



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

DISSERTAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA
MEDIR A VARIAÇÃO DE MASSA NA CÂMARA DE SECAGEM DE
UM SECADOR SOLAR DE FRUTAS**

TARCISIO OLIVEIRA TRAJANO

Campina Grande – PB, setembro de 2017

TARCISIO OLIVEIRA TRAJANO

DISSERTAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA
MEDIR A VARIAÇÃO DE MASSA NA CÂMARA DE SECAGEM DE
UM SECADOR SOLAR DE FRUTAS**

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

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

Campina Grande – PB, setembro de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

T766d Trajano, Tarcisio Oliveira.
Desenvolvimento de um sistema automatizado para medir a variação de massa na câmara de secagem de um secador solar de frutas / Tarcisio Oliveira Trajano. – Campina Grande, 2017.
67 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.
"Orientação: Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo".

Referências.

1. Sistema de Medição. 2. Câmara de Secagem Solar. 3. Célula de Carga. 4. Secagem de Frutas. I. Grilo, Marcelo Bezerra. II. Título.

CDU 66.047(043)

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA
MEDIR A VARIAÇÃO DE MASSA NA CÂMARA DE SECAGEM DE
UM SECADOR SOLAR DE FRUTAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade
Federal de Campina Grande, em 01 de setembro de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo - UAEM/PPGEM/CCT/UFCG

Orientador

Prof. Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa - UAEM/CCT/UFCG

Examinador Externo

Dr. Wellington Sousa Lima - DEE/CEEI/UFCG

Examinador Externo

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 JENNEFER PEQUENO, que sempre foi minha companhia, me apoiando tanto pessoalmente como profissionalmente.

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, Marcelo Trajano e Maria de Lourdes, por tudo o que fizeram para 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.

À minha futura esposa, Jennefer Pequeno, por todo companheirismo, carinho, confiança e amor em mim depositados. Sua parceria e cumplicidade no dia a dia me ajudaram a chegar onde estou.

Ao meu orientador, professor Dr. Marcelo Grilo, por ter me aceitado como orientando neste projeto. Suas experiências e conhecimentos repassados, com certeza, contribuíram 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, Professor Yoge Jerônimo Ramos da Costa, e Wellington Sousa Lima.

Aos meus colegas da Pós-Graduação, em especial aos amigos Francisco Brasileiro, Paulo Germano, Wellington, Thiago Lira e Tony Carlos os quais me ajudaram muito e tenho certeza que a parceria será duradoura.

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

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

John Kennedy

RESUMO

TRAJANO, Tarcisio Oliveira. Desenvolvimento de um Sistema Automatizado para Medir a Variação de Massa na Câmara de Secagem de um Secador Solar de Frutas. 2017. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2017.

Automatizar o processo de medição da variação de massa do produto em um secador solar é um avanço em relação ao procedimento atualmente utilizado que é manual. O objetivo deste trabalho é desenvolver essa automatização utilizando tecnologia apropriada para ser incorporada ao secador solar em desenvolvimento na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Esses secadores precisam ser simples e de baixo custo para serem utilizados pelo ambiente da agricultura familiar. O processo utilizado consistiu na construção e teste de um protótipo de uma câmara de secagem com forma retangular, de dimensões 32,2 x 43,0 x 34,0 cm, acoplado ao coletor solar. No sistema de medição automatizado foi utilizado uma balança com bandeja em tela de alumínio, de dimensões 37,0 x 21,0 x 6,0 cm, fixada por uma haste de madeira a uma célula de carga, tipo extensômetro de folha, que envia sinais de tensão, proporcionais à variação de massa do produto que está sendo seco, a uma plataforma de aquisição de dados com Arduino UNO integrada ao equipamento. A célula de carga fixada a bandeja foi instalada dentro e, num experimento seguinte, fora da câmara de secagem. O sistema de aquisição e tratamento de dados também foi instalado na parte externa da câmara de secagem. Foram realizados testes preliminares de medição com a utilização de lâmpadas halógenas, e os resultados obtidos mostraram temperaturas, no interior da câmara, de aproximadamente $45^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, utilizando um peso padrão de 100g. Os resultados obtidos durante a secagem da banana prata (*Musa spp*), permitiram a construção das curvas de variação de massa de banana e a curva de cinética de secagem. Também foram obtidas as curvas que mostram a variação da temperatura do ar de secagem no interior da câmara. Essa temperatura ficou na faixa de 30°C a 40°C , abaixo do esperado que era de $50^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. Por isso a banana atingiu apenas o valor de 44% de teor de umidade em base úmida, acima dos 25% que no Brasil é o máximo para que a banana seca seja considerada banana passa. Foram observadas interferências indesejáveis durante o processo de medição automatizada, as estratégias utilizadas (filtros) para reduzir as interferências não foram suficientes para reduzi-las totalmente e seguirão sendo estudadas em trabalhos futuros.

PALAVRAS CHAVE: Sistema de Medição, Câmara de Secagem Solar, Célula de Carga, Secagem de Frutas.

ABSTRACT

TRAJANO, Tarcisio Oliveira. Development of an Automated System to Measure the Mass Variation in the Drying Chamber of a Solar Fruit Dryer. 2017. 83 p. Dissertation (Master in Mechanical Engineering). Graduate Program in Mechanical Engineering, Federal University of Campina Grande, Campina Grande. 2017.

Automating the process of measuring the mass variation of the product in a solar dryer is an advance over the currently used procedure which is manual. The objective of this work is to develop this automation using appropriate technology to be incorporated into the developing solar dryer at the Federal University of Campina Grande (UFCG). These dryers need to be simple and inexpensive to be used by the family farming environment. The process used consisted in the construction and testing of a prototype of a drying chamber with rectangular shape, dimensions 32.2 x 43.0 x 34.0 cm, coupled to the solar collector. In the automated measurement system, a scale was used with aluminum tray, measuring 37.0 x 21.0 x 6.0 cm, fixed by a wooden rod to a load cell, type extensometer of sheet, which sends voltage signals, proportional to the mass variation of the product being dried, to a data acquisition platform with Arduino UNO integrated to the equipment. The loading cell attached to the tray was installed inside and, in a subsequent experiment, outside the drying chamber. The data acquisition and processing system was also installed on the outside of the drying chamber. Preliminary measurement tests were carried out with the use of halogen lamps, and the results obtained showed temperatures within the chamber of approximately $45^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, using a standard weight of 100 g. The results obtained during the drying of the silver banana (*Musa spp*) allowed the construction of the banana mass variation curves and the drying kinetic curve. Curves showing the temperature of the drying air inside the chamber were also obtained. This temperature was in the range of 30°C to 40°C , below that expected to be $50^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ as a consequence of the low intensity of solar radiation on the days of experiment. Therefore the banana reached only the value of 44% moisture content on wet basis, above the desirable 25%. Undesirable interferences were observed during the automated measurement process, the strategies used (filters) to reduce interferences were not enough to reduce them completely and will continue to be studied in future works.

KEY WORDS: Measuring System, Solar Drying Chamber, Load Cell, Fruit Drying.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Curva de secagem.	10
Figura 2.2	Esquema da composição da massa de produtos biológicos.	13
Figura 2.3	Banana prata.....	16
Figura 2.4	Secador construído na Universidade Federal de Sergipe, UFS.	21
Figura 2.5	Secador construído na UFCG.	22
Figura 2.6	Secadores em telas suspensas, para secagem solar construído na UFV.	22
Figura 2.7	Secador Solar construído na UFPR.....	23
Figura 2.8	Sistema projetado para secagem utilizando energia solar e eólica.	23
Figura 2.9	Secador solar exagonal.	24
Figura 2.10	Representação esquemática de uma célula fotovoltaica	25
Figura 2.11	Representação do movimento de rotação da Terra.	27
Figura 2.12	Representação do movimento da Terra em torno do sol.....	27
Figura 2.13	Representação da Ponte de Wheatstone.....	31
Figura 2.14	Modelos comerciais de célula de carga.....	33
Figura 3.1	Fotos do LEMT, UFCG.	35
Figura 3.2	Fotos do <i>Solarium</i> do LEMT, UFCG.	36
Figura 3.3	Arquitetura de hardware da placa do Arduino.	38
Figura 3.4	Distribuição dos blocos na placa do Arduino	38
Figura 3.5	Sistema de aquisição de dados.....	40
Figura 3.6	Câmara de secagem com célula de carga na parte interna.....	41
Figura 3.7	Câmara de secagem com célula de carga na parte externa.	41
Figura 3.8	Caixa com pesos padrão.....	42
Figura 3.9	Lâmpada incandescente halógena.....	42
Figura 3.10	Dimmer.	42
Figura 4.1	Primeiro protótipo de balança.	46
Figura 4.2	Segundo protótipo de balança.	46
Figura 4.3	Segundo protótipo de balança sob variação de temperatura.	48
Figura 4.4	Terceiro protótipo de balança.	49
Figura 4.5	Secagem com processo de medição automatizado.....	52
Figura 4.6	Medição da massa de banana antes da secagem.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01	Medição de massa no protótipo 2	47
Gráfico 02	Relação de massa x temperatura	48
Gráfico 03	Medição de massa no protótipo 3 sob temperatura ambiente	49
Gráfico 04	Medição de massa no protótipo 3 (tempo: 10 horas).....	50
Gráfico 05	Medição de massa no protótipo 3 (tempo: 10 horas, intervalo: 30 minutos)....	51
Gráfico 06	Medição no protótipo 3 (tempo: 22 horas, intervalo: 1 minuto).....	52
Gráfico 07	Secagem.....	53
Gráfico 08	Curva de Secagem.....	54
Gráfico 09	Temperatura dentro da câmara de secagem (22 de Novembro).....	54
Gráfico 10	Temperatura dentro da câmara de secagem (23 de Novembro).....	55

NOMENCLATURA

\bar{G}	Irradiação solar média incidente	[W/m ²]
L	Comprimento da placa	[m]
$m_{H_2O_i}$	Massa de água contida no produto antes do processo de secagem	[kg]
$m_{H_2O_f}$	Massa de água contida no produto depois do processo de secagem	[kg]
m_{H_2O}	Massa de água contida no produto	[kg]
m_{ms}	Massa de matéria seca	[kg]
m_{msi}	Massa inicial de matéria seca	[kg]
m_{msf}	Massa final de matéria seca	[kg]
m_{ti}	Massa inicial total do produto	[kg]
m_t	Massa total do produto	[kg]
$m_{inicial}$	Massa inicial do produto	[kg]
m_{final}	Massa final do produto	[kg]
$m_{total\ água}$	Massa total de água presente no produto a ser secado	[kg]
\dot{m}	Vazão mássica do fluido de trabalho	[kg/s]

Símbolos Gregos

ρ Resistividade [Ωm]

Siglas

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

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	2
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo Geral	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
CAPÍTULO 2	6
2. REFERENCIAIS TEÓRICOS	6
2.1 Secagem	6
2.1.1 Determinação do teor de umidade.....	10
2.1.1.1 Métodos Diretos.....	11
2.1.1.2 Métodos Indiretos	12
2.2 Banana.....	15
2.3 Utilização da energia solar	17
2.4 Os secadores solares.....	19
2.4.1 Exemplos de alguns secadores solares.	21
2.5 Utilização da energia solar fotovoltaica	24
2.6 Posicionamento dos secadores e o movimento aparente do sol.....	26
2.7 Extensômetro.....	28
2.7.1 Ponte de Wheatstone	31
2.8 Célula de Carga	33
CAPÍTULO 3	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Informações Gerais	35
3.2. Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados.....	36
3.2.1. O Arduino e suas características	36
3.3 Desenvolvimento da câmara de secagem com sistema de medição de massa.....	40
3.3.1 Análise do sistema de medição de massa.....	41
CAPÍTULO 4	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 Experimental	45

4.1.1 Experimento 1	45
4.1.2 Experimento 2	46
4.1.3 Experimento 3	47
4.1.4 Experimento 4	49
4.1.5 Experimento 5	50
4.1.6 Experimento 6	51
4.1.7 Experimento 7	51
4.1.7 Experimento 8	52
CAPÍTULO 5	59
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	59
5.1 Conclusões	59
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	60
REFERÊNCIAS	60

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Colocar o conhecimento científico a serviço do desenvolvimento sustentável da humanidade, utilizando os recursos naturais com cuidados especiais e privilegiando a eficiência energética deve ser o trabalho do engenheiro no século XXI, principalmente em países como o Brasil, que precisa crescer para promover a mobilidade socioeconômica de sua população.

