

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS
CÂMPUS CENTRAL SEDE ANÁPOLIS - CET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
GUILHERME GONÇALVES COSTA

**DIMENSIONAMENTO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SECADOR DE
LEITO FLUIDIZADO PARA SECAGEM DE PRODUTOS VEGETAIS**

ANÁPOLIS-GO

2022

GUILHERME GONÇALVES COSTA

**DIMENSIONAMENTO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SECADOR DE
LEITO FLUIDIZADO PARA SECAGEM DE PRODUTOS VEGETAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás
- UEG, Câmpus Central Sede Anápolis – CET, como parte
das exigências do Programa de Pós-Graduação *Stricto
Sensu* em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração CNPQ: Processamento e
Armazenamento de Produtos Agrícolas
Orientador: Prof. Dr. Ivano Alessandro Devilla

ANÁPOLIS-GO

2022



TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL (BDTD)

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Estadual de Goiás a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UEG), regulamentada pela Resolução, **CsA n.1087/2019** sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

Dados do autor (a)

Nome Completo: Guilherme Gonçalves Costa

E-mail: guilherme-goc@hotmail.com

Dados do trabalho

Título: Dimensionamento, construção e avaliação de um secador de leite fluidizado para secagem de produtos vegetais.

Tipo

() Tese (X) Dissertação

Curso/Programa: Mestrado em Engenharia Agrícola

Concorda com a liberação documento [] SIM

[X] NÃO¹

Anápolis, 16 / 04 / 2022
Local Data

Guilherme Gonçalves Costa
Assinatura do autor (a)

João Alessandro Delle

Assinatura do orientador (a)

¹ Casos de impedimento:

- Período de embargo é de um ano a partir da data de defesa
- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da Dissertação/Tese em livro.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UEG
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

GC837d Gonçalves Costa, Guilherme
Dimensionamento, construção e avaliação de um
secador de leito fluidizado para secagem de produtos
vegetais. / Guilherme Gonçalves Costa; orientador Ivano
Alessandro Devilla. -- Anápolis, 2022.
89 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
Mestrado Acadêmico em Engenharia Agrícola) -- Câmpus
Central - Sede: Anápolis - CET, Universidade Estadual
de Goiás, 2022.

1. Ipomoea batatas. 2. Secagem convectiva. 3.
Modelagem matemática. 4. Rendimento. 5. Tempo de
secagem. I. Alessandro Devilla, Ivano, orient. II.
Título.

GUILHERME GONÇALVES COSTA

**DIMENSIONAMENTO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SECADOR DE
LEITO FLUIDIZADO PARA SECAGEM DE PRODUTOS VEGETAIS**

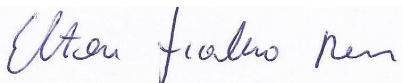
Dissertação defendida ao Programa de Pós-Graduação
Stricto Sensu em Engenharia Agrícola, Campus Central
Sede Anápolis – CET, Universidade Estadual de Goiás,
para obtenção do título de mestre.

Aprovado (a): 25 de fevereiro de 2022.

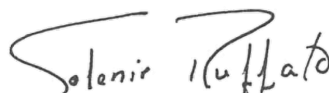
Banca examinadora



Prof. Dr. Ivano Alessandro Devilla
Universidade Estadual de Goiás



Prof. Dr. Elton Fialho dos Reis
Universidade Estadual de Goiás



Profa. Dra. Solenir Ruffato
Univerisade Federal do Mato Grosso

ANÁPOLIS – GO

2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado forças e me guiado sempre nos seus caminhos.

Aos meus Pais Carlos Costa Pires Sobrinho e Alessandra Clay Gonçalves Costa por me apoiar em todas as decisões que tomo na vida, me incentivar e me dar suporte, sempre me mostrando que tudo depende do nosso esforço e dedicação, e minha irmã Isabella Gonçalves Costa pela amizade e por sempre estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus avós Jorcelina, Marly, Idílio e Agnelo (que sonhava em me ver onde estou hoje) pelo acolhimento, pelo carinho, pelos ensinamentos e que sempre me apoiaram juntamente com meus tios.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ivano Alessandro Devilla, pelos anos de orientação, apoio, ética, dedicação e pela sua paciência comigo.

A minha namorada Jordanna da Silva Carvalho, que sempre me apoiou nesse período, me colocava para cima em momentos difíceis, pelo seu companheirismo, amor e carinho.

Aos meus amigos que me ajudaram e apoiaram: Kedinna Dias, Laís Medeiros, Karina Rabelo, Frank Freire.

Aos Professores do Programa de Mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Goiás, por toda contribuição para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao Programa de Mestrado Stricto Sensu em Engenharia Agrícola e a Universidade Estadual de Goiás pela possibilidade de alcançar tal mérito.

A Capes pelo auxílio financeiro para a realização desta pesquisa.

E a todos familiares e amigos que me apoiaram durante essa jornada!

RESUMO

Os equipamentos de secagem projetados para produtos agrícolas, conhecidos como secadores, são construídos em diferentes modelos, fluxos de ar e forma de operação visando eficiência do processo e a manutenção da qualidade do produto durante e após a secagem. A secagem em leito fluidizado vem se destacando devido ao bom contato entre gás-sólido, custos atrativos e altas taxas de recirculação de partículas, transferência de calor e massa, e também como potencial alternativo para equipamentos compactos e para secagem. Objetivou-se dimensionar, construir e avaliar um secador em leito fluidizado quanto à sua eficiência no rendimento e tempo de secagem de chips de batata-doce, bem como determinar e modelar a cinética de secagem em diferentes espessuras de fatias e temperaturas de secagem e ajustar o melhor modelo matemático que representa o comportamento dos dados experimentais. Foram determinados os parâmetros de projeto relevantes para o dimensionamento do secador de leito fluidizado, como esfericidade dos chips, velocidade de fluidização mínima, velocidade terminal, velocidade ótima, volume e área do leito, queda de pressão no leito, queda de pressão no distribuidor, velocidade do fluido no orifício e número de orifícios. Após a montagem de todas as peças e equipamentos necessários foi realizada a secagem dos chips. O experimento foi realizado em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial 2x4 (espessuras de fatia x temperatura de secagem), com três repetições. As espessuras de fatia avaliadas foram 0,0012 e 0,0024 m e as temperaturas de secagem 40, 50, 60 e 70 $\pm$ 1 °C. Os modelos matemáticos testados para prever a cinética de secagem foram: Aproximação da Difusão, Dois Termos, Exponencial de Dois Termos, Henderson e Pabis, Henderson e Pabis Modificada, Logarítmico, Midilli, Newton, Page, Thompson, Verma e Wang e Singh. A modelagem matemática foi desenvolvida no software Statistica 12.0. Os ensaios de avaliação do protótipo de secador de leito fluidizado utilizando chips de batata-doce mostrou ser vantajoso e promissor. Dentre os modelos matemáticos analisados, o de Henderson e Pabis modificado foi o que apresentou melhor ajuste estatístico aos dados experimentais da cinética de secagem sob as condições avaliadas. Para secagem de chips de batata-doce, pode-se concluir que este processo é exequível nas temperaturas estudadas, sendo o tempo de secagem inversamente proporcional à temperatura. A espessura das fatias é um fator determinante sobre a redução do tempo de secagem de chips de batata-doce independente da temperatura analisada, sendo que a espessura de 0,0012 m promoveu uma secagem do produto com menor período de tempo. A melhor combinação de variáveis obtida pelo planejamento fatorial para a secagem de chips de batata-doce em secador de leito fluidizado é com a temperatura de 70°C e espessura da fatia de 0,0012 m.

