43	35	53	31	47
	900	10:00	38	58	46	49	15	33
	960	11:00	38	62	45	46	15	31
	1020	12:00	34	58	45	45	14	31
	1080	13:00	38	60	44	46	15	32
	1140	14:00	35	53	43	46	20	32
	1200	15:00	32	45	38	56	28	38
	1260	16:00	28	37	32	61	35	43

Fonte: Próprio autor.

Tabela A3 - Distribuição de temperatura e umidade relativa do ar no secador solar durante o E3

Data	Tempo de Experimento (min)	Hora	Temperatura			Umidade Relativa		
			$T_e(^{\circ}C)$	$T_j(^{\circ}C)$	$T_s(^{\circ}C)$	$UR_e(\%)$	$UR_j(\%)$	$UR_s(\%)$
08/06/2016	0	09:00	35	47	35	52	26	54
	60	10:00	37	58	44	45	14	40
	120	11:00	35	61	47	45	14	34
	180	12:00	41	62	47	43	14	32
	240	13:00	39	62	47	40	14	31
	300	14:00	35	51	43	44	19	33
	360	15:00	33	44	38	45	22	36
	420	16:00	30	37	33	51	30	43
09/06/2016	420	09:00	33	45	36	55	26	47
	480	10:00	35	53	38	50	20	47
	540	11:00	38	56	40	47	17	44
	600	12:00	39	62	48	43	14	31
	660	13:00	38	60	46	42	15	31
	720	14:00	36	58	47	44	14	29
	780	15:00	34	45	38	46	21	36
	840	16:00	30	37	33	52	28	40

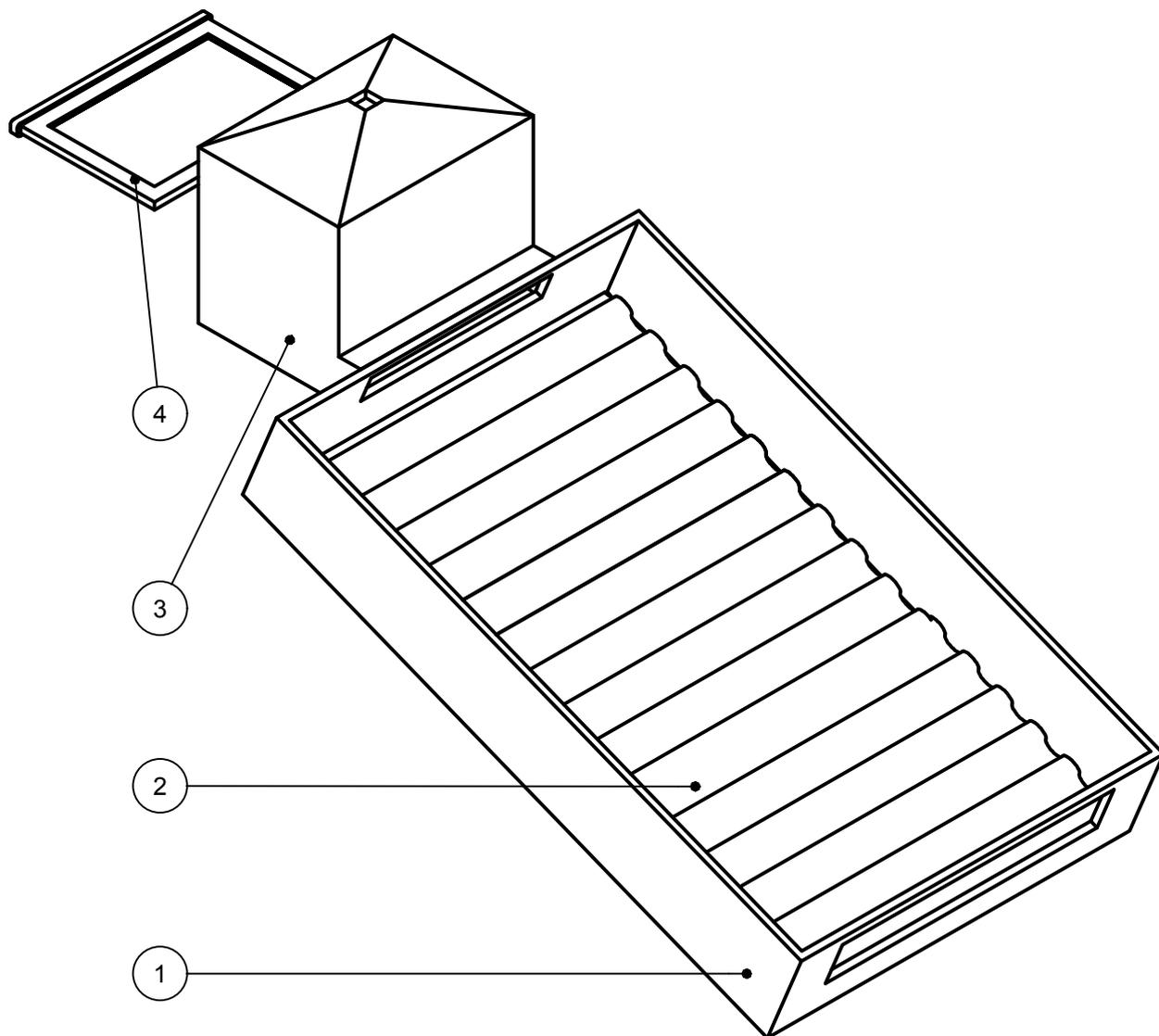
Fonte: Próprio autor.