Tendo como foco a promoção do desenvolvimento regional no setor da fruticultura, principalmente no setor da agricultura familiar, este trabalho pretende disseminar a utilização de novas tecnologias nos processos de secagem de alimentos que viabilize a comercialização de um produto final de boa qualidade.

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

A secagem é um dos mais antigos métodos de conservação de alimentos. Com o passar dos anos, as técnicas dos processos de secagem 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.

Neste contexto, sabendo-se do elevado grau de perecimento das frutas, busca-se desenvolver um secador solar que tenha características inovadoras com elevada eficiência energética, mas que tenha baixo custo de fabricação e operação.

A escolha do setor frutífero decorre da sua importância no cenário econômico do Nordeste brasileiro. A utilização do secador solar terá como finalidade uma melhor conservação dos produtos para que ocorra uma comercialização mais lucrativa. O equipamento em aprimoramento será testado na secagem da banana, que tem o estado da Paraíba como um grande produtor nacional e cujo cultivo permite ampla geração de emprego no ambiente da agricultura familiar, que precisa de tecnologias simples e de baixo custo para participar no competitivo mercado de produtos agrícolas.

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 terceiro maior produtor mundial, com uma produção que ultrapassa 44 milhões de toneladas e gera mais de 5 milhões de empregos diretos (CNA BRASIL, 2017). 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 sistema que possibilite a medição automatizada da variação de massa, em tempo real, do produto que encontra-se em processo de secagem no interior de uma câmara de secagem de um secador solar de frutas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver para um secador solar, um sistema de medição automatizado da variação de massa do produto a ser seco;
- Testar experimentalmente o sistema de medição desenvolvido, buscando diminuir as interferências externas no momento da medição de variação de massa;
- Testar experimentalmente o sistema de medição desenvolvido, para medir a temperatura do ar de secagem no interior da câmara;
- A partir dos testes com o sistema de medição desenvolvido, na secagem de banana, obter a curva de variação de massa de banana e a curva de cinética de secagem.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAIS TEÓRICOS

CAPÍTULO 2

REFERENCIAIS TEÓRICOS

Atualmente, a busca pelo desenvolvimento sustentável tem ascendido tanto nas indústrias, quanto no comércio e nos serviços, com o objetivo de modificar seus processos e mecanismos para que preservem as condições ambientais sem que haja redução na rentabilidade e produtividade.

Para o cálculo da rentabilidade do processo de secagem de um produto, seja ele agrícola ou não, alguns parâmetros devem ser levados em consideração, dentre eles, a qualidade final do produto seco, a quantidade de energia gasta e o tempo utilizado neste processo.

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

2.1 Secagem

A secagem é o processo pelo qual parte da água contida em um produto é removida. Em produtos agrícolas, como grãos, sementes e frutos, esse processo ocorre com a transferência de calor e massa de forma simultânea, e é utilizado para evitar o desenvolvimento de fungos, micro-organismos e insetos, que normalmente são as causas da deteriorização desses produtos (FIOREZE, 2004; CAVALCANTI-MATA et al., 2006; SILVA, 2008).

A secagem de produtos agrícolas é um processo importante pelos seus vários benefícios na produção e comercialização, como antecipação da colheita, redução da perda dos grãos ainda na lavoura pelos ataques das pragas, armazenamento por um período de tempo maior, mantendo excelência na qualidade do produto, além de impedir o desenvolvimento de micro-organismos e insetos, permitindo a formação de estoques e propiciando ao produto melhores preços no período de entressafra (LIMA, 1999).

Como o fluido de trabalho utilizado neste processo de secagem solar é o ar aquecido, a avaliação das suas propriedades termodinâmicas (temperatura, umidade relativa, velocidade,

dentre outras) é de extrema importância, de tal modo que, sob determinadas condições operacionais, seja possível proporcionar uma secagem uniforme do produto e reduzir o tempo de secagem do mesmo (GRILO, 2007).

A secagem natural é aquela em que o ar que propicia a secagem do produto ocorre como consequência dos ventos e a fonte energética utilizada nesta secagem provém da incidência direta da energia solar.

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

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

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

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

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

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

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

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

Os modelos empíricos e semi-empíricos são usados para descrever a secagem de uma partícula ou de uma camada fina de partículas. Os modelos empíricos consistem numa

correlação direta entre o teor de água e o tempo de secagem, enquanto os semi-empíricos baseiam-se na hipótese da validade da Lei do resfriamento de Newton, assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de água do produto e seu respectivo teor de água de equilíbrio, para as condições de secagem especificada (BROOKER et al.,1992).

Para verificação da cinética de secagem, muitos autores observaram que a equação de Fick apresenta grandes limitações, quer seja pela necessidade de um grande número de termos, quer seja por não representar os dados experimentais em trechos das curvas. Dessa forma, para representar os processos de secagem de frutas, foi utilizado o modelo semi-teórico simplificado do modelo de Fick, o modelo de Page dado, pela equação (2.1), (FARIAS, 2011).

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = Exp(-kt^n) \quad (2.1)$$

onde,

RU = razão de umidade, [adimensional]

X= teor de água, [base seca]

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

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

K = constante do modelo, [min⁻¹]

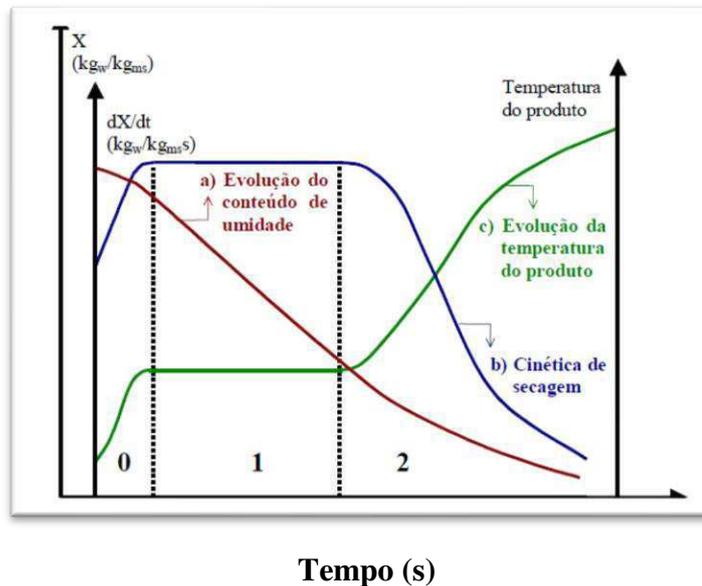
n = constantes do modelo

t = tempo, [minuto].

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

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

Figura 2.1. Curva de secagem.



Fonte: Alonso (2001).

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

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

2.1.1 Determinação do teor de umidade

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

A água pode estar presente na amostra sob duas formas:

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

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

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

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

2.1.1.1 Métodos Diretos

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

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

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

2.1.1.2 Métodos Indiretos

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

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

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

A quantidade de água removida durante o processo de secagem é calculada em função dos teores de umidade inicial e final do produto a ser desidratado e da massa total do produto antes de iniciar o processo. Teores esses, que podem ser expressos como a relação entre a massa de água contida no produto e a massa de matéria seca, como determina a Equação 2.2.

$$X_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \quad (2.2)$$

onde,

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

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

m_{ms} = massa de matéria seca, [kg].

Outra forma de se expressar esses teores é através da relação entre a massa de água contida no produto e a massa total do mesmo, como mostrado na Equação 2.3.

$$X_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_t} \quad (2.3)$$

onde,

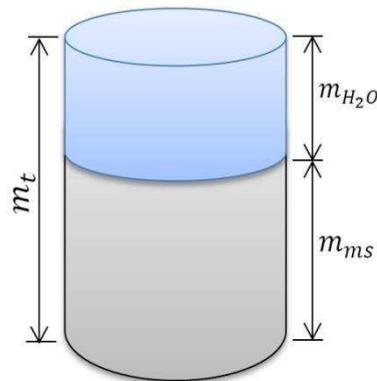
X_{bu} = teor de umidade, em base úmida, [%];

m_t = massa total do produto, [kg].

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

$$m_t = m_{ms} + m_{H_2O} \quad (2.4)$$

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



Assim, é possível obter a determinação de teor de umidade em base seca ou em base úmida correlacionando as equações já citadas, obtendo-se as Equações 2.5 e 2.6.

$$X_{bu} = \frac{100X_{bs}}{1 + X_{bs}} \quad (2.5)$$

e,

$$X_{bs} = \frac{X_{bu}}{100 - X_{bu}} \quad (2.6)$$

Assumindo que apenas água seja removida durante o processo de secagem, tem-se que a quantidade de matéria seca se mantém constante e, relacionando a equação 2.4 com as Equações 2.5 e 2.6 obtém-se:

$$m_{msi} = m_{msf} = \frac{m_{ti}}{1 + X_{bsi}} \quad (2.7)$$

onde,

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

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

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

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

Logo, a quantidade de água removida é expressa por:

$$m_{H_2O_i} - m_{H_2O_f} = m_{ti} \frac{X_{bsi} - X_{bsf}}{1 + X_{bsi}} \quad (2.8)$$

onde,

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

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

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

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

Pela Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) n° 272, de 22 de setembro de 2005, que aprova o regulamento técnico para produtos vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis, são estabelecidos os requisitos específicos para determinação de frutas secas ou desidratadas (exceto frutas secas tenras), essas devem possuir umidade máxima de 25% (BRASIL, 2005).

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

Smitabhindu et al. (2008), desenvolveram um sistema otimizado que melhora a secagem de banana assistido por energia solar. A literatura apresenta poucos resultados a respeito da utilização de convecção forçada nos sistemas de secagem solar. Poucos trabalhos

neste sentido têm sido usados para conduzir os pesquisadores, a simulação matemática e otimização dos sistemas de secagem alimentados por energia solar para frutas tropicais.

2.2 Banana

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

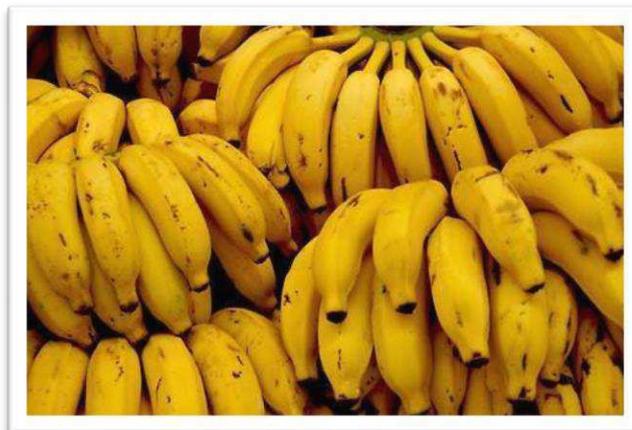
A banana é fruta de consumo universal, comercializada por dúzia, por quilo e até mesmo por unidade. É rica em carboidratos e potássio, médio teor em açúcares e vitamina A, e baixo em proteínas e vitaminas B e C. É apreciada por pessoas de todas as classes e de qualquer idade, que a consomem *in natura*,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

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

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

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

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



Fonte: (<http://www.comidascaseiras.com.br/curiosidades-sobre-a-banana>)

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

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

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

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

A técnica de processamento mais simples para banana é a obtenção da banana-passa, a típica banana seca brasileira. Assim é importante saber a influência dos parâmetros de secagem da banana para as condições ótimas do processo. Trata-se da banana que sofre um

processo de secagem, até atingir um teor de umidade adequado, que, segundo Lima et al. (2000), deve ser em torno de 15 a 20%, em base úmida.

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

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

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

2.3 Utilização da energia solar

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

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

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

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

Neste século XXI, a utilização combinada dos vários tipos e fontes de energia, com ênfases em 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).