Palavras-chave: *Ipomoea batatas*, secagem convectiva, modelagem matemática, rendimento, tempo de secagem.

ABSTRACT

Drying equipment designed for agricultural products, known as dryers, are built in different models, airflows and operating modes, aiming at process efficiency and maintaining product quality during and after drying. Fluidized bed drying has been highlighted due to the good contact between gas-solid, attractive costs and high rates of particle recirculation, heat and mass transfer, and also as an alternative potential for compact and efficient equipment for drying. The objective was to design, build and evaluate a fluidized bed dryer regarding its efficiency in the yield and drying time of vegetable chips, as well as to determine and model the drying kinetics of sweet potato chips at different slice thicknesses and temperatures. Drying process and fit the best mathematical model that represents the behavior of the experimental data. The relevant design parameters for the fluidized bed dryer sizing were determined, such as chip sphericity, minimum fluidization velocity, terminal velocity, optimal velocity, bed volume and area, bed pressure drop, distributor pressure drop, orifice fluid velocity and number of orifices. After assembling all the necessary parts and equipment, the chips were dried. The experiment was carried out in a completely randomized design (DIC) in a 2x4 factorial scheme (slice thickness x drying temperature), with three replications. The slice thicknesses evaluated were 0.0012 and 0.0024 m and the drying temperatures 40, 50, 60 and 70 ± 1 °C. The mathematical models tested to predict drying kinetics were: Diffusion Approximation, Two-Term, Two-Term Exponential, Henderson and Pabis, Henderson and Modified Pabis, Logarithmic, Midilli, Newton, Page, Thompson and Verma. The mathematical modeling was developed in Statistica 12.0 software. The evaluation tests of the prototype of a fluidized bed dryer for drying sweet potato chips showed that its use is advantageous and promising. Among the mathematical models analyzed, the modified Henderson and Pabis model presented the best statistical fit to the experimental data of drying kinetics under the conditions evaluated. For drying sweet potato chips, it can be concluded that this process is feasible at the temperatures studied, the drying time being inversely proportional to the temperature. The thickness of the slices is a determining factor in reducing the drying time of sweet potato chips regardless of the temperature analyzed, and the thickness of 0.0012 m promoted a drying of the product with a shorter period of time. The best combination of variables obtained by factorial design for drying sweet potato chips in a fluidized bed dryer is with a temperature of 70°C and a slice thickness of 0.0012 m.

Keywords: *Ipomoea batatas*, convective drying, mathematical modeling, yield, drying time.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Secagem	12
2.1.1 Secagem de frutas e hortaliças	13
2.1.2 Métodos de secagem	15
2.1.3 Secagem em leito fluidizado.....	17
2.1.4 Cinética de secagem	19
2.1.5 Transferência de calor.....	21
2.2 Batata-doce	23
2.3 Chips.....	26
2.3 Fluidização.....	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Localização e descrição da área de estudo	31
3.2 Determinação das propriedades físicas e aerodinâmicas da batata-doce.....	31
3.2.1 Volume aparente	31
3.2.2 Massa específica aparente.....	31
3.2.3 Teor de água.....	32
3.2.4 Rendimento	32
3.2.5 Velocidade terminal	32
3.3 Dimensionamento do secador de leito fluidizado	34
3.4 Projeto do secador de leito fluidizado	39
3.4.1 Ventilador centrífugo	40
3.4.2 Motor do ventilador.....	40
3.4.3 Caixa de resistores	41
3.4.4 Suporte do ventilador.....	41
3.4.5 Expansão de ar	42
3.4.6 Distribuidor.....	42
3.4.7 Tubo de acrílico.....	43
3.4.8 Pé giratória.....	43
3.4.9 Cabo da pé giratória	44
3.4.10 Manivela.....	44
3.4.11 Tampa perfurada	45
3.4.12 Relé de estado sólido	46
3.4.13 Inversor e controlador de vazão	46
3.4.14 Controlador de temperatura tipo PID	47

3.4.15 Sensor de temperatura.....	47
3.5 Montagem do secador.....	48
3.6 Seleção e preparo das amostras de chips de batata-doce	49
3.6.1 Recepção e seleção	49
3.6.2 Lavagem	49
3.6.3 Escorrimento.....	49
3.6.4 Descascamento.....	50
3.6.5 Fatiamento	50
3.6.6 Branqueamento.....	51
3.6.7 Pesagem	52
3.6.8 Secagem	52
3.7 Análise estatística	52
3.8 Modelagem matemática da cinética de secagem	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1 Dimensionamento do secador de leito fluidizado	55
4.2 Propriedades físicas e aerodinâmicas dos chips de batata--doce.....	57
4.3 Modelagem matemática da cinética de secagem	60
4.4 Cinética de secagem de chips de batata-doce	69
4.5 Avaliação do tempo de secagem.....	71
5 CONCLUSÃO.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
APÊNDICE A- Memorial de dimensionamento do secador de leito fluidizado	84

1 INTRODUÇÃO

A secagem é uma das alternativas que visa reduzir o desperdício dos alimentos na pós-colheita. Alimentos como hortaliças e frutas podem ser desidratados ao sol, ou por métodos artificiais, reduzindo o teor de água. De acordo com Celestino (2010) o elevado teor de água dos alimentos perecíveis é um fator determinante para a conservação sendo um dos principais causadores da deterioração por microrganismos e alterações nas propriedades químicas e enzimáticas.

O processo de secagem tem como principal objetivo diminuir a disponibilidade de água, inibindo as reações de deterioração do alimento, reduzindo o volume e a massa do produto, facilitando o transporte e aumentando a vida útil desse produto, com perdas mais lentas da qualidade (ARAÚJO et al., 2017). Esse processo de secagem consiste da aplicação de calor e remoção de umidade, nos quais os principais parâmetros que controlam a taxa de secagem dos alimentos são: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, que variam de acordo com o produto e equipamento (SIVAKUMAR et al., 2016).

Os equipamentos de secagem projetados para produtos agrícolas, conhecidos como secadores, são construídos em diferentes modelos, fluxos de ar e forma de operação visando eficiência do processo e a manutenção da qualidade do produto durante e após a secagem (GONELI et al., 2016). Durante o processo de desidratação, as substâncias químicas, físicas e nutricionais sofrem alterações nas propriedades, pois os produtos alimentares são sensíveis ao calor tornando-os mais complexos. Os principais fatores que corroboram para isto, é a temperatura, o tempo e a composição do produto (MANONMANI et al., 2016).

Outra alteração significativa que ocorre nos produtos agrícolas durante a secagem é a redução do seu volume. A perda de água causa mudanças na forma e, normalmente, proporciona decréscimo nas dimensões, sendo uma das principais causas das alterações das propriedades físicas dos produtos agrícolas (BOTELHO et al., 2015).

A secagem pode ser considerada como um método para agregar valor à matéria-prima, desenvolvendo novos produtos e ajudando a suavizar as variações sazonais no consumo de frutas e de hortaliças (MOUNIR et al., 2014; MONTEIRO et al., 2016). Um exemplo é a produção de chips, por ser uma tecnologia simples, de fácil transferência, baixo custo de implantação, e um produto de mercado crescente, sendo inserido em programas de alimentação

por possuírem alto valor nutricional, para suprir necessidades de calorias, vitaminas e minerais na dieta humana (SANTOS et al., 2019).