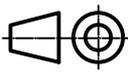
Tabela A4 - Distribuição de temperatura e umidade relativa do ar no secador solar durante o E4

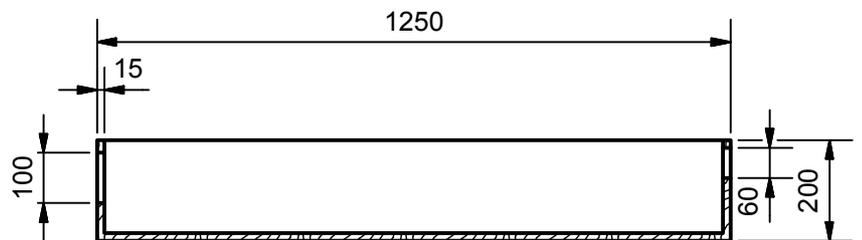
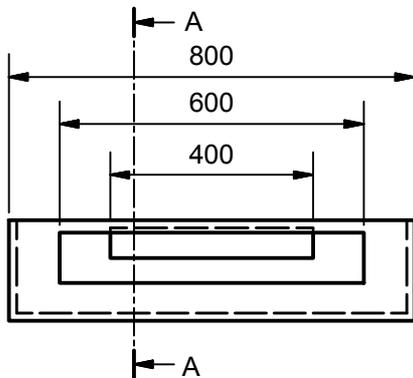
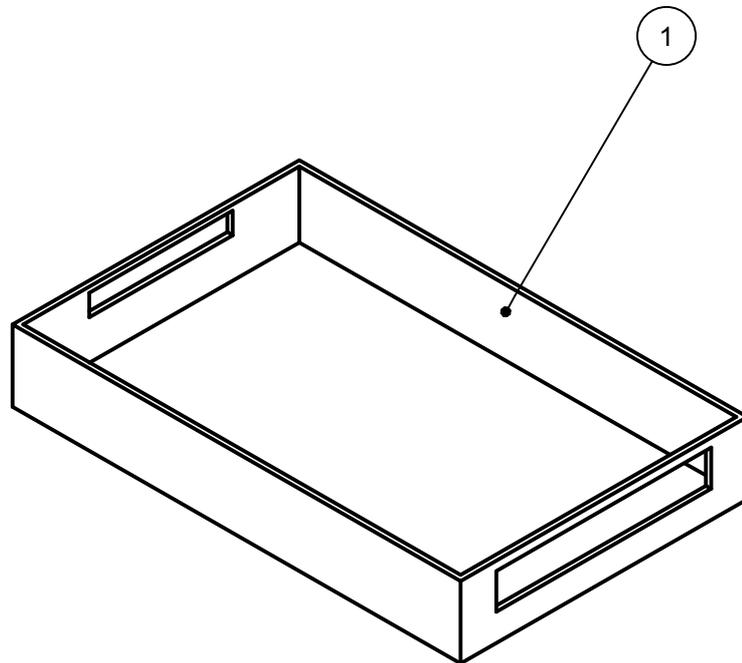
Data	Tempo de Experimento (min)	Hora	Temperatura			Umidade Relativa		
			$T_e(^{\circ}C)$	$T_j(^{\circ}C)$	$T_s(^{\circ}C)$	$UR_e(\%)$	$UR_j(\%)$	$UR_s(\%)$
21/07/2016	0	09:00	35	51	36	54	20	41
	60	10:00	30	45	35	51	21	42
	120	11:00	32	53	41	48	15	34
	180	12:00	42	62	45	45	13	30
	240	13:00	40	58	44	41	15	30
	300	14:00	39	58	42	37	17	30
	360	15:00	35	45	34	43	25	37
	420	16:00	31	38	31	44	27	40
22/07/2016	420	09:00	36	53	41	57	17	34
	480	10:00	38	61	49	47	13	28
	540	11:00	38	62	53	37	13	24
	600	12:00	41	62	55	37	13	24
	660	13:00	38	60	52	37	13	24
	720	14:00	35	58	47	39	14	27
	780	15:00	31	45	39	39	20	31
	840	16:00	31	40	34	40	25	34