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.

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

A energia solar em si não custa nada e é imune as flutuações nos preços das outras formas de energia. Com o avanço da tecnologia, ela pode ser convertida e usada de várias formas diferentes: fornecimento de eletricidade, calefação, resfriamento, transporte, iluminação e potência mecânica; sem contar que a maioria dos métodos usados gera poucos problemas ambientais. A desvantagem da energia solar está no fato de não ser de fluxo contínuo, embora seja possível coletar e armazenar. Trata-se de uma energia intermitente, com fluxo interrompido pelas noites e pelos dias nevoentos (PENEIRO et al., 2010).

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

2.4 Os secadores solares

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

Devido ao grande desperdício de alimentos, principalmente no setor da fruticultura, um número cada vez maior de pesquisadores vem direcionando sua atenção na busca de alternativas para favorecer os pequenos agricultores, os seja, a agricultura familiar. O foco principal é a construção de secadores solares com materiais de baixo custo, com boa eficiência e que tenham algum tipo de controle das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, principalmente temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem (GRILO et al., 2009; SOUZA et al., 2012; PRAKASH e ANILKUMAR, 2013; TUNDE-AKINTUNDE, 2011).

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

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

Com o trabalho multidisciplinar que é desenvolvido, as perspectivas são cada vez mais animadoras, pois já se encontra em execução estudos com alunos da graduação, pós-graduação (mestrado e doutorado) nas áreas de Engenharia, Matemática e Desenho Industrial

que viabilize o desenvolvimento de um sistema que tenha, além de elevada eficiência energética, um design moderno e compatível com suas funções.

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

O secador solar de exposição direta (Figura 2.5), é um equipamento muito simples, de fácil construção, operação e manutenção, sendo composto basicamente de três elementos: o corpo, que é uma caixa retangular construída de madeira; duas bandejas, onde o produto, é colocado para ser desidratado; e a cobertura do secador, que lhe dá a característica de estufa. Neste secador a irradiação solar é diretamente incidente sobre o produto a ser seco. No secador existem duas aberturas que realizam um papel muito importante para o sucesso do processo de secagem. Estas duas aberturas são posicionadas com níveis diferentes: uma mais baixa, para entrada do ar frio e outra mais elevada, para saída do ar aquecido. Já no secador de exposição indireta (neste trabalho) o produto a ser desidratado não está diretamente exposto à irradiação solar, para minimizar a descoloração e rachaduras na sua superfície. A câmara de secagem é utilizada para manter o produto na bandeja, neste secador a irradiação solar não é diretamente incidente sobre o produto a ser seco. O ar é aquecido em um coletor solar e, em seguida, conduzido para uma câmara de secagem onde se encontra o produto a ser seco.

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

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

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

1.4.1 Exemplos de alguns secadores solares.

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

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

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



Fonte: Nunes (2016)

Na Figura 2.5 são mostrados dois protótipos de secador solar de exposição direta desenvolvidos na UFCG, em Campina Grande, por Grilo e Lacerda (2013) e que atualmente são largamente utilizados na secagem de frutas, mas que não permite o controle do ar de

secagem. O fluxo do ar de secagem do equipamento ocorre através de convecção natural e sua movimentação depende do efeito termossifão.

Figura 2.5. Secador solar construído na UFCG.



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

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

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



Fonte: Silva et al. (2006).

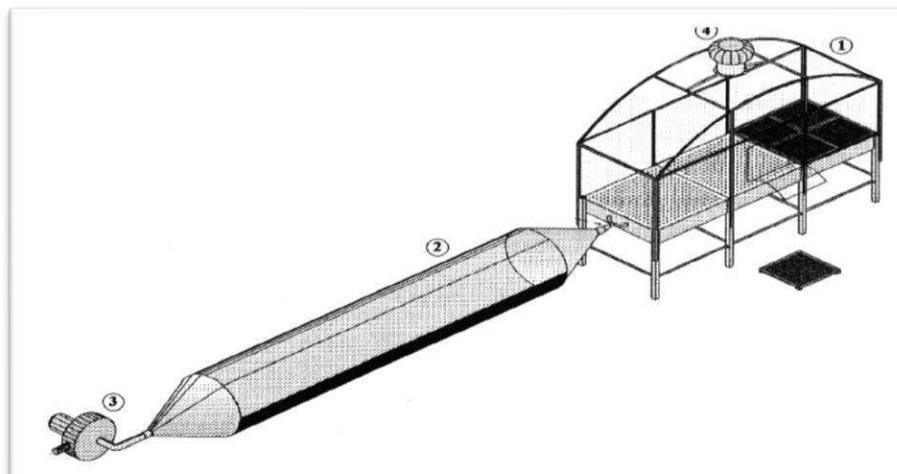
A Figura 2.7 mostra um secador solar com base de madeira construído na Universidade Federal do Paraná, é um secador rústico com bandejas de alumínio que não é recomendado, devido a sua oxidação que pode contaminar o produto a ser desidratado.

Figura 2.7. Secador Solar construído na UFPR.



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

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



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

Fonte: Costa (2008).

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

Figura 2.9. Secador solar hexagonal.



Fonte: Grilo e Lacerda (2013).

Os secadores solares de exposição indireta apresentam vantagens quando comparado com os secadores de exposição direta, porque no primeiro tipo é possível realizar o controle das principais propriedades termodinâmicas do ar de secagem, tais como, temperatura, umidade relativa e velocidade.

2.5 Utilização da energia solar fotovoltaica

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

Uma das vantagens dos sistemas fotovoltaicos é a possibilidade de aplicação em meios urbanos, onde é grande o consumo da energia gerada de forma convencional, podendo ser instalados em edifícios, condomínios residenciais, casas isoladas, indústrias e comércios.

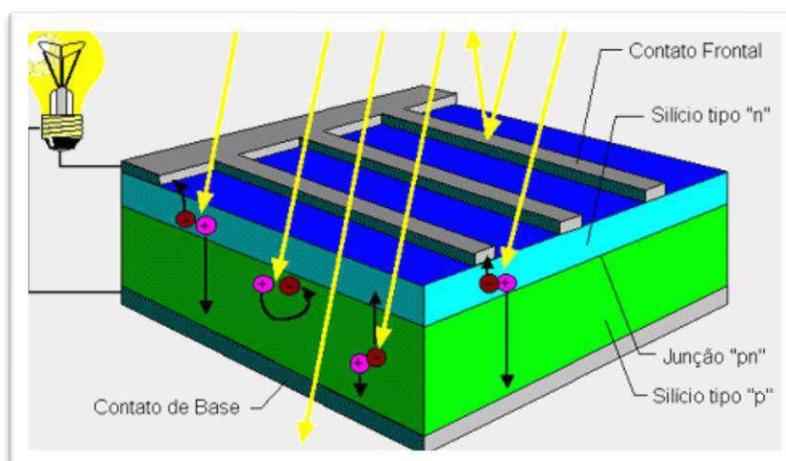
A primeira vez que foi verificada a conversão direta de luz em energia elétrica foi em 1839, pelo físico Edmond Becquerel, onde se observou que, quando exposto à luz, ocorria uma diferença de potencial nas extremidades de um material semiconductor.

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 2.10.

Figura 2.10. Representação esquemática de uma célula fotovoltaica.



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

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

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

2.6 Posicionamento dos secadores e o movimento aparente do sol

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

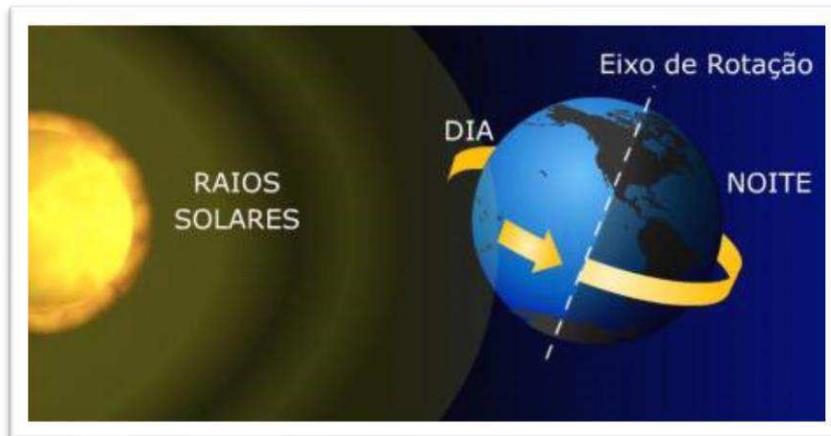
A fim de se obter um melhor aproveitamento da irradiação solar incidente, os coletores solares devem ser posicionados de forma que a incidência da irradiação ocorra o mais perpendicularmente possível ao plano da superfície coletora. Como é inviável economicamente construir equipamentos de secagem indireta que funcionem como superfície heliostática. No hemisfério sul, o secador solar deve estar voltado para o norte, privilegiando a captação de energia solar durante a estação inverno.

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

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

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

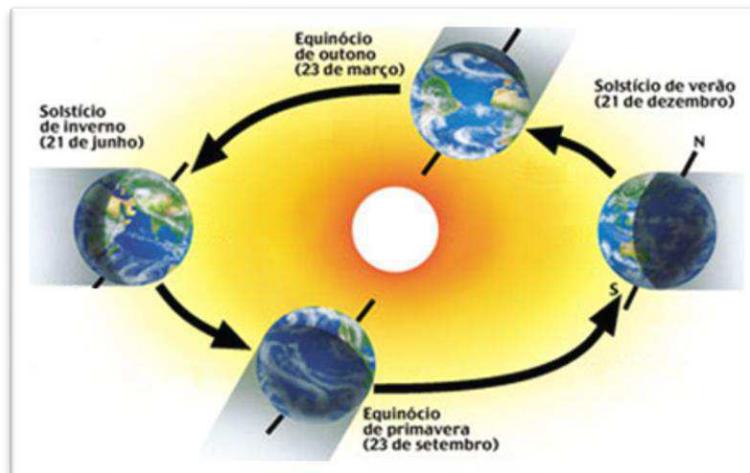
Figura 2.11. Representação do movimento de rotação da Terra.



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

Em março inicia-se a primavera no hemisfério Norte e o outono no hemisfério Sul. Em seguida, em junho, ocorre o início do verão no hemisfério Norte e do inverno no hemisfério Sul. Em setembro, têm-se o início do outono no hemisfério Norte e da primavera no hemisfério Sul. Por fim, no mês de dezembro, acontece o início do inverno no hemisfério Norte e do verão no hemisfério Sul, Figura 2.12.

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



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

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

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

Para localidades posicionadas no hemisfério sul, caso da cidade de Campina Grande-PB, uma superfície heliostática deveria se movimentar continuamente para receber a incidência da irradiação solar perpendicular à sua superfície. Isto demandaria um investimento elevado. O que geralmente se faz é posicionar a superfície coletora de energia solar voltada para o norte geográfico na posição de receber a irradiação solar com melhor ângulo de incidência no período de inverno, quando a demanda energética é maior. Por isso, os coletores de energia solar na cidade de Campina Grande, PB são voltados para o Norte com um ângulo de aproximadamente 17° a 22° que corresponde à soma da latitude do local (7° sul) mais um ângulo de 10° ou 15° (GRILO, 2007). Nesta pesquisa o secador solar ficou posicionado a uma inclinação de 22° virado para o norte, ou seja, 15° mais 7° .

2.7 Extensômetro

Para determinar as deformações sofridas por um material ao se aplicar uma determinada tensão, pode-se utilizar extensômetros elétricos. As deformações são medidas indiretamente através das variações da resistências elétrica do extensômetro colado no material.

No trabalho de Andolfato, Camacho e Brito (2004) são descritos diferentes métodos de investigação não destrutivas. A análise das tensões é feita com extensômetros elétricos, também conhecidos como *Strain Gauges*. As precisões das medidas, facilidades de manuseio e custos são algumas das vantagens de se utilizar estes dispositivos.