Diversos processos de secagem são utilizados para transformar frutas e hortaliças desidratadas, dentre os quais os mais comuns são a secagem convectiva, a secagem solar, a secagem a vácuo e a liofilização (MONTEIRO, 2018). A secagem convectiva é um método amplamente utilizado e viabilizado por vários modelos de secadores, para diversas escalas de produção (KARAM et al., 2016). Entretanto, apresenta baixa eficiência energética e longos tempos de secagem, provocando alteração significativa na cor e degradação de nutrientes, além de reduzir a capacidade de reidratação dos produtos (ORIKASA et al., 2014).

Dentre os diversos secadores passíveis de utilização na indústria de alimentos, que utilizam a técnica de secagem por ar quente, destacam-se os secadores de caixas, de câmara, transportadores (de esteira), de leito fluidizado, pneumáticos, rotatórios, “*spray dry*”, secadores natural e secadores de forno (FELLOWS, 2006). Entre eles, a secagem em leito fluidizado vem se destacando devido ao bom contato entre gás-sólido, custos atrativos e altas taxas de recirculação de partículas e de transferência de calor e massa, e também como potencial alternativo para equipamentos compactos e eficientes para secagem (OLIVEIRA, 2012).

Existem diversas vantagens tecnológicas e econômicas no uso do leito fluidizado, podendo ser citadas: o aumento da área de transferência de calor e massa, consequentemente, da taxa de secagem; o aumento da capacidade de processamento; a homogeneidade dos produtos secos em termos do teor de água e temperatura; a eficiência e a facilidade de instrumentação e controle do secador (LINHARES et al., 2014).

Por sua vez, Galvão (2020) utilizou a secagem em leito fluidizado no processo de chips de maçã. Os chips eram inseridos na parte superior do equipamento e na parte inferior o ar quente era injetado promovendo a secagem e fluidização, gerando uma corrente ascendente de ar que deixava as amostras suspensas e o leito de partículas passa a comportar-se como um fluido. A transferência de calor é dependente das condições externas, tais como: temperatura, umidade, vazão do ar, pressão e área de superfície exposta à secagem (GONÇALVES, 2011).

Portanto, a secagem de produtos agrícolas em leito fluidizado pode ser uma alternativa para produção de produtos crocantes sem a utilização de fritura (TRONCOSO e PEDRESCHI, 2009). Também pode ser considerada como uma forma para industrializar hortaliças, produzindo chips saudáveis, livre de conservantes (MONTEIRO, 2018).

Nesse sentido, objetivou-se dimensionar, construir e avaliar um secador em leito fluidizado quanto à sua eficiência no rendimento e tempo de secagem de chips de hortaliças, bem como determinar e modelar a cinética de secagem de chips de batata-doce em diferentes temperaturas de secagem e ajustar o melhor modelo matemático que representa o comportamento dos dados experimentais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Secagem

A secagem ou desidratação é um processo que consiste na diminuição de uma substância volátil de um produto, ou seja, a quantidade de água livre presente no produto por evaporação com transferência de calor e massa, impedindo o desenvolvimento microbiano e inibindo reações químicas e enzimáticas responsáveis por alterar o alimento, permitindo o armazenamento por um período mais longo (GASCÓN et al., 2013; SOUSA, 2015). As reações de deterioração dos alimentos são diretamente proporcionais à atividade de água, sendo esse parâmetro indispensável para a qualidade do alimento (FIB, 2013).

O comportamento dos alimentos durante a desidratação é bastante variado. Com isso, o conteúdo alto de água acelera a velocidade inicial de secagem, os alimentos com porcentagem elevada de amido que tem maior proporção de água apresentam períodos de velocidade constante, enquanto, aqueles ricos em substâncias que absorvem pouca água (sais, açúcares cristalizados e lipídeos) varia bastante (ORDONEZ, 2005).

Sendo o processo comercial mais utilizado para preservar a qualidade dos produtos agrícolas, a secagem é uma prática antiga que deu início com a secagem ao sol, com a finalidade de preservar os excedentes das colheitas para serem consumidas nos períodos de escassez (AGUIRRE, 2002; PALACIN et al., 2005).

Se comparado a outros processos de conservação de alimentos como o tratamento químico, a centrifugação, o enlatamento, a irradiação, o congelamento entre outros, a secagem é o processamento que confere períodos de maior preservação do produto, além de ser o processo mais simples a ser utilizado e também o de menor custo em comparação aos demais citados (SOUSA et al., 2006).

Existem diversos métodos de secagem e sua classificação se dá de acordo com a forma com que o calor será fornecido, o modo de operação que é utilizado, a temperatura e pressão que vão ser utilizados na operação. Tais métodos podem ser classificados em: secagem em bandeja, secagem em leito fluidizado, cabine, túnel, atomizador (spray-dryer), liofilização, entre outros métodos. Esse processo pode acontecer de três formas distintas: condução, convecção e irradiação (RAMALHO, 2018; PARK et al., 2014).

Durante o processo de desidratação realizado pela secagem, as substâncias químicas, físicas e nutricionais sofrem alterações em suas propriedades, visto que os produtos alimentares são sensíveis ao calor, tornando-os mais complexos. Através disso, os principais fatores que corroboram são: a temperatura utilizada no processo, o tempo de exposição e composição do produto (MANONMANI et al., 2016).

Os processos de secagem podem ser realizados de forma contínua com alimentação e descarga simultânea e intermitente, em que o material é alimentado ao secador e descarregado ao final da secagem. A capacidade que o ar possui de retirar água do alimento a ser seco, depende dos principais fatores citados acima, visto que o alimento absorve calor do ar quente, o que fornece a entalpia necessária para carrear a água do alimento e levar o vapor para o ar (RONCHETI, 2014).

O processo de secagem convencional, regido pela transferência de calor resultante da diferença de potencial térmico entre o ar aquecido e o alimento, é usualmente dividido em três partes definidas, de acordo com a evolução das transferências de calor e massa ao longo do processo (PARK et al., 2007).

2.1.1 Secagem de frutas e hortaliças

Frutas e hortaliças desidratadas são comumente encontradas em lojas de produtos naturais e alimentos para esportistas, em algumas lanchonetes, supermercados e academias como opções de consumo, visando melhor qualidade de vida pela maior ingestão de nutrientes, contribuindo para uma alimentação balanceada, principalmente pela praticidade no armazenamento e consumo, sendo uma opção de lanche saudável e de fácil transporte (SANTOS et al., 2016).

Os vegetais, em geral, são considerados alimentos reguladores e protetores do organismo humano, pois contém nutrientes que auxiliam as defesas naturais do corpo. As frutas e hortaliças caracterizam-se como sendo as principais fontes de vitaminas como A, E, C e complexo B, fibras, além de minerais como ferro, cálcio, potássio, magnésio e outros que são indispensáveis ao organismo (BEZERRA, 2007; INCA, 2006).

Esses produtos na condição *in natura* possuem vida útil curta, apresentando perdas elevadas (30-40% nos países em desenvolvimento), quando são usadas técnicas inadequadas de colheita, pós-colheita e armazenamento (JAYARAMAN e GUPTA, 2014). O Brasil é um país

com grande capacidade na produção de frutas e hortaliças e a associação de técnicas de desidratação torna-se interessante para diversificação, disponibilidade, divulgação de tecnologias, propostas diferenciadas de consumo, e redução na perda de produtos perecíveis (BORGES et al., 2020).

A redução das perdas pós-colheita de frutas e hortaliças é uma preocupação para pequenos, médios e grandes agroindustriais. Esses vegetais, podem ser desidratados ao sol, ou por meio de sistemas artificiais para a diminuição do conteúdo de água, processo primordial na conservação de alimentos (GERMANO, 2016). As hortaliças desidratadas podem ser transformadas em pós-alimentícios, os quais são cada vez mais utilizados pela indústria de alimentos pelo baixo custo com embalagem, transporte, estocagem e conservação, aumentando seu valor agregado (BEZERRA, 2007).