Fonte: Próprio autor.

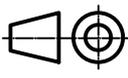
Apêndice B
PROJETO DO SECADOR SOLAR

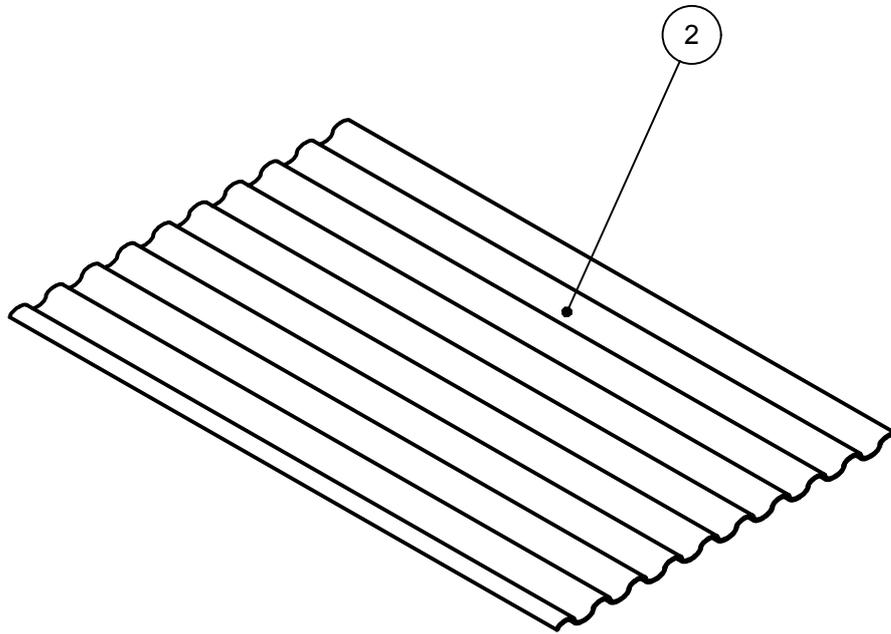


4	MDF Ultra	Colado/Parafusado	1	1,431 kg
3	MDF Ultra	Colado/Parafusado	1	8,548 kg
2	Fibrocimento	Encaixado	1	6,525 kg
1	MDF Ultra	Colado/Parafusado	1	19,961 kg
ITEM	MATERIAL	FABRICAÇÃO	QUANT.	MASSA
Projeção	Peça: Secador Solar		Prancha: 1	UFCG CCT / PPGEM
	Mestrando: Caio Tácito Miranda Castro Bezerra de Melo		Matrícula: 01140325147	 PPGEM <small>Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos</small>
Escala: 1:11	Orientador: Marcelo Bezerra Grilo		Unidade: mm	