Os *Strain Gauges* são feitos de metais básicos que, quando colados na superfície de qualquer material, tendem a sofrer a mesma deformação, provocando uma variação na resistência elétrica. Quando isso ocorre aumenta a resistência, porém se ela diminui, a resistência também diminui, isso ocorre devido a variação dimensional do *Strain Gages* e a resistividade.

Sabe-se da segunda lei de Ohm que resistência elétrica de um fio de comprimento L , área de seção transversal A e resistividade ρ , é dado pela equação 2.9:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.9)$$

onde a resistência elétrica é uma função das variáveis L , A e ρ . Fazendo as variações em cada uma das variáveis independentes, o diferencial da resistência elétrica, dividido por ela pode ser escrito como visto na equação 2.10:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2.10)$$

Considerando a equação 2.11:

$$\varepsilon_{axial} = \frac{dL}{L} \varepsilon_{axial} = \frac{dD}{D} \varepsilon_{axial} = -\nu \varepsilon_{axial} \quad (2.11)$$

onde para um extensômetro cilíndrico considera-se a equação 2.12:

$$A = \pi \frac{D^2}{4}, \text{ ou } \frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} \quad (2.12)$$

(os resultados não mudam para o caso de um extensômetro retangular) e substituindo na equação 2.12 obtém-se a equação 2.13:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} (1 + 2\nu) \quad (2.13)$$

Segundo a Lei de Bridgmann, a mudança de resistividade ρ ocorre proporcionalmente à mudança volumétrica do material de acordo com a equação 2.14:

$$\frac{d\rho}{\rho} = m \frac{dV}{V} \quad (2.14)$$

onde m representa uma constante de proporcionalidade, determinada experimentalmente para cada material específico. Para um extensômetro o metal mais utilizado é uma liga a base de níquel-cobre chamado comercialmente de “*Constantan*”, com uma constante de proporcionalidade m igual a um.

Seguindo o mesmo raciocínio da mudança de resistividade é possível obter o valor de $\frac{dV}{V}$, pois admitindo que $A = \frac{\pi}{4}LD^2$ tem-se a equação 2.15:

$$\frac{dV}{V} = (1 - 2\nu) \frac{dL}{L} \quad (2.15)$$

Substituindo a equação 2.15 na equação 2.14 obtêm-se a equação 2.16:

$$\frac{d\rho}{\rho} = m(1 - 2\nu) \frac{dL}{L} \quad (2.16)$$

Substituindo o valor da constante de proporcionalidade m e dividindo a equação por $\frac{dL}{L}$, obtêm-se a sensibilidade da liga metálica do extensômetro, denominada por fator de Gauge K , ou seja, fator do extensômetro. Este fator é fornecido pelo fabricante.

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = (2\nu + 1) + [m(1 - 2\nu)] = 1 + m + 2\nu(1 - m) \quad (2.17)$$

Como pode ser visto na equação 2.17, a constante de proporcionalidade m é determinada experimentalmente, porém o material mais utilizado são ligas de cobre ou níquel, assim o valor de m é aproximadamente igual à unidade. Substituindo na equação 2.17 obtêm-se a sensibilidade da liga metálica aproximadamente igual a dois, como visto na equação 2.18:

$$\frac{dR/R}{dL/L} \cong 2 \quad (2.18)$$

A sensibilidade do extensômetro, denominada por fator de Gauge K , ou seja, fator do extensômetro é fornecido pelo fabricante, como visto na equação 2.19:

$$K = \frac{dR/R}{dL/L} \quad (2.19)$$

Como $\varepsilon_{axial} = \frac{dL}{L}$, chegamos a equação 2.20:

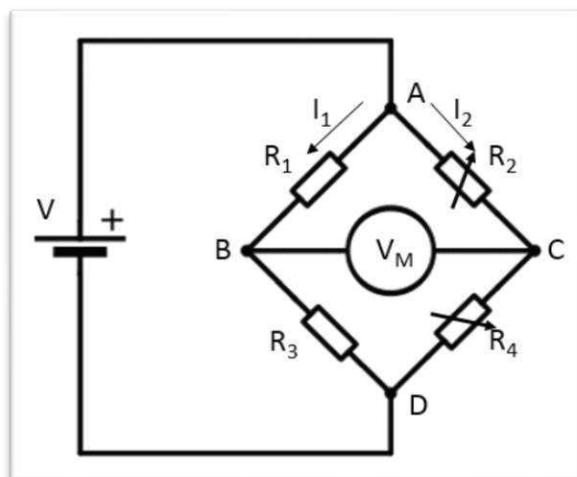
$$\varepsilon = \frac{1}{K} \cdot \frac{dR}{R} \quad (2.20)$$

Andolfato, Camacho e Brito (2004) descrevem ainda que as deformações sofridas pelo material podem ser obtidas através da equação 2.20, ou seja, ela depende da resistência elétrica, da variação da resistência elétrica e da constante característica do extensômetro colado ao material.

2.7.1 Ponte de Wheatstone

Como descrito na seção anterior, através do *Strain Gauge* é possível medir a deformação pela variação de resistência do mesmo, para tanto utiliza-se um circuito elétrico específico chamado de Ponte de Wheatstone, representado na Figura 2.13. Este circuito é o mais empregado pois apresenta maior precisão para medidas de pequenas variações de resistência, como citado em Andolfato, Camacho e Brito (2004).

Figura 2.13. Representação da Ponte de Wheatstone.



Fonte: <https://www.embarcados.com.br/wp-content/uploads/2014/12/wh4.png>

A função do circuito em ponte é de converter uma pequena mudança na resistência em uma voltagem elétrica. Na Figura 2.13, pode ser visto que o circuito é formado por uma fonte de alimentação representada por V , por quatro resistores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 e uma tensão de saída V_M . Quando o circuito é alimentado por uma tensão constante V , com as leis das malhas de Kirchoff é possível obter a tensão de saída entre os pontos 2 e 4, dada pela equação 2.21:

$$V_M = \frac{(R_1 \cdot R_3) - (R_2 \cdot R_4)}{(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)} V \quad (2.21)$$

Quando $R_1 \cdot R_3$ for igual a $R_2 \cdot R_4$, a ponte se encontra em equilíbrio, e então $E_0 = 0$. Por outro lado, suponha que exista uma variação em cada braço da ponte devido a uma deformação e que a ponte estava balanceada com resistências de valores iguais a R , assim a resistência em cada braço da ponte será dada pela equação 2.22:

$$R_n = R + \Delta R_n \quad (2.22)$$

sendo $n = 1, 2, 3$ e 4 , nas quais $\Delta R > 0$, são deformações de tração e $\Delta R < 0$ deformações de compressão. Substituindo a Equação (21) em (22), usando a Equação (22) e admitindo que R^2 possui um valor muito grande e que $\Delta R_n \cdot \Delta R_m$ possui um valor muito pequeno a equação 2.22 pode ser escrita como a equação 2.23:

$$V_M = \frac{V}{4} = K \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.23)$$

Para eliminar efeitos de temperatura, é comum a utilização de ponte inteira ou meia ponte de extensômetros. A meia ponte é montada com um dos extensômetros inativos, como compensador de temperatura, ou seja, colado num material idêntico, porém não é submetido a deformações. Qualquer variação de temperatura será compensada por simetria, pois os dois extensômetros estão ligados a ponte.

2.8 Célula de Carga

Células de carga são dispositivos intensamente utilizados e com vasta aplicação em vários ramos da indústria. As principais razões para sua grande utilização estão intimamente relacionadas à alta fidelidade de resposta, custo baixo, dimensões reduzidas e também porque permitem medições dinâmicas (BECK, 1983). O objetivo elementar de uma célula de carga é fornecer um sinal elétrico sempre que um esforço for aplicado sobre ela, sendo por este motivo classificada como um transdutor eletro-mecânico.

A célula de carga é um transdutor com aplicação desde balanças digitais até processos de automatização e controle industriais. O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se variação da resistência elétrica do extensômetro, quando submetido a uma deformação.

Segundo Reggiani (2002), as células de carga dominam a indústria pesada porque, existem em grande versatilidade, possuem alta precisão e baixo custo. Também cita que as principais características dos extensômetros são: a) Adequada precisão (1%); b) Boa linearidade; c) Fácil instalação; d) Ampla faixa de temperatura; e) São dispositivos pequenos, leves e baratos; f) Adequada resposta estática e dinâmica; g) Aplicável sob condições severas; e, h) Pequeno custo por ponto de medida.

São diversos tipos de célula de carga comercializados, cada qual com as respectivas aplicações (Figura 2.14).

Figura 2.14. Modelos comerciais de célula de carga.



Fonte: http://datado.tk/wp-content/uploads/2016/07/p_celula-de-carga-pr-6202-21.jpg

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Informações Gerais

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

- O equipamento (uma câmara de secagem com um sistema de medição automatizado da variação de massa do produto a ser seco);
- Análise do sistema de medição automatizado.

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

Figura 3.1. Fotos do LEMT, UFCG.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.2. Fotos do *solarium* do LEMT, UFCG.



Fonte: Próprio autor.

O interesse do estudo é projetar um sistema que possibilite a medição da variação de massa, em tempo real, do produto que está sendo seco no secador solar. O sistema de medição também deve medir a temperatura do ar de secagem no interior da câmara de secagem.

3.2. Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados

As medidas de temperatura e da umidade do ar de secagem e da variação da massa devem ser obtidas de forma automatizada por um sistema de aquisição de dados.

Para realizar estas medições e permitir uma avaliação das variáveis intrínsecas ao ar de secagem e dos valores de massa do produto que está sendo seco, foi construído um sistema de medição, desenvolvido especificamente para este sistema de secagem, sendo esse um dos objetivos deste trabalho. Tal sistema de medição foi confeccionado no sistema Arduino utilizando dois sensores de temperatura e umidade do tipo DTH22 e uma célula de carga tipo extensômetro de folha. Estes sensores foram posicionados inicialmente na parte interna da câmara de secagem e a célula de carga, num segundo momento, na parte externa da câmara.

3.2.1. 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 (*MultipointControl 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.

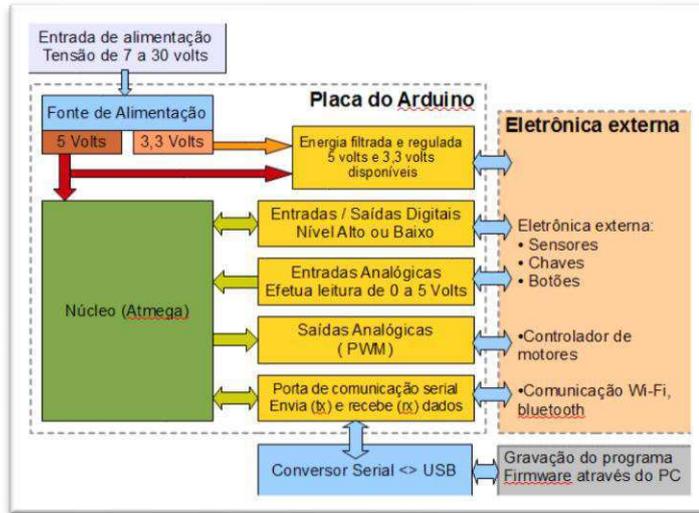
Existem diversas versões do Arduino para múltiplas aplicações, no caso proposto foi empregado a versão do Arduino UNO (Arduino de uma única placa) que é uma versão das mais populares da plataforma e é dotada de um ATmega328 como processador.

Na placa existem 14 pinos de E/S digitais, onde 6 destes são 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 5V e 3V que alimentam o processador e boa parte dos sensores que podem ser conectados às portas.

Ao contrário de outras plataformas, o Arduino pode ser programado diretamente pela interface USB. Em outros dispositivos é necessária a utilização de um programador conectado a interface JTAG (*Joint Test Access Group*).

A Figura 3.3 apresenta a arquitetura de hardware da placa de Arduino e esquematiza a interface entre seus blocos.