As hortaliças desidratadas possuem um apelo comercial devido as suas características organolépticas, sendo a secagem considerada um método que agrega valor a matéria-prima. Após o processo de desidratação, a escassez de água livre presente na estrutura das hortaliças permite seu armazenamento à temperatura ambiente, poupando recursos energéticos (AGUILERA et al., 2003; SINGH e HELDMAN, 2009).

A desidratação de vegetais pode ser realizada por vários métodos industriais, os mais comumente usados são a secagem solar, a secagem por convecção, a secagem a vácuo e a liofilização. Esses métodos de secagem apresentam produtos desidratados com diferentes características físico-químicas e sensoriais para um mesmo produto (matéria-prima), de forma que um método mais adequado pode ser selecionado para cada produto (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

Com isso, para determinar o processo mais vantajoso, vários fatores devem ser considerados como por exemplo: as propriedades físicas, forma e rigidez das matérias-primas, os limites de temperatura e pressão das matérias-primas, as características ideais do produto desidratado, o tempo de secagem e a eficiência energética do processo (CHEN E MUJUMDAR, 2008).

2.1.2 Métodos de secagem

Na atualidade existem vários métodos de secagem, e as suas classificações são baseadas na forma com que o calor é fornecido, o modo de operação, temperatura e pressão. Essa classificação também vai de acordo com o uso do equipamento, podendo ser natural ou

artificial, a frequência de aquecimento contínuo ou intermitente e movimentação dos blocos de produtos estacionário ou contínuo. Os mais comuns são a secagem solar, a secagem por convecção, a secagem a vácuo e a liofilização (RAMALHO, 2018; CORRÊA, 2012; MONTEIRO, 2018).

Primordialmente, durante séculos, a secagem solar foi utilizada como meio de preservação de produtos agrícolas, apresentando algumas vantagens como o baixo custo, sendo caráter não poluente e a utilização de uma fonte de energia renovável, gratuita e abundante. No entanto, muitas limitações acabam dificultando a produção em escala industrial (IMRE, 2014; PRAKASH e KUMAR, 2014).

Dentre essas limitações, as condições ambientais, contaminação por poeira, insetos, pássaros e outros animais, a falta de controle sobre as condições de secagem e as deteriorações químicas, enzimáticas e microbiológicas durante o longo período de secagem, são os principais pontos que dificultam a produção em escala industrial, e além de os produtos não poderem ser expostos em camadas superiores a 6 cm, com revolvimento periódico (JAYARAMAN e GUPTA, 2014; CAVARIANI, 1996).

Na secagem artificial, a fonte térmica pode ser variável sendo caracterizada pelo fato de que o processo é executado com o auxílio de alternativas mecânicas, elétricas ou eletrônicas, juntamente com o fluxo de ar forçado que escoar através da massa. Alguns exemplos de secadores são: secador em bandejas, secador em leito fluidizado, secador em túnel, secador de esteira, liofilizador e secador por atomização (CORRÊA, 2012; CELESTINO, 2010).

A secagem por convecção é o método mais popular para a produção de frutas e vegetais desidratados, e muitos modelos de secador permitem diferentes escalas de produção (KARAM et al., 2016). A secagem por convecção em bandejas tem baixa eficiência energética e um longo tempo de secagem devido a taxa de secagem reduzida. Além disso, causa o encolhimento do produto e reduz a capacidade de reidratação, podendo causar mudanças significativas na degradação de cor e nutrientes (ORIKASA et al., 2014).

A secagem a vácuo é o processo de secagem de alimentos sob pressão abaixo da pressão atmosférica. Este método é adequado para alimentos sensíveis ao calor que podem ser danificados pela exposição a altas temperaturas. Nesse tipo de secagem, conforme a temperatura de saturação da água diminui, a taxa de evaporação aumenta e apresenta vantagens em relação à secagem convectiva, como por exemplo, as temperaturas de processo são mais

baixas e taxas de secagem mais elevadas, proporcionando produtos com melhor qualidade sensorial e nutricional (ALIBAS, 2007; ŠUMIC et al., 2013).

No entanto, o alimento quando exposto a uma temperatura moderada e constante durante longos períodos de secagem, acaba não evitando o encolhimento e acarretando em produtos com baixa porosidade, e isso acaba sendo uma limitação desse método de secagem se caso o objetivo for realizar uma produção de alimentos desidratados crocantes (DISSA et al., 2008; KARAM et al., 2016).

A liofilização é considerada a melhor tecnologia de desidratação para produtos termolábeis. A característica marcante dos produtos liofilizados é que eles possuem uma estrutura altamente porosa, bem preservada, além de reter suas propriedades nutricionais, eles também possuem retenção de aroma, cor e excelente capacidade de reposição de água (RATTI, 2001; OIKONOMOPOULOU et al., 2011). Apesar disso, esse método possui alto valor agregado, com o custo de investimento do equipamento e do processo propriamente dito. Como o produto congela, mantém o vácuo por muito tempo e precisa condensar o vapor em baixas temperaturas, e os custos operacionais estão relacionados ao alto consumo de energia demandada (LATI, 2001; VANALIS et al., 2001).

2.1.3 Secagem em Leito Fluidizado

O secador de leito fluidizado aparece como uma potencial alternativa de equipamento compacto e eficiente para a secagem, pois apresenta uma série de vantagens técnicas e econômicas no uso do leito fluidizado, entre elas: aumento da área de transferência de calor e massa, com consequente aumento da taxa de secagem; aumento da capacidade de processamento de secagem; homogeneidade dos produtos secos em termos do teor de água e temperatura; e eficiência e facilidade de uso do instrumento e controle do secador (LINHARES et al., 2014).

Contudo, este sistema também apresenta algumas limitações, como: queda de pressão elevada, qualidade de fluidização baixa em certas partículas, consumo de energia elevado, arrastamento de partículas finas, possibilidade de pouca uniformidade na qualidade do produto final, erosão dos tubos e dos tanques, desgaste e pulverização de partículas (MUJUMDAR e DEVAHASTIN, 2003).

O leito fluidizado é caracterizado pela secagem e revestimento simultâneos em uma operação unitária, enquanto o ar quente é injetado na base da câmara contendo a amostra, o

revestimento é aspergido por um bocal de atomização também localizado na base do leito, sendo impulsionado para dentro da câmara de secagem pelo fluxo de ar ascendente, deixando o material suspenso contra gravidade (SOARES, 2014; CARTER e BRIENS, 2018).

Os secadores de leito fluidizado são usados extensivamente para a secagem de partículas úmidas e sólidos granulares que podem ser fluidizados. Podem ser também lamas, pastas e suspensões susceptíveis de serem fluidizadas em leitos de sólidos inertes. E ainda, durante o processamento de produtos, quando em pó ou até em aglomerados de várias indústrias, como, química, alimentar, cerâmica, farmacêutica, etc (GONÇALVES, 2011).

As partículas com alto teor de água inicial têm velocidade mínima de fluidização mais alta do que um leito composto de partículas secas. Devido à principal força coesiva exercida na superfície úmida, apenas a camada superior do leito de sólidos é o leito fluidizado. Quando o sólido está muito úmido, a camada inferior pode permanecer estática durante a fase inicial de secagem (MACEDO, 2017).