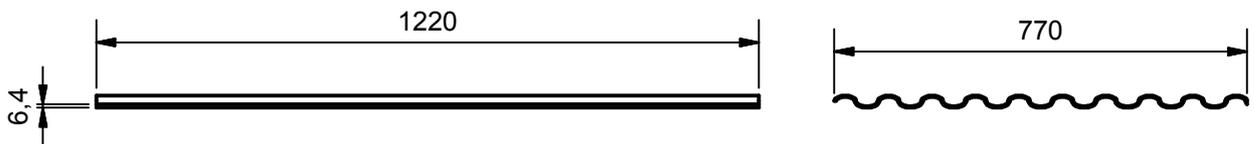


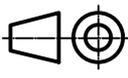
Corte A-A

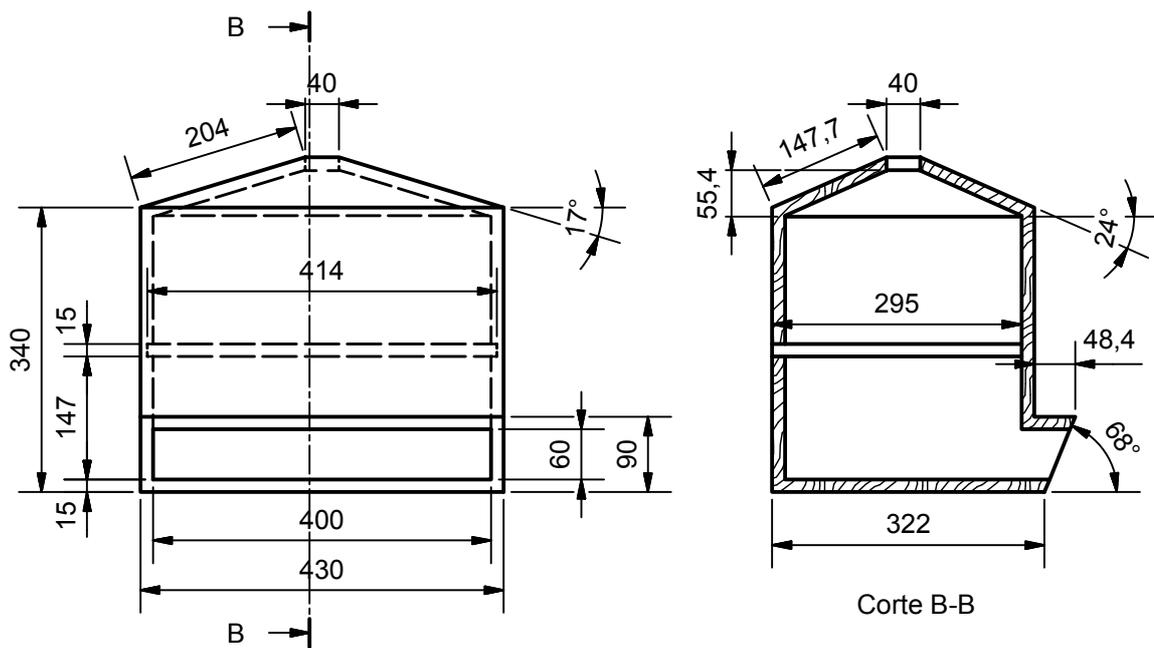
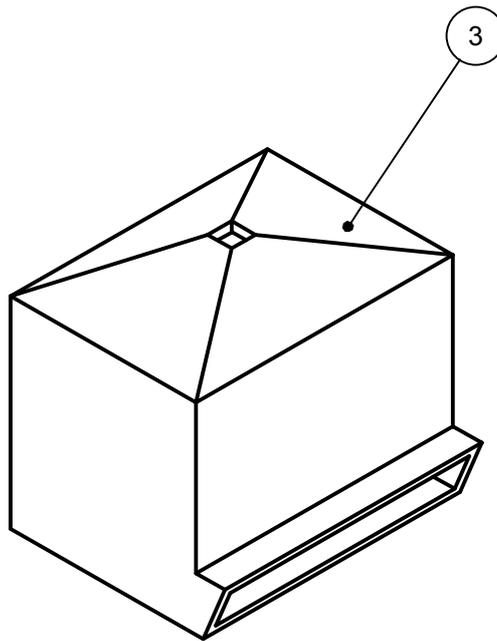
1	MDF Ultra	Colado/Parafusado	1	19,961 kg
ITEM	MATERIAL	FABRICAÇÃO	QUANT.	MASSA
Projeção	Peça: Coletor Solar		Prancha: 2	UFCC CCT / PPGEM
	Mestrando: Caio Tácito Miranda Castro Bezerra de Melo		Matrícula: 01140325147	
Escala: 1:15	Orientador: Marcelo Bezerra Grilo		Unidade: mm	