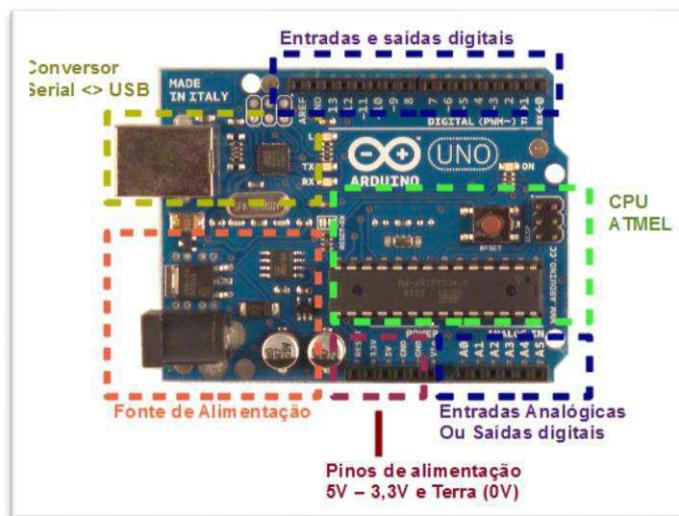
Figura 3.3. Arquitetura de hardware da placa de Arduino.



Fonte: Daniel Basconcello Filho (Robotizando, 2016)

A Figura 3.4 mostra a distribuição dos blocos e seus posicionamentos na placa Arduino.

Figura 3.4. Distribuição dos blocos na placa do Arduino.



Fonte: Daniel Basconcello Filho (Robotizando, 2016)

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 0V e 5V. Como uma saída digital é um valor entre 0 V e 5V, 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, umidade relativa do ar e massa) é feita em vários intervalos de tempo distintos e estes são mostrados em um display de LCD (*Liquid Crystal Display*) automaticamente. Além disso, estes dados também são gravados. 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.

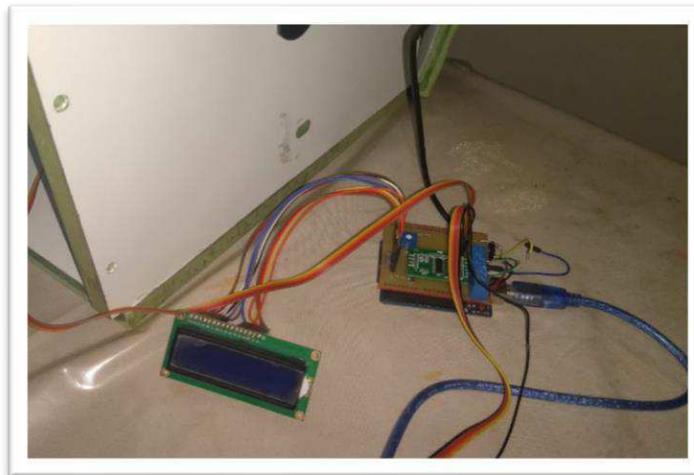
Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é composto por um ARDUINO UNO, célula de carga do tipo extensômetro de folha e sensores DHT 22. O ARDUINO recebe sinais digitais dos sensores DHT 22, converte em valores de temperatura e armazena num cartão de memória.

Recebe também sinais de tensão da célula de carga, os quais são convertidos em dados digitais e transformados em dados de massa (g), todo o sistema é alimentado por uma fonte de 12 V. Tal sistema ainda controla o ligamento e desligamento de um cooler que funciona como sistema de exaustão.

O sistema de aquisição de dados utilizados pode ser visto na Figura 3.5.

Figura 3.5. Sistema de aquisição de dados.



Fonte: Próprio autor.

3.3 Desenvolvimento da câmara de secagem com sistema de medição de massa

O objetivo desta dissertação é descrever o desenvolvimento de um sistema de medição de massa que é capaz de fornecer dados de temperatura e umidade do ar, além da massa. Para isto, foi necessário projetar o sistema de medição de duas formas. Na primeira forma projetada, a célula de carga se encontrava na parte interna da câmara, como visto na figura 3.6.

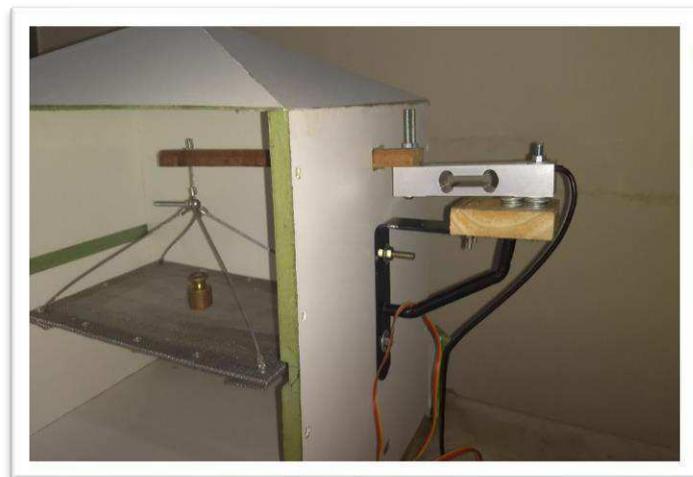
Figura 3.6. Câmara de secagem com célula de carga na parte interna.



Fonte: Próprio autor.

Na segunda forma projetada, a célula de carga se encontra na parte externa da câmara, como visto na Figura 3.7.

Figura 3.7. Câmara de secagem com célula de carga na parte externa.



Fonte: Próprio autor.

3.3.1 Análise do sistema de medição de massa

Para realizar a análise do sistema de medição, foram feitas várias medições utilizando pesos padrão. Tais pesos são utilizados devido a garantia de que o valor de massa indicado se manterá fixo.

Figura 3.8. Caixa com pesos padrão.



Fonte: Próprio autor.

Para realizar a variação de temperatura foram utilizadas lâmpadas incandescentes halógenas, além de serem usados dimmers, para controle da potência das lâmpadas.

Figura 3.9. Lâmpada incandescente halógena.



Figura 3.10. Dimmer.



Fonte: Próprio autor.

Inicialmente, são feitas várias medições, estas têm como objetivo iniciar o sistema de medição do ponto de zero grama. A partir daí é colocado um peso padrão de 100 g no prato da balança, e o sistema de aquisição de dados, conectado a célula de carga, informa através do display LCD o valor de massa, além de temperatura e umidade do ar.

Com esses valores de medição gravados no cartão SD, foi possível verificar como o sistema se comporta em várias situações, estando célula de carga na parte interna ou externa

da câmara de secagem, e com variação de temperatura. Para a chegada do protótipo final, a cada erro encontrado, uma solução foi proposta e realizada. No capítulo IV serão apresentados os testes realizados e os erros encontrados, bem como as soluções propostas e efetivamente realizadas.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Experimental

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes experimentais EXP1, EXP2, EXP3, EXP4, EXP5, EXP6, EXP7 e EXP8, seguindo-se a análise dos resultados.

No caso dos experimentos 1, 2 e 3, a célula de carga foi instalada na parte interna da câmara de secagem; nos experimentos 4, 5 e 6, a célula de carga foi instalada na parte externa da câmara de secagem. Em cada experimento, é observada a estabilidade da leitura dos valores de massa medidos. Para verificar isso, foram realizados dois procedimentos de medição em curtos períodos de tempo, em longos períodos de tempo, enquanto a temperatura sofre variações.

A partir dos resultados obtidos, são discutidos os erros encontrados, suas causas, e soluções para os mesmos.

4.1.1 Experimento 1

Na Figura 4.1, é exibido o protótipo 1 de balança. Este protótipo apresentou alta resistência e estabilidade nas medições de massa sob temperatura de 23°C, porém apresentou resultados insatisfatórios quando o peso padrão é de 100 g e não se encontra no centro da balança.

Como não é possível garantir o posicionamento dos frutos a serem secos no centro da balança, é necessário que, mesmo sob qualquer variação na posição do peso padrão, a leitura de dados permaneça inalterada. O protótipo 1 do sistema de medição apresentou falha nesse quesito, sendo então descartado. O protótipo pode ser visto na Figura 4.1.

Figura 4.1. Primeiro protótipo de balança.



Fonte: Próprio autor

4.1.2 Experimento 2

No experimento 2, o prato da balança do sistema de medição foi modificado e substituído, para não apresentar os mesmos problemas encontrados no experimento 1. O protótipo 2 pode ser visto na Figura 4.2.

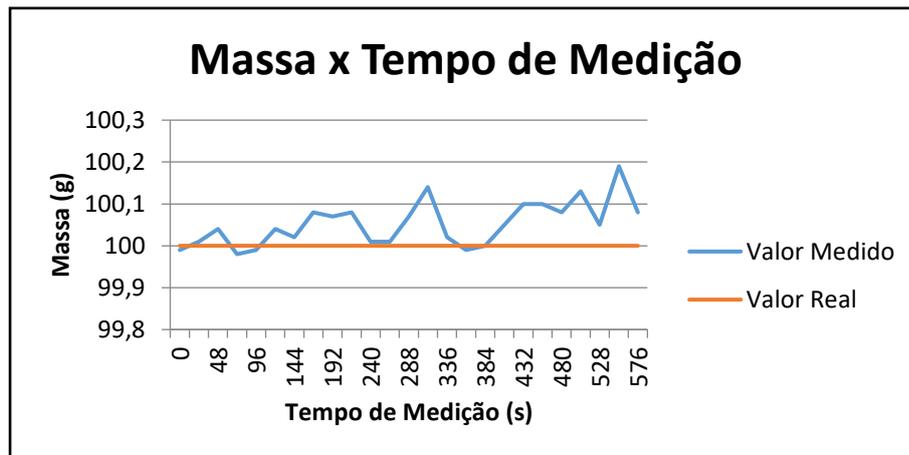
Figura 4.2. Segundo protótipo de balança.



Fonte: Próprio autor

Este protótipo apresentou resultados satisfatórios quando submetido a temperatura de 23°C, como pode ser visto, para um peso padrão de 100 g, mostrado no Gráfico 01.

Gráfico 01. Medição de massa no protótipo 2.



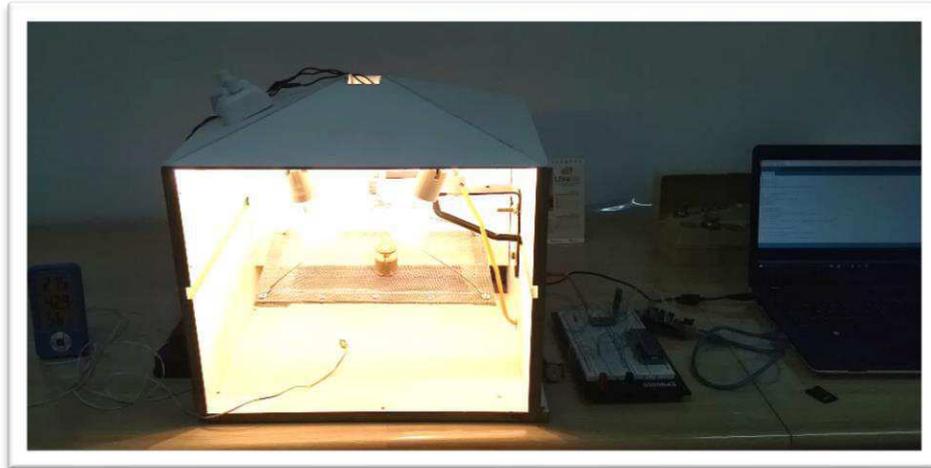
Fonte: Próprio autor.

No Gráfico 01 são apresentados os dados de medição adquiridos pelo sistema de aquisição de dados do protótipo 2. Como pode ser visto, a medição apresenta um erro percentual de 0,18% e desvio padrão de 1,04, o que demonstra que o sistema possui alta estabilidade na medição de massa. Tal medição foi realizada durante o tempo de 10 minutos. Dentro deste tempo, o sistema apresenta bons resultados.

4.1.3 Experimento 3

No experimento 3 foi utilizado o protótipo 2 da balança. Entretanto, foi aplicada uma variação de temperatura para verificar como o sistema se comportaria sob essa condição. Este experimento foi projetado sob a condição de que o sistema em desenvolvimento tem o objetivo de ser usado em secagem de frutos, e no interior da câmara de secagem há variação de temperatura que pode atingir valores acima 60°C. Portanto, é importante verificar como o sistema se comporta sob essas variações. Para a realização deste experimento, foram utilizadas 4 lâmpadas incandescentes halógenas de 100 W cada, bem como foram utilizados dimmers para controlar a potência das lâmpadas, ou seja, a variação de temperatura inserida na câmara de secagem, como pode ser visto na Figura 4.3.