Em um secador de leito fluidizado, um leito de partículas sólidas oferece resistência ao escoamento do fluido que escoar através dele, e a medida que a vazão do ar aumenta, a força de arrasto exercida pelo fluido nas partículas aumenta. Quando a resistência é igual ao peso das partículas do leito, elas ficam suspensas pelo fluido, a separação das partículas aumenta e o leito torna-se fluidizado (CORRÊA, 2012).

A transferência de calor realizada por esses secadores pode ocorrer por condução, convecção ou radiação, dependendo das condições de operação que serão utilizadas. A contribuição de cada um dos modos de transferência para o coeficiente de transferência de calor depende da classificação da partícula, tipo de escoamento, regimes de fluidização, tipo de distribuidor, temperatura e pressão de operação (GONÇALVES, 2011).

O leito fluidizado tradicional é formado pela passagem do ar do fundo da coluna de partículas sólidas, e em baixas velocidade do ar o leito permanece estático (fixo). Esse leito de partículas está contido em uma placa de distribuição de ar fluidificado, deixando a distribuição do ar uniformemente por todo o leito. A medida que a velocidade do ar de fluidificação aumenta, a queda de pressão no leito aumenta também (MUJUMDAR, 2015).

A uma certa velocidade do ar, quando o fluxo de ar suporta totalmente o peso de todo o leito, acaba se tornando o leito fluidizado. Este estado é denominado condição mínima de fluidização e a velocidade correspondente é denominada velocidade mínima de fluidização. A

queda de pressão no leito é quase igual à da velocidade mínima de fluidização, mesmo que a velocidade do ar aumente ainda mais a partir deste ponto (MUJUMDAR, 2015).

2.1.4 Fluidização

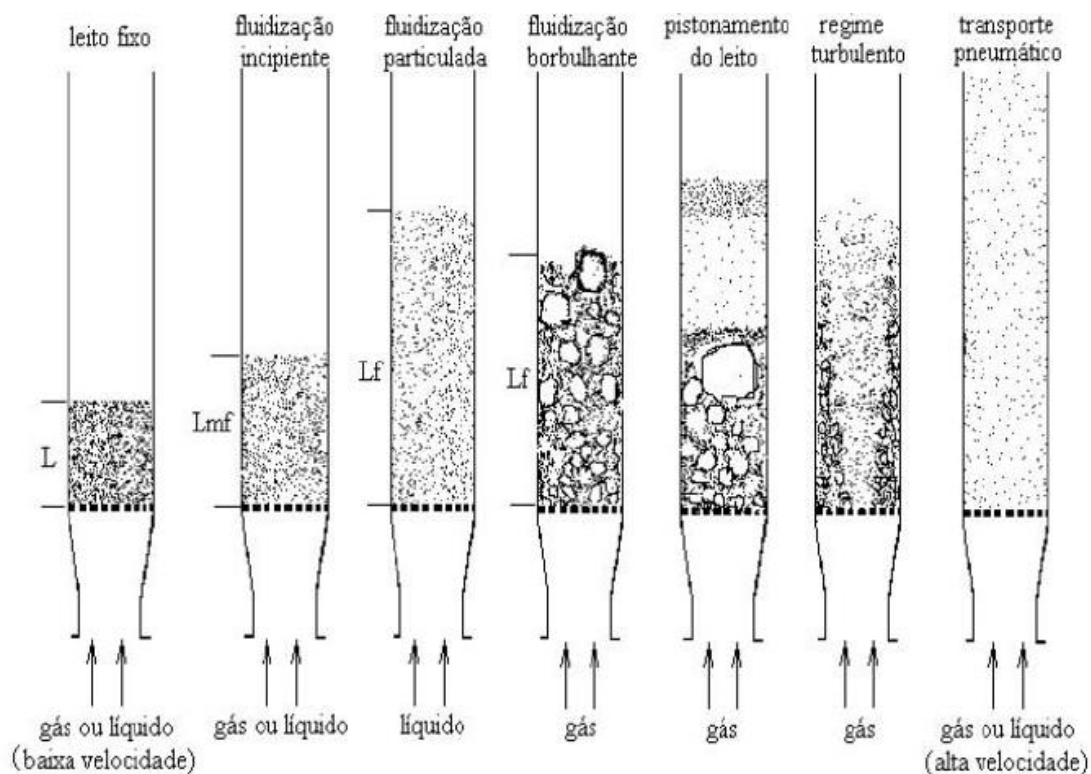
A fluidização é um processo onde um leito de material particulado, contido em uma câmara, assume um comportamento fluídico ao ser atravessado por um fluxo gasoso ou líquido com movimento vertical e ascendente injetado sob o distribuidor. Esse distribuidor é uma superfície perfurada que permite a passagem do fluido enquanto suporta o leito de particulados (FONSECA, 2009).

As principais características da fluidodinâmica do leito fluidizado são: velocidade mínima de fluidização (V_{mf}), a queda de pressão na velocidade mínima de fluidização (Δp_{mf}) e a porosidade média do leito (ϵ_{mf}) (CORRÊA, 2012). A velocidade mínima de fluidização depende dos fatores, como densidade de empacotamento, tamanho e forma dos sólidos a serem secos, viscosidade e velocidade dos meios de fluidização, nesse caso, o ar de secagem (GOSAVI et al., 2018).

O tipo de regime de fluidização é estreitamente influenciado pelas propriedades físicas dos sólidos (tamanho, massa específica e geometria), velocidade e propriedades do gás (massa específica e viscosidade), e geometria e tamanho do leito. Além do mais, outras características como: distribuição de sólidos no leito, fluxo de massa de sólidos e o projeto do distribuidor de gás, também interferem na fluidodinâmica do sistema (ANTONUCCI e BORZONE, 2016; HARTMAN, TRNKA e SVOBODA, 2009; ZIJERVELD et al., 1998).

Esse fenômeno de fluidização pode ser definida em duas partes, sendo elas a fluidização homogênea e a fluidização heterogênea. A fluidização homogênea, também conhecida como particulada, ocorre principalmente quando o fluido é líquido. Neste tipo de fluidização, tem-se a expansão do leito de sólidos devido a um aumento da velocidade do líquido, somente aumentando a agitação das partículas em altas vazões (FREITAS, 2016).

A fluidização heterogênea, denominada também de fluidização agregativa, ocorre quando o fluido é um gás em altas velocidades. Neste caso, o sistema apresenta a formação de duas fases que são chamadas de emulsão e de bolhas. A representação esquemática da Figura 1 mostra os regimes de fluidização, expondo as principais diferenças entre os sistemas de fluidização agregativa e particulada (FREITAS, 2016).

Figura 1. Regimes de fluidização.

Fonte: CORTEZ, 2002.

Segundo Freitas (2016), um fluido passa ascendentemente através de um leito de partículas finas, a uma baixa velocidade, o fluxo apenas atravessa o espaço entre as partículas, sendo que estas permanecem estacionárias, configurando um regime de fluidização denominado leito fixo. Havendo um aumento contínuo da velocidade do fluido, a queda de pressão e o arraste das partículas aumentam iniciando o movimento destas. Com isso o regime passa de leito fixo para leito expandido, entrando na fluidização incipiente.

No regime de fluidização particulado, as partículas movimentam-se individualmente sem formar vazios nem aglomerados de partículas no leito. No regime de fluidização agregativa borbulhante, se apresenta geralmente em sistemas gás-sólido, formando bolhas de gás, as quais aumentam conforme ascensão no leito. Em um leito de maior profundidade e de diâmetro pequeno, as bolhas podem eventualmente tornar-se grandes o suficiente para expandir-se pela coluna ocasionando o pistonamento do leito (FREITAS, 2016).