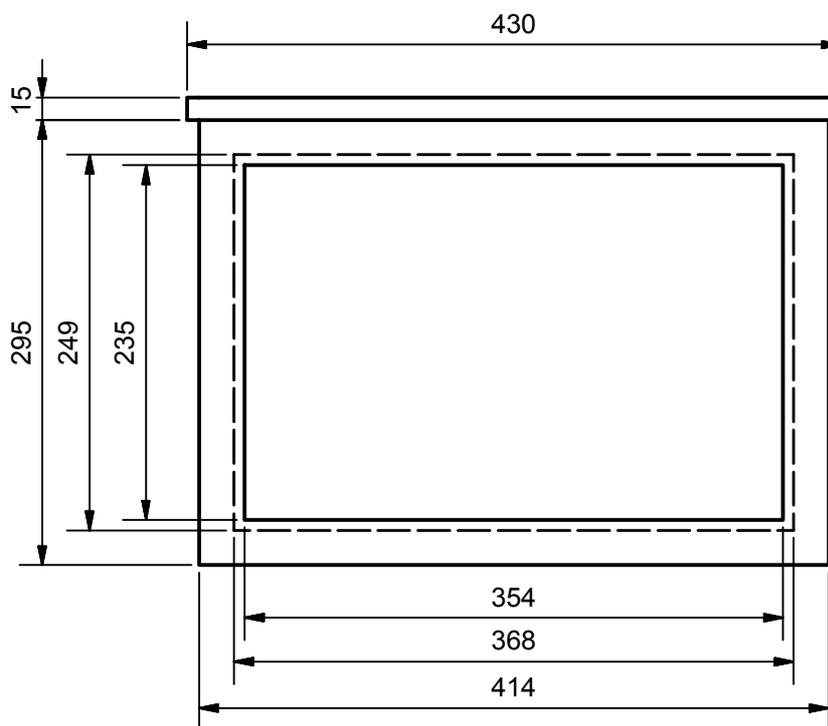
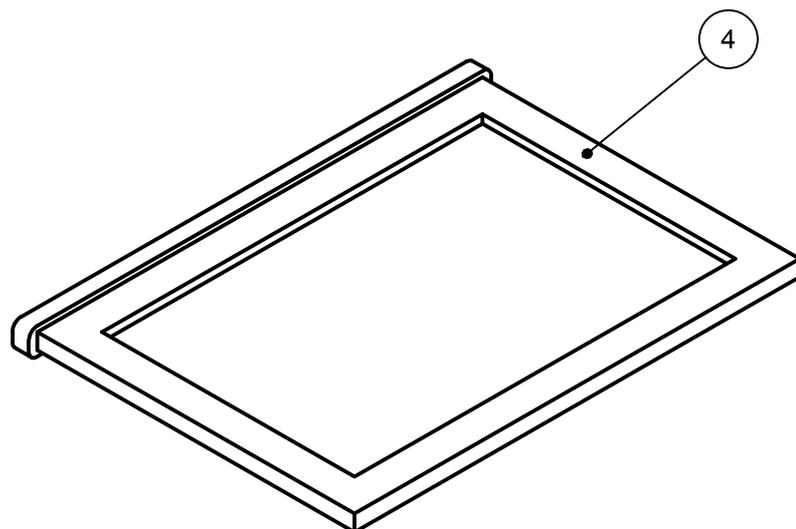
Escala 1:12

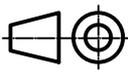


2	Fibrocimento	Encaixe	1	6,525 kg
ITEM	MATERIAL	FABRICAÇÃO	QUANT.	MASSA
Projeção	Peça: Capacitor Térmico		Prancha: 3	UFCC CCT / PPGEM
	Mestrando: Caio Tácito Miranda Castro Bezerra de Melo		Matrícula: 01140325147	
Escala: 1:14	Orientador: Marcelo Bezerra Grilo		Unidade: mm	



3	MDF Ultra	Colado/Parafusado	1	8,548 kg
ITEM	MATERIAL	FABRICAÇÃO	QUANT.	MASSA
Projeção	Peça: Câmara de Secagem		Prancha: 4	UFCC CCT / PPGEM
	Mestrando: Caio Tácito Miranda Castro Bezerra de Melo		Matrícula: 01140325147	
Escala: 1:9	Orientador: Marcelo Bezerra Grilo		Unidade: mm	



4	MDF Ultra / Nilon	Colado/Parafusado	1	1,431 kg
ITEM	MATERIAL	FABRICAÇÃO	QUANT.	MASSA
Projeção	Peça: Bandeja		Prancha: 5	UFCG CCT / PPGEM
	Mestrando: Caio Tácito Miranda Castro Bezerra de Melo		Matrícula: 01140325147	
Escala: 1:5	Orientador: Marcelo Bezerra Grilo		Unidade: mm	