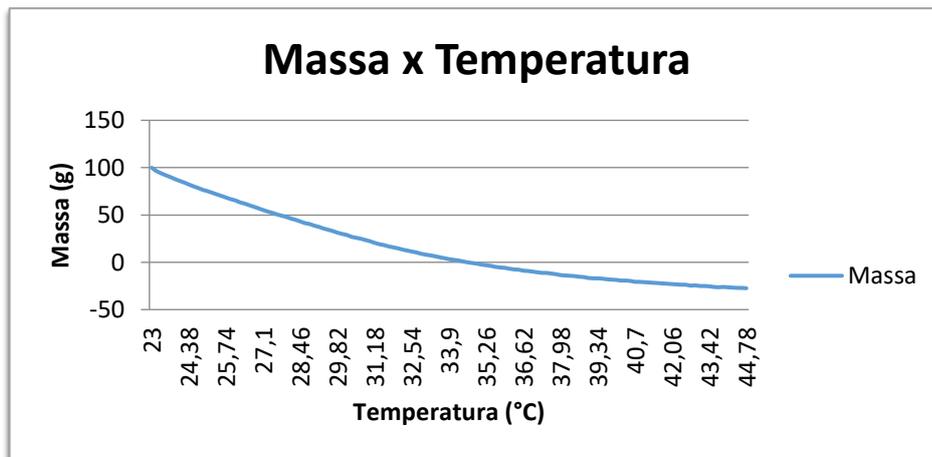
Figura 4.3. Segundo protótipo de balança sob variação de temperatura.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos neste experimento podem ser vistos no Gráfico 02.

Gráfico 02. Relação de Massa x Temperatura no Protótipo 2.



Fonte: Próprio autor

Como pode ser observado no Gráfico 02, o aumento de temperatura tem uma alta influência na medição, a qual é realizada durante 20 minutos. Como a temperatura influencia nesta medição, este protótipo não pode ser utilizado para os experimentos de secagem de banana, já que, nestes ocorrem variações na temperatura no interior da câmara, podendo chegar a 60°C.

4.1.4 Experimento 4

Neste experimento foi utilizado o protótipo 3. Este protótipo é uma solução para diminuir ou eliminar a interferência da temperatura no sistema de medição, como pode ser visto na Figura 4.4.

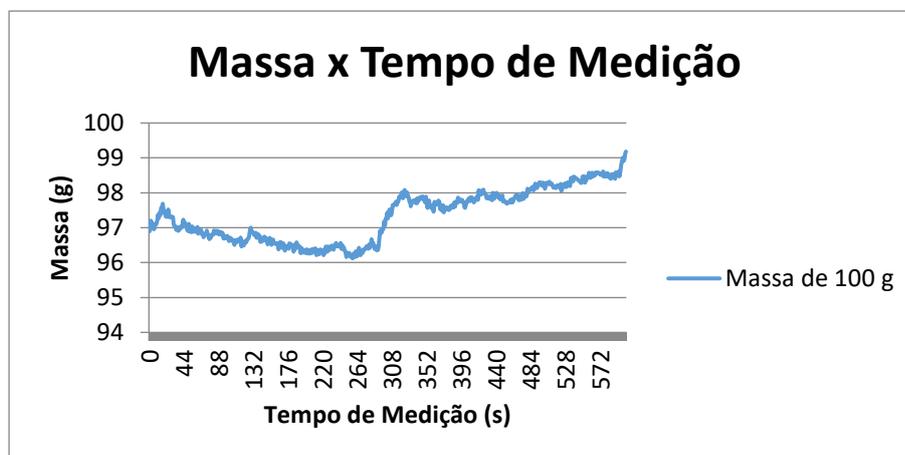
Figura 4.4. Terceiro protótipo de balança.



Fonte: Próprio autor

Antes de garantir o funcionamento do protótipo 3 sob variação de temperatura, fez-se necessário garantir a estabilidade da medição sob temperatura ambiente. Neste experimento, foram realizadas várias medições, durante 10 minutos, para verificar a estabilidade do sistema em curtos períodos de medição, os resultados obtidos podem ser vistos no Gráfico 03.

Gráfico 03. Medição no protótipo 3 sob temperatura ambiente.



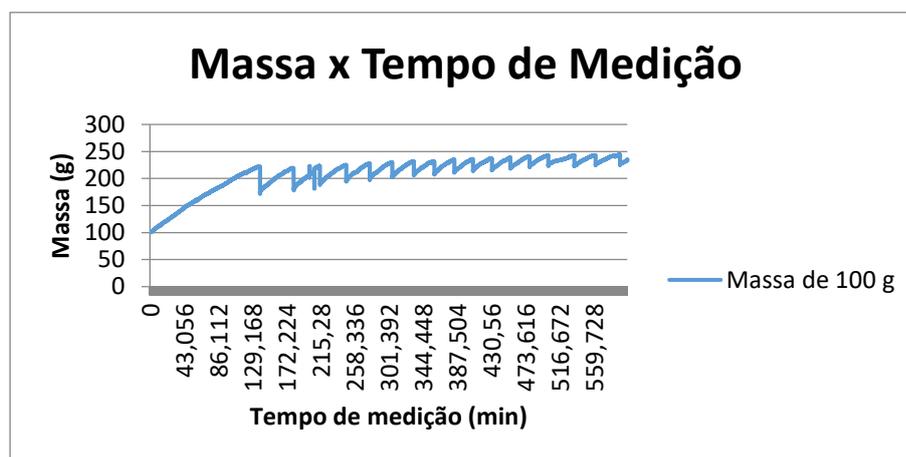
Fonte: Próprio autor.

Como pode-se ver no Gráfico 03, a medição realizada durante 10 minutos apresenta um erro percentual de 4,00%. Este erro é aceitável, comprovando que o protótipo 3 para medições de curto tempo apresenta bons resultados.

4.1.5 Experimento 5

No experimento 5, antes de aplicar variação de temperatura, foi verificado que, à medida que o tempo de medição aumenta, as medições começam a apresentar um erro elevado. Este experimento foi realizado para verificar a dimensão deste erro. Esta dimensão pode ser vista no Gráfico 04.

Gráfico 04. Medição no protótipo 3 (tempo: 10 horas).



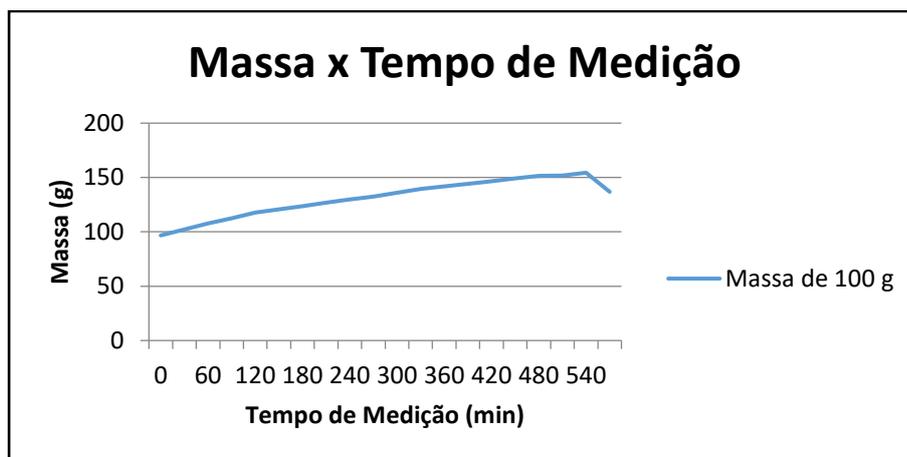
Fonte: Próprio autor

Observando os dados apresentados no Gráfico 04, pode-se afirmar que o sistema apresenta resultados insatisfatórios quando o tempo de medição é estendido (10 horas), com medições a cada 1 segundo. Foi utilizado no experimento o peso padrão de 100 g. Verificou-se que há um erro percentual superior a 100%. Foram realizadas uma série tentativas para evitar que este erro persistisse. Foram adicionados filtros analógicos, os quais não alteraram o erro, logo após, foram adicionados filtros digitais no sistema, persistindo a variação indevida de massa, ou seja outros tipos de filtros devem ser testados em trabalhos futuros.

4.1.6 Experimento 6

No experimento 6, foram feitas medições durante 10 horas, com intervalo de tempo entre as medições de 30 minutos. Com isso, o sistema apresentou melhora significativa, sendo diminuído o erro de 150% para 60%. Mesmo com essa modificação, o sistema continuou com um erro alto e insatisfatório, como pode ser visto no Gráfico 05.

Gráfico 05. Medição no protótipo 3 (tempo: 10 horas, intervalo: 30 minutos).



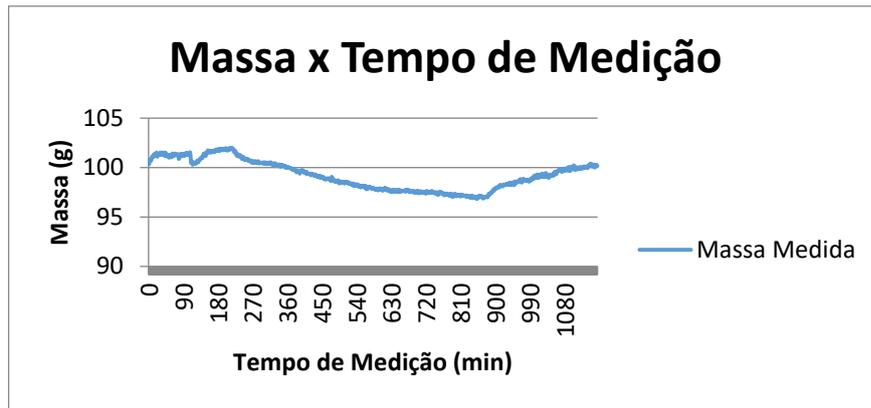
Fonte: Próprio autor

Apesar de apresentar uma melhora em relação ao experimento anterior, o sistema com essas interferências indesejáveis ainda não é aceitável.

4.1.7 Experimento 7

No experimento 7, a metodologia foi alterada. Em todos os experimentos anteriores a célula de carga era alimentada de forma ininterrupta. Em longos períodos de medição, a tensão aplicada provoca um aquecimento dos extensômetros alterando, neste caso, a leitura de tensão captada pelo ARDUINO. Portanto, usando o próprio ARDUINO para controlar a alimentação da célula de carga, esta só foi alimentada no momento da medição. Desta forma o sistema se tornou satisfatório apresentando um erro percentual máximo de 3%, um desvio padrão de 1,49 e uma média de 99,2 g. Para este experimento foi utilizado o mesmo peso padrão de 100 g. As medições podem ser vistas no Gráfico 06.

Gráfico 06. Medição no protótipo 3 (tempo: 22 horas, intervalo: 1 minuto).



Fonte: Próprio autor.

Analisando o Gráfico 06, confirma-se que o protótipo 3 possui resultados satisfatórios, mesmo durante longos períodos de tempo de trabalho, devido à nova metodologia utilizada.

A partir da constatação de que o protótipo foi satisfatório, deu-se início ao Experimento 8, que é a secagem da banana.

4.1.7 Experimento 8

No experimento 8 foi realizado o processo de secagem da banana. Como pode ser visto na Figura 4.5, as bananas a serem secas são posicionadas na balança automatizada e esta é colocada no interior da câmara de secagem.

Figura 4.5. Secagem de banana com processo de medição automatizado.



Fonte: próprio autor.

O processo de secagem foi realizado durante 14 horas. Foram 7 horas no dia 22 de Novembro de 2017 e 7 horas no dia 23 de Novembro de 2017. Com início as 9:00 h e término as 16:00 h. Antes de iniciar a secagem, foi realizada a medição da massa de banana numa balança de precisão, como pode ser visto na Figura 4.6.