Ainda segundo Freitas (2016), quando as partículas são muito finas e são submetidas a fluidização com alta vazão de gás, a velocidade terminal dos sólidos é excedida, por

consequência, acarretando no desaparecimento da superfície superior do leito. Com isso, as suspensões de partículas tornam-se mais firmes e as formações de bolhas passam a se apresentar instáveis, demonstrado no regime turbulento. E por último denominado como transporte pneumático, mostra o sistema com o maior aumento da velocidade do fluido, ocasionando o arraste dos sólidos do leito.

2.1.5 Cinética de secagem

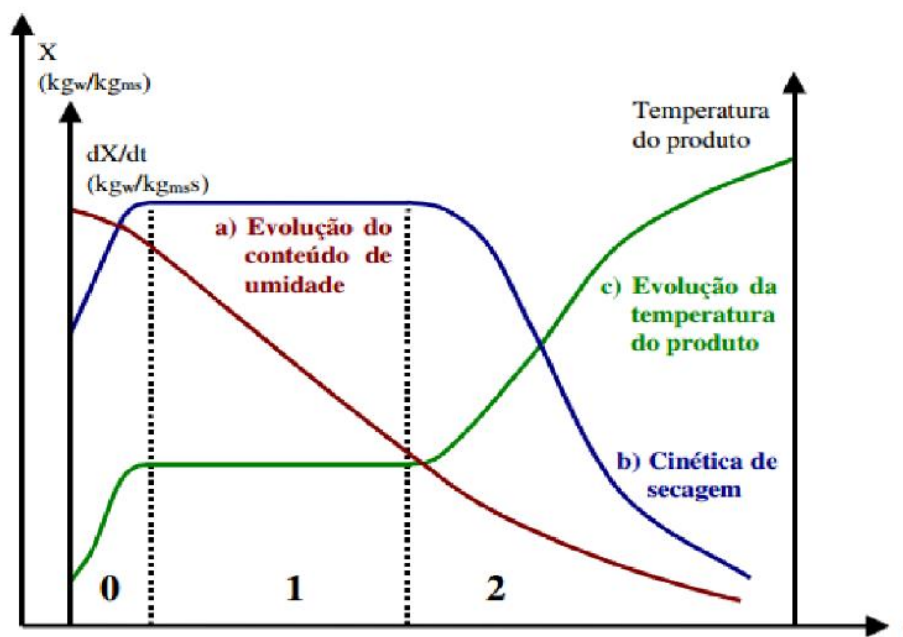
A cinemática tem por finalidade promover o estudo do comportamento do material analisado ao longo do processo, e com isso, estimar o tempo necessário de secagem (CARVALHO, 2014). Os dados experimentais extraídos no processo de secagem, são representados por meio de curvas, de maneira a relacionar o teor de água do produto com o tempo que levou para finalizar o processo (GURGEL, 2014).

A cinética de secagem de alimentos processados está sendo cada vez mais estudada a fim de melhor projetar as plantas de processamento, para obter produtos com reduzido teor de água e manter as propriedades sensoriais (OLIVEIRA et al., 2006). Como exemplo utilizando a modelagem matemática na cinética de secagem, tem-se secagem de peras fatiadas (PARK et al., 2001), variedades de banana (BORGES et al., 2010; SANTOS et al., 2010; COSTA et al., 2018), abacaxi fatiado (MACHADO et al., 2012a), e polpa fatiada de batata doce biofortificada (SOUZA et al., 2019), além de muitos outros trabalhos com produtos perecíveis.

Um entendimento preciso dos parâmetros cinéticos é primordial para prever o tempo de secagem, que representa um dado fundamental para o dimensionamento e a otimização do processo de secagem. Essas taxas de secagem podem ser estabelecidas mediante estudos de transferência de calor e massa, além de mecanismos de migração interna possíveis. Assim, obtêm-se para diversos produtos, uma curva de secagem que apresenta o comportamento do material na parte inicial e final de umidade, da relação de água com a estrutura sólida e o transporte de água no interior do material até a superfície, em uma dada temperatura, proporcionando o conhecimento do processo de secagem (PARK et al., 2014).

Durante a cinética de secagem, a evolução das transferências simultâneas de calor e massa no decorrer da operação é dividida em três períodos, quando são analisadas as curvas de evolução da água, da temperatura do produto e sua taxa de secagem, com as propriedades do ar constantes para o experimento (PARK et al., 2014). A Figura 2, por exemplo, demonstra uma típica curva de secagem.

Figura 2. Curva de secagem.



Fonte: PARK et al., 2014.

Como mostrado na figura acima, a curva (a) que caracteriza a diminuição do teor de água do produto (x) em relação ao tempo (t) ao longo do processo de secagem. A curva (b) retrata a velocidade de secagem do produto, assim dizendo, a variação de umidade do produto por tempo, em relação ao tempo (t). E por último, tem a curva (c) que demonstra a variação da temperatura da amostra (T) com o tempo (t). Em relação aos períodos, o ciclo típico de uma secagem divide-se em três períodos distintos, conforme Park et al. (2014):

- Período 0 – Período de indução: este é a adequação do produto às condições de secagem. Nesse período, o calor fornecido é destinado a aumentar gradativamente a temperatura e a pressão de vapor por água. Este processo continua até que a transferência de calor compense a transferência de massa;

- Período 1 – Período de taxa constante: Há uma grande quantidade de água disponível dentro do produto. A água que evapora dos alimentos é gratuita, ou seja, é facilmente removida. Na superfície sólida, a pressão do vapor d'água é mantida na temperatura do bulbo úmido, de forma que a velocidade do processo fique constante. Esse período termina quando a migração da água de dentro para a superfície não consegue acompanhar a taxa de evaporação da água da superfície;

- Período 2 – Período de taxa de declínio: A quantidade de água na superfície do produto diminui, com isso, a velocidade de migração da água do interior para a superfície do produto é mais lenta, reduzindo assim a transferência de massa. Desta forma, o fluxo de calor não é mais compensado pela transferência de massa, então a velocidade de secagem começa a diminuir. A temperatura da superfície do produto aumenta, que é quando o produto atinge a umidade de equilíbrio em relação ao ar seco, e a secagem termina.

Para obter uma secagem eficiente é necessário que todas as variáveis do equipamento (temperatura, umidade relativa, vazão de ar), assim como do produto (composição do alimento e suas dimensões) estejam controladas, influenciado diretamente na vida de prateleira e qualidade final. Essas variáveis exercem influência sobre a na cinética da secagem, ou seja, na rapidez em que o alimento perde umidade.

2.1.6 Transferência de calor

Durante o processo de secagem, a transferência de calor pode ocorrer via três mecanismos distintos: convecção, condução e radiação. Segundo Incropera (2008), o modelo de transferência de calor por convecção inclui dois mecanismos. Além da transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão), a energia também é transferida por meio do movimento global ou macroscópico do fluido. Esse movimento do fluido está relacionado ao grande número de moléculas que está em movimento coletivo ou como agregados que auxiliam na transferência de calor.

A condução é o processo de transferência de energia de um meio material, não havendo transmissão de material, ou seja, a energia é transmitida de partículas com maior energia para partículas com menor energia no meio. É o processo de transferência de energia através de um meio material, sem transporte de matéria em que a energia térmica se propaga de partícula para partícula do meio, ocorrendo principalmente nos materiais sólidos (INCROPERA, 2008).

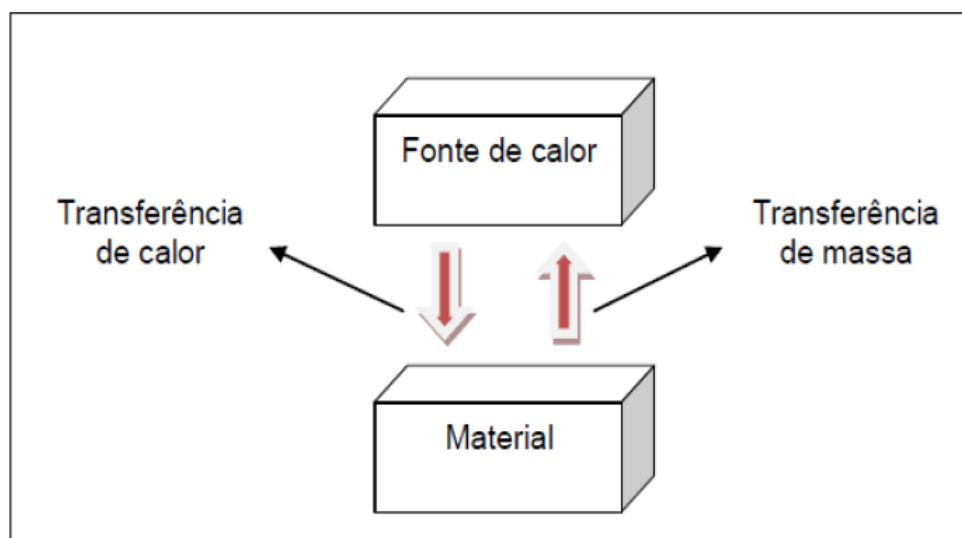
A radiação pode ser usada para aquecer sólidos em volume, reduzindo assim a resistência à transferência de calor. A radiação térmica, também chamada de irradiação, é uma forma de transferência de calor que ocorre por meio de ondas eletromagnéticas. Uma vez que essas ondas podem se propagar no vácuo, não havendo necessidade de contato de transferência de calor entre os objetos (MUJUMDAR, 2015).

Todos os objetos emitem radiação térmica proporcional à sua temperatura, quanto maior a temperatura, maior será o calor irradiado pelo objeto. Devido ao alto investimento e custos operacionais, essa tecnologia pode ser utilizada para secar produtos de alto valor unitário ou para finalmente corrigir a distribuição de umidade em uma pequena quantidade de umidade (MUJUMDAR, 2015).

Na secagem comercial, o mecanismo de transferência mais utilizado é por convecção, que consiste num fluxo de ar aquecido penetrando na amostra (RAMALHO, 2018). De acordo com Meloni (2009), o ar possui funcionalidade dupla, pois leva calor ao alimento permitindo a redução do teor de água, além de ser o veículo de transporte do vapor úmido liberado pelo alimento.

Diante de uma fonte de calor, o sólido está sujeito a transferências de calor e massa conforme mostra a Figura 3 abaixo.

Figura 3. Esquematização da transferência de calor e massa.



Fonte: ALVES, 2012.

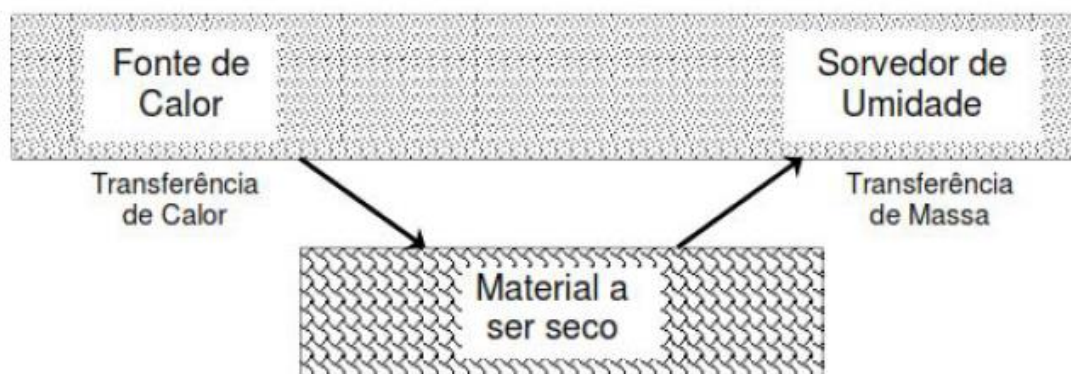
Estudos realizados por Park et al., (2006), quando um sólido está exposto a qualquer tipo de secagem, existe uma ocorrência simultânea de dois processos, tais como:

- Transferência de calor: Essa transferência ocorre do ambiente, provocando a evaporação de umidade superficial do produto, tendo fatores como as condições externas de temperatura e umidade do ar, fluxo e direção do ar, e forma física do produto, sendo elementos pelos quais esta transferência é dependente.

- Transferência de massa: Procede do interior do produto para a superfície, sendo esta acompanhada pela evaporação como consequência do primeiro processo de secagem. O fluxo interno de umidade se dá em função da natureza física do produto, da temperatura e da quantidade de umidade presente.

O objetivo da secagem artificial é remover a umidade dos alimentos até que atinja níveis de umidade inferior a 15% b.u. Conforme mostrado na Figura 4, o processo de transferência de calor e massa ocorre no equipamento, que fornece calor ao produto a fim de provocar a vaporização da água, sendo então absorvido pelo sorvedor de umidade presente no equipamento para caracterizar a transferência de massa (PARK et al., 2014).

Figura 4. Transferência de calor e massa.



Fonte: PARK et al., 2014.

Esse processo ocorre pela movimentação da água no interior do produto, devido ao aquecimento, até atingir a superfície e evaporar, reduzindo a atividade de água do produto e proporcionando as características desejadas ao produto desidratado (PARK et al., 2014).

2.2 Produtos Vegetais

Vegetal é o termo comumente utilizado na botânica para nomear o que pertencem ao *Reino Plantae*. Também conhecidos como hortaliças, englobam tudo que é cultivado em hortas, como verduras, tubérculos, leguminosas e raízes. Os alimentos de origem vegetal possuem propriedades que previnem o aparecimento de doenças e fortalecem o sistema imunológico. São ricos em fibras, minerais, proteínas e água. Assim, conseguem alcalinizar e fortalecer o sangue facilitando a digestão (EMBRAPA, 2022).

Os alimentos de origem vegetal, como o nome indica, são provenientes de tubérculos, raízes, folhas, flores, frutos e caules. Eles são opções saudáveis para a saúde pois contêm vitaminas, proteínas, carboidratos, gorduras e minerais. Os vegetais podem ser consumidos frescos, cozidos ou assados. Aqueles que contêm pigmentos possuem propriedades funcionais de acordo com a coloração que apresentam, como os alimentos vermelhos, que são bons antioxidantes (EMBRAPA, 2022).

Os produtos vegetais possuem a propriedade de realizar trocas de água sob a forma de vapor, com o ambiente que os envolve. Estas trocas podem acontecer por meio do ganho ou da perda de água, fenômenos conhecidos, respectivamente, por adsorção e dessorção, de acordo com as características higroscópicas recíprocas do produto e do ar (CAETANO et al., 2012).

Como exemplo de produto vegetal temos a batata-doce, que pertence à família botânica Convolvulaceae, cuja espécie é dicotiledônea, originária na faixa compreendida entre a América Central e do Sul, conforme evidências arqueológicas, linguísticas e históricas. A extensa variedade de condições climáticas e a fácil adaptabilidade permitiram o seu desenvolvimento em regiões tropicais e de temperaturas moderadas, a exemplo da África, Ásia e América (RAMALHO, 2018). As variedades de batata-doce podem ser diferenciadas pela coloração da casca e da polpa (roxo, salmão, amarelo, creme ou branco), pelas características da casca, formato, conteúdo de açúcares e conteúdo de matéria seca (HORTIBRASIL, 2014).