Figura 4.6. Medição da massa de banana antes da secagem.



Fonte: próprio autor.

Os resultados obtidos com o experimento 8 são apresentados na Tabela 4.1 e mostram a variação das propriedades da banana durante o processo de secagem. A primeira coluna mostra os valores da variação de massa da banana entre o início e término do experimento, e nas colunas seguintes; a massa seca de banana (30,5 g) e a massa de água presente na banana em base úmida e base seca. Finalmente é mostrado o valor e a variação da razão de umidade.

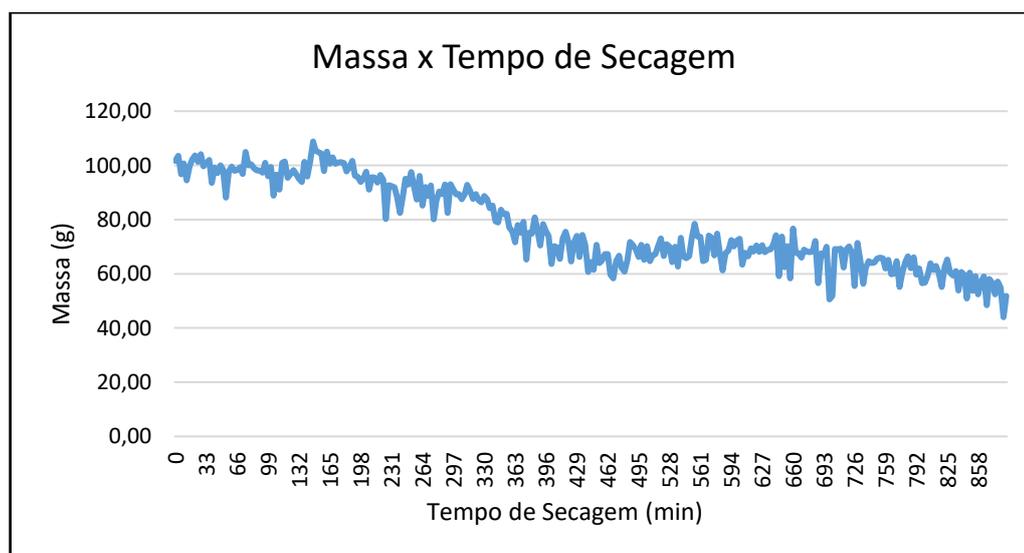
Com os dados desta tabela foram construídas os Gráficos da variação de massa (Gráfico 7) e da cinética de secagem da banana (Gráfico 8).

Tabela 4.1 Variação das propriedades da banana durante o processo de secagem.

Experimento 22 e 23 de outubro					
Tempo (min)	Produto (g)	Massa seca (g)	Teor de água (b.u)	Teor de água (b.s)	$RX=(X-X_e)/(X_0-X_e)$
0	101,68	30,5	0,7000	2,3338	1
30	99,65	30,5	0,6939	2,2672	0,9548
60	98,04	30,5	0,6889	2,2144	0,9189
90	97,3	30,5	0,6865	2,1902	0,9024
120	96,81	30,5	0,6849	2,1741	0,8915
150	104,84	30,5	0,7091	2,4374	1,0704
180	97,76	30,5	0,6880	2,2052	0,9127
210	95,41	30,5	0,6803	2,1282	0,8604
240	88,58	30,5	0,6557	1,9043	0,7082
270	92,57	30,5	0,6705	2,0351	0,7971
300	89,38	30,5	0,6588	1,9305	0,7261
330	87,54	30,5	0,6516	1,8702	0,6851
360	71,61	30,5	0,5741	1,3479	0,3303
390	78,34	30,5	0,6107	1,5685	0,4802
420	64,53	30,5	0,5274	1,1157	0,1726
450	63,91	30,5	0,5228	1,0954	0,1588
480	65,19	30,5	0,5321	1,1374	0,1873
510	67,24	30,5	0,5464	1,2046	0,2330
540	66,42	30,5	0,5408	1,1777	0,2147
570	73,34	30,5	0,5841	1,4046	0,3688
600	72,93	30,5	0,5818	1,3911	0,3597
630	68,8	30,5	0,5567	1,2557	0,2677
660	67,74	30,5	0,5497	1,2210	0,2441
690	66,63	30,5	0,5422	1,1846	0,2194
720	67,73	30,5	0,5497	1,2207	0,2439
750	65,96	30,5	0,5376	1,1626	0,2045
780	66,4	30,5	0,5407	1,1770	0,2143
810	62,95	30,5	0,5155	1,0639	0,1374
840	59,58	30,5	0,4881	0,9534	0,0624
870	56,78	30,5	0,4628	0,8616	0,0000

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 07. Secagem (massa x tempo de secagem).

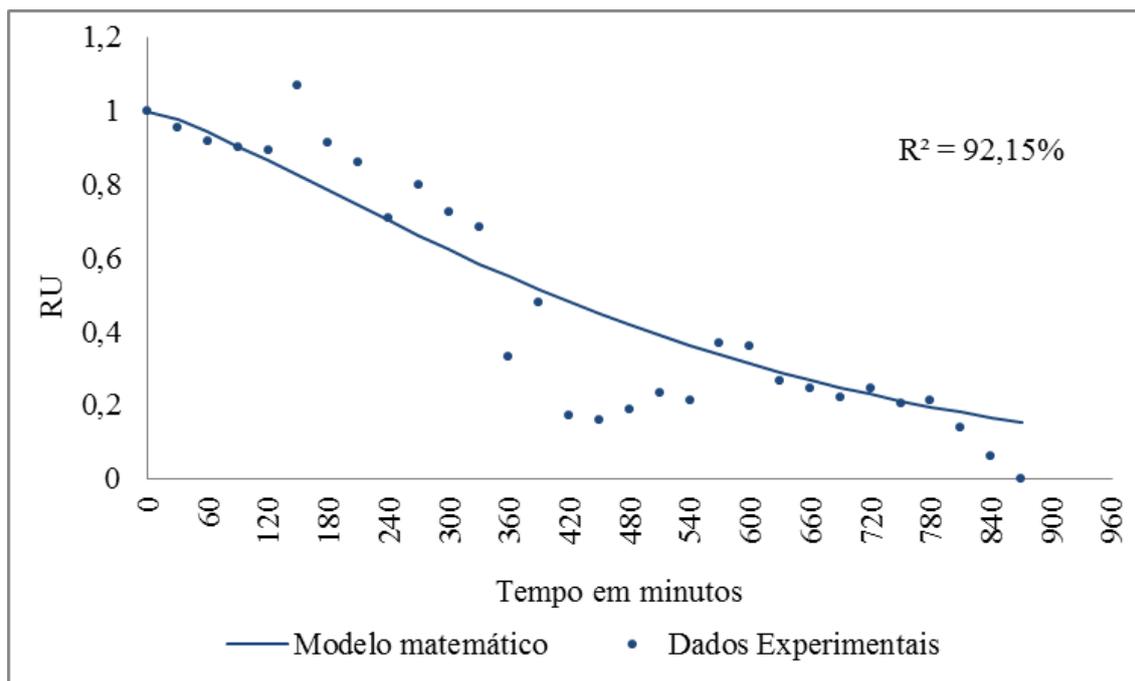


Fonte: Próprio autor.

No Gráfico 07 é possível observar a influencia das interferências no processo de medição da variação da massa de banana. Isso mostra que os filtros utilizados nesta pesquisa não foram suficientes para eliminar completamente essas interferências.

No Gráfico 08 é apresentado a curva de cinética de secagem (razão de umidade x tempo).

Gráfico 08. Curva de cinetica de secagem.



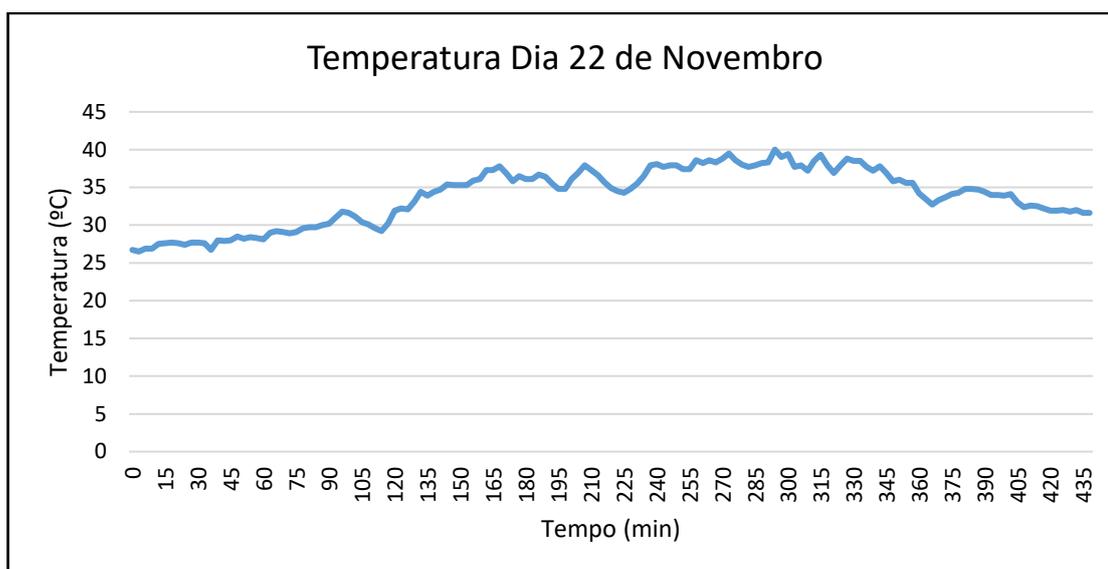
Fonte: Próprio autor

É possível verificar no Gráfico 08 uma diferença entre os dados experimentais e a curva obtida pelo modelo matemático de Page. Isso ocorreu porque o sistema automatizado utilizado ainda apresenta imprecisão decorrente de interferências indesejáveis.

O teor final de umidade da banana em base úmida ficou em 44%, o que está acima do ideal. No Brasil a banana para ser considerada banana passa deve ter esse teor de umidade abaixo de 25%.

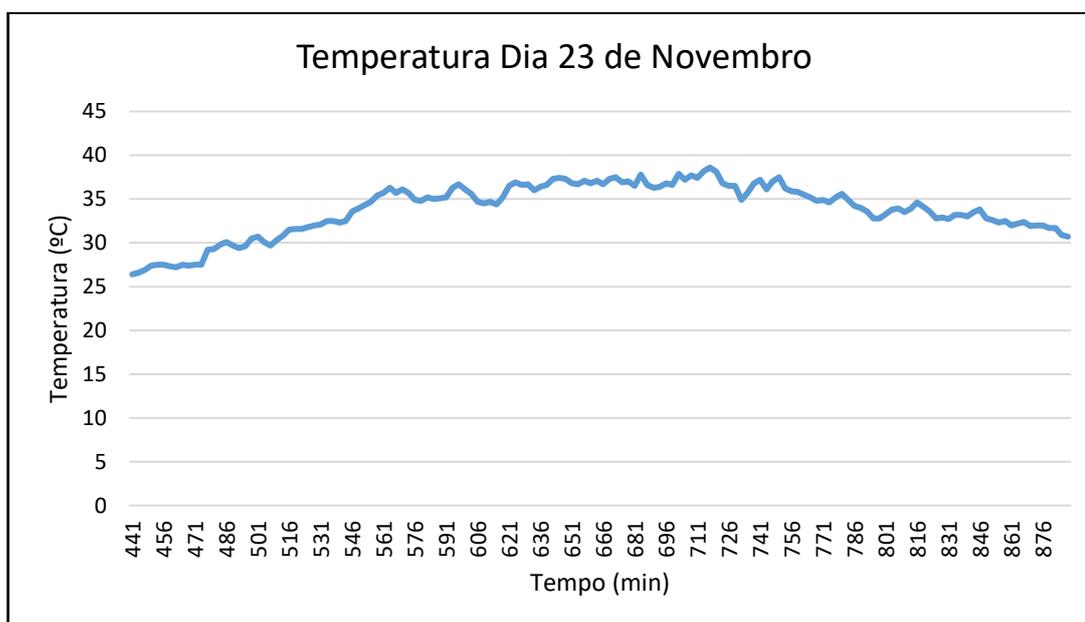
Os Gráficos 10 e 11 mostram a variação da temperatura do ar de secagem no interior da câmara nos dias de realização dos experimentos. Esses valores de temperatura do ar em torno de 30 °C a 40°C são baixos para o mês de novembro, nesta época do ano a temperatura no interior da câmara deveria ficar em torno de 50°C ±10°C.