A cultura apresenta características favoráveis ao cultivo, como boa adaptabilidade edafoclimática, rusticidade e alto potencial produtivo, contudo, o aumento da produção nacional ainda esbarra em questões técnicas, pois seu cultivo é realizado de forma rudimentar, com pouco investimento e baixo emprego de tecnologia. Possuindo uma grande diversidade genética, variando desde a cor como mostra a Figura 5, teor de proteína, produtividade de raízes e ramas, dentre outros aspectos (MARQUES, 2015).

Figura 5. Variedades da batata-doce quanto a coloração.



Fonte: Texugo (2007).

Atualmente, é uma planta de extrema importância socioeconômica, pois pode ser cultivada em quase todos os países, uma vez que consegue fornecer uma série de nutrientes alimentares (OLIVEIRA, 2012). Com isso, a produção mundial de batata-doce no ano de 2020 segundo a FAOSTAT (2021) foi de aproximadamente 89,5 milhões de toneladas, sendo distribuídas em 63% na Ásia, 32% na África, 4% na América e 1% no resto do mundo.

A China é o país que ocupa a primeira posição no ranking de produção de batata-doce no mundo, com aproximadamente 49 milhões de toneladas por ano, logo em seguida tem-se Malawi, República Unida da Tanzânia, Nigéria, e Indonésia, com aproximadamente 6,9, 4,4, 3,9 e 1,9 milhões de toneladas por ano, respectivamente (FAOSTAT, 2021).

Na América, os países com maior produção em 2020 foram: Estados Unidos, Brasil, Argentina, Cuba e Peru com respectivamente 1,56 milhões, 848 mil, 340 mil, 303 mil e 244 mil toneladas. No Brasil, o tubérculo é cultivado em todas as regiões, apresentando uma grande área territorial com 59.481 hectares, além de uma diversidade e ampla quantidade (IBGE, 2021; FAOSTAT, 2021).

Segundo o IBGE (2021) juntamente com a Embrapa (2021), as principais regiões produtoras de batata-doce no Brasil são: Nordeste com aproximadamente 346 mil toneladas (39,5%), em seguida tem a região Sudeste com aproximadamente 270 mil toneladas (31,4%), a região Sul com aproximadamente 211 mil toneladas (26,5%), em seguida vem a região Norte com aproximadamente 13 mil toneladas (2,2%) e Centro-Oeste com 9 mil toneladas (0,4%).

Os pequenos produtores rurais são os principais cultivadores de batata-doce obtendo um rendimento médio de 14,26 t ha⁻¹ em sistemas agrícolas com reduzida utilização de insumos por falta de informações técnicas dificultando o manejo (FERNANDES et al. 2015). O cultivar apresenta certa relevância econômica e sendo uma hortaliça de ampla aceitação popular, pode ser consumida principalmente assada ou cozida e industrializada na forma de doces ou chips (IBGE, 2021; FAOSTAT, 2021; NEIVA et al., 2011).

A batata-doce é considerada um alimento com grande fonte energética e nutricional por seu baixo índice glicêmico, podendo reduzir a sensação de fome e aumentar a saciedade, auxiliando no controle do peso e devido a esse fato, as tuberosas são largamente consumidas por humanos, e serve como alimento para animais tanto das ramas quanto das raízes, frescas ou em silagem, além de servir como matéria prima para a indústria de alimentos (FONTES et al., 2012).

A hortaliça tuberosa é rica em sacarose e carboidratos, tendo pequena quantidade de glicose e frutose (OLIVEIRA, 2013). Devido aos teores de carboidratos, açúcares, sais minerais e vitaminas A, C e do complexo B é uma boa alternativa como fonte de nutrientes e energia. Estes atributos, estando associados à sua versatilidade, possibilitando o seu uso para múltiplos fins (ANDRADE JÚNIOR, 2012).

Entretanto, assim como diversas hortaliças, a batata-doce fresca possui uma vida útil limitada devido a sua fragilidade à deterioração microbiana. A vida de prateleira da batata-doce dura apenas algumas semanas, porque a mesma apresenta grande teor de água. Considerando a faixa de temperatura do crescimento de fungos e bactérias deteriorantes, o armazenamento em baixas temperaturas é ineficaz no controle dos microrganismos presentes na batata-doce (DOMINGOS, 2018). Consequentemente, é de grande importância realizar a conservação do alimento por diminuição de sua atividade de água, sendo o processo de secagem, o método mais utilizado (SANTOS et al., 2012).

O índice de perdas pós-colheita está diretamente ligado à alta umidade dos alimentos e às poucas técnicas de conservação destes produtos, por isso a indústria busca técnicas cada vez mais modernas de conservação para aumentar a vida de prateleira, como a desidratação preservando as características sensoriais e nutricionais do alimento, promovendo nas propriedades macroscópicas da batata-doce a mudança de cor, aparência e textura do produto final, diminuindo a massa, o que garante economia e praticidade no armazenamento (BROCHIER, 2013; FONTES, 2012).

Este alimento possibilita suprir parte das necessidades calóricas, vitamínicas e minerais na dieta humana, apresentando baixo custo de produção e retorno elevado (OLIVEIRA et al., 2013). Nos últimos anos, a cultura ganhou maior repercussão devido a sua utilização em dietas e/ou devido ao aumento no consumo de alimentos mais saudáveis, como por exemplo, os chips (BETEMPS e PINTO, 2015).

2.3 Chips

O termo chips foi originado nos Estados Unidos no ano de 1853, por George Crum, e refere-se a lâminas finas de batata inglesa, submetidas ao processo de fritura em óleo ou gordura. Também podem ser considerados chips, fatias finas de matérias primas amiláceas diversas, submetidas a processos tecnológicos diferenciados como desidratação e extrusão (FERRAREZZO, 2011). No mercado existem alguns produtos deste tipo de tuberosas como mandioca, mandioquinha-salsa e batata-doce, com baixa difusão (FONTES, 2012).

Os chips é um alimento que não se destina ao consumo nas refeições principais, e sim em seus intervalos, como forma de fornecer energia até a próxima refeição. O mercado de chips vem crescendo principalmente nos centros urbanos, devido a sua praticidade (MIN et al. 2010). Sua denominação está relacionada com a espessura das fatias que deve ser em torno de 1 a 4 mm e a baixa atividade de água e umidade que estão diretamente ligados com as características sensoriais do produto como a crocância (TOREZAN, 2005).

Os chips apresentam uma variedade de formas, podendo ser processados a partir de ingredientes frescos ou não, consumidos muitas vezes em quantidade menor que uma refeição regular. Estes são concebidos para serem práticos, portáteis e satisfatórios, sendo menos perecíveis e mais duráveis. São considerados uma opção de produtos saudáveis, pois não sofrem adição de compostos químicos, apenas passam pelo processo de desidratação (GOMES, 2009).

Figura 6. Chips de batata-doce.



Fonte: Globo Rural (2021).

No mercado atualmente encontra-se uma variedade de *snacks* doces, podem ser pedaços de frutas desidratados, que apresentam seus valores concentrados com o processo de desidratação, podendo-se considerar que todos os nutrientes permanecem no produto final, exceto a vitamina C e a água, enquanto que a fibra e o carboidrato são potencializados (PRESEA ALIMENTOS, 2014).

O tipo de chips mais consumido é o de batata inglesa, no entanto, já se encontra no mercado chips com outras matérias-primas, como por exemplo, macaxeira e batata doce. Além disso, também são encontrados chips de frutas