Gráfico 09. Temperatura do ar na câmara de secagem (22/11/2017).



Fonte: Próprio autor.

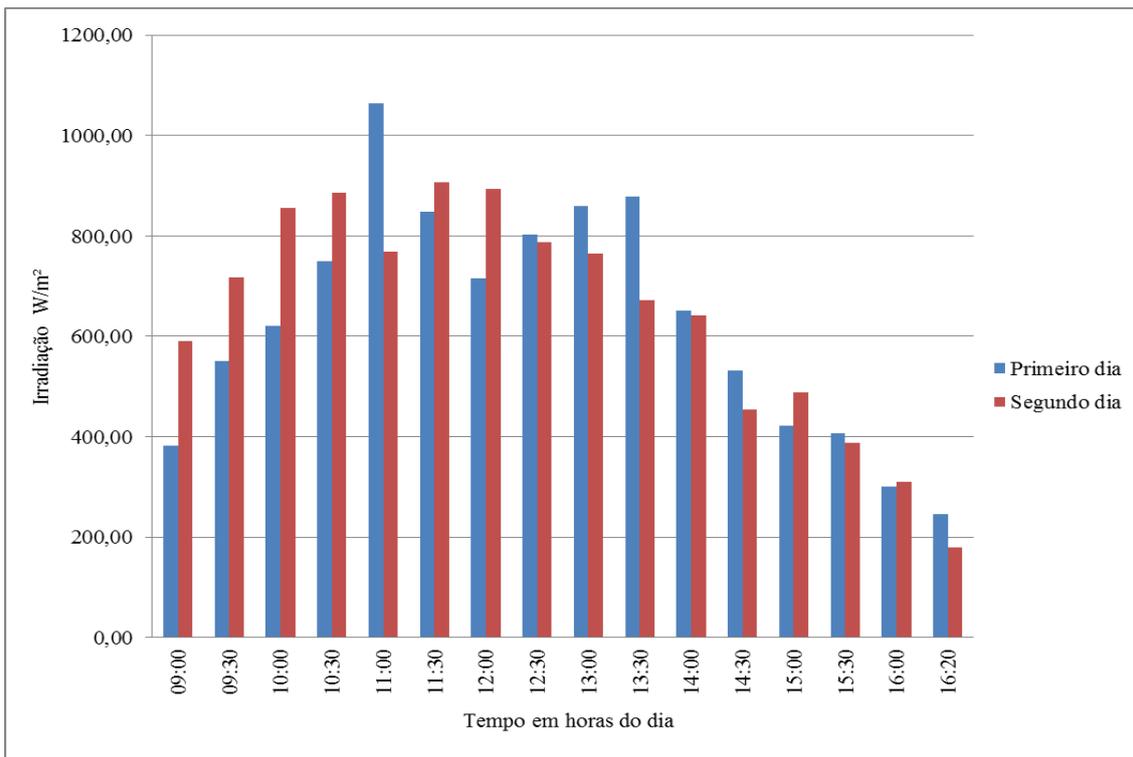
Gráfico 10. Temperatura dentro da câmara de secagem (23/11/2017).



Fonte: Próprio autor.

No Gráfico 11 são apresentados os dados da intensidade da radiação solar incidente (irradiação solar) no LEMT nos dias 22 e 23 de novembro de 2017. Esses dados são obtidos na estação solarimétrica da UFCG instalada no CEEI.

Gráfico 11. Irradiação solar no LEMT nos dias 22 e 23 de novembro de 2017.



Fonte: Próprio autor.

No Gráfico 11 pode ser observado que os dados medidos de irradiação solar para esta época do ano são compatíveis com a média histórica da região de Campina Grande, PB. Isso mostra que os dados de temperatura do ar de secagem no interior da câmara do secador solar mostrados nos Gráficos 09 e 10 ficaram abaixo da média esperada devido as interferências indesejáveis no sistema de medição. Neste sistema de medição automatizado serão necessários outros processos de filtragem para reduzir as interferência a nível zero.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1 Conclusões

Com os resultados apresentados, pode-se concluir que a mudança de protótipo do tipo 1 e 2 para o tipo 3 mostrou que o sistema de medição automatizado sofre menor interferência da temperatura. Em curtos períodos de medição, dentro da câmara de secagem, o protótipo 3 se mostrou mais adequado para medir a variação automatizada de massa do produto a ser seco no interior da câmara de secagem.

Após a aplicação da nova metodologia, com a alimentação da célula de carga apenas no momento da medição, o sistema de medição apresentou um menor número de interferências indesejáveis.

O sistema de aquisição de dados realizou suas funções, tendo em vista que, foi possível, a partir dele, medir temperatura do ar de secagem. Em longos períodos de medição, essa parte do sistema mostrou instabilidade menor, mas as interferências não foram totalmente eliminadas, isto se deve principalmente, á falta de precisão do sistema de aquisição que apresentou problemas devido a dificuldade de acondicionamento dos sinais elétricos fornecidos pela célula de carga.

Os resultados obtidos durante a secagem da banana prata (*Musa spp*), permitiram a construção das curvas de variação de massa de banana e a curva de cinética de secagem. Também foram obtidas as curvas que mostram a variação da temperatura do ar de secagem no interior da câmara. Essa temperatura ficou na faixa de 30°C a 40°C, abaixo do esperado que era de 50°C \pm 10°C, mesmo com intensidade da radiação solar nos dias de experimento apresentando valores dentro do esperado. Por isso a banana atingiu apenas o valor de 44% de teor de umidade em base úmida, acima dos 25% desejável.

Foram observadas interferências indesejáveis durante o processo de medição automatizada, as estratégias utilizadas (filtros) para reduzir essas interferências não foram suficientes para reduzi-las totalmente e seguirão sendo estudadas em trabalhos futuros.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para futuras pesquisas:

- Realizar novas pesquisas para identificar outras estratégias usadas na filtragem dos dados captados pelo sistema de aquisição afim de tornar o sistema com maior precisão e completamente independente de interferências indesejáveis.

REFERÊNCIAS

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

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. **Extensometria básica**. Disponível em: < <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>>. Acesso em: 26 fev. 2017.

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

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

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

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

BECK, J.C.P. **Projeto, construção e análise de células de carga de placa e de anel**. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1983.

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

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

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

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

CNA BRASIL . **Chegou a vez da fruticultura.** Disponível em: <http://www.cnabrazil.org.br/artigos/chegou-vez-da-fruticultura>.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

LEITE, J. B., MANCINI, M. C., BORGES, S. V. Effect of drying temperature on the quality of dried bananas cv. Prata and d'água. **LWT - Food Science and Technology.** v.40, n.(2), p.319-323, 2007.

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

LIMA, A. G. B., NEBRA, S. A., QUEIROZ, M. R. Aspectos científico e tecnológico da banana. Comunicado técnico. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais.** Campina Grande, PB, v.2, n.(1), p.87-101, 2000.

LIMA, A. G. B., SILVA, E. G., SPAROVEK, G., STURION, G. L., PRECOPPE, M. F. M., MEIRA M. L. R., SPOTO, M. H. F., MORAES, S. O. **Manual de desidratação solar de frutas, ervas e hortaliças**. Série Produtor Rural – n.33. Piracicaba, SP: Universidade de São Paulo-USP, 50p, 2006.

MEDINA, J. C., BLEINROTH, E. W., DE MARTIN, Z. J., TRAVAGLINI, D. A., OKADA, M., QUAST, D. G., HASHIZUME, T., RENESTO, O. V., MORETTI, V. A. **Banana: da cultura ao processamento e comercialização**. São Paulo: Secretaria da Agricultura. 197p. (Série Frutas Tropicais, 3), 1978.

MELO, B., SILVA, C. A., ALVES, P. R. B. **Processamento mínimo de frutas e hortaliças**. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em <<http://www.fruticultura.iciag.ufu.br/pminimo.htm>>, 2005.

NGUYEN, M. H., PRICE, W. E. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. **Journal of Food Engineering**. v.79, n.(1), p.200-207, 2007.

NUNES, A. G., GOMES, I. A., JÚNIOR, J. I. S., GRILO, M. B. Estudo para Determinação do Modelo Matemático Representativo de Experimentos com Secagem de Banana Usando Energia Solar e Gás Liquefeito de Petróleo. **Revista Magistra**. Ilhéus-BA, v.25, n(1), p.1-5, 2014.

PAN, Z., SHIH, C., MCHUGH, T. H., HIRSCHBERG, E. Study of Banana dehydration using sequential infrared radiation hearing and freeze-drying. **LTW: Food Science and Technology**. v.41, p.194-195, 2008.

PARK, K. J., COLATO, G. A., OLIVEIRA, R. A., PARK, K. J. B. **Conceitos de Processo e equipamentos de secagem**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.

PENEIRO, Júlio César de; MELO, Liliane Pimenta de; CORADI, Thiago Bilatto. Construção de Aquecedor Solar de Baixo Custo sem Cobertura: Análise Experimental da Eficiência

Térmica para Vários Ensaios. **Revista de Ciência & Tecnologia**. v.10, n.(1), p.18-34, Nova Iguaçu, RJ, 2010.

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

REGGIANI, Luciana Paula; BATALHA, Gilmar Ferreira; SANTONI, Cristiane; VALDÉZ SALAZAR, Carlos Eddy; MARCICANO, João Paulo Pereira. **Célula de carga para matriz de hidroconformação** / Load cell for an hydroforming die. Anais.. Sao Paulo: USP, 2002.

RODRIGUES, Andréa Fernandes. **Modelagem Matemática do Estudo Experimental das Secagens Contínua e Intermitente de Bananas**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, PB, 197p, 2015.

SANTOS, J. C., SANTOS, R. S., BARROS, G. D. T., SANTOS, J. C., GURGEL, J. M., MARCONDES, F. Estudo Numérico da Cinética de Secagem em Bananas. **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2010.

SAVICKI, Darci.Luiz. **Análise numérica tridimensional e investigação experimental do comportamento térmico e hidrodinâmico de reservatórios térmicos cilíndricos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, RS, 197p, 2007.

SILVA, J. S., DONZELLES, S. M. L., CORRÊA, P. C. **Secagem de grão com energia solar**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, p.171-189, 2006.

SILVA, J. S., BERBERT, P. A., RUFATO, S., AFONSO, A. D. L. Indicadores da qualidade dos grãos. In: SILVA, J. S. (Ed.). **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, p.63-107, 2008.

SILVA, Juarez de Sousa. Secagem e Armazenamento de Produtos Agrícolas. **Secagem e secadores**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, p.109-146, 2008.

SILVA, W. P., SILVA, C.M.D.P. S., GAMA, F.J. A., GOMES, J. P. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2013.01.003>, 2013.

SMITABHINDU, R., JANJAI., CHANKONK, V. Optimization of a solar-assisted for drying banana. **Renewable energy**. v.33, p.1523-1531, 2008.

SOUZA, L. G. M., SILVA, T. S., VIEIRA, A. P. N. B., BRITO, A. M. L., MARQUES, M. S., BATISTA, S. S. Construção de um secador solar a partir de sucatas de tambor de lixo. **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. São Luís, MA, 2012.

SOUZA, L. G. M., MOURA, P. H. O., SOUZA, L. G. V. M., SILVA, T. S., LIMA, A. S., VARELA, P. H. A. Secagem de morango com secador de exposição direta fabricado a partir de sucata de luminária. **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. São Luís, MA, 2012.

TRIGUEIRO, André Trigueiro. **Mundo Sustentável 2: novos rumos para um planeta em crise**. São Paulo, Editora Globo, 399p, 2012.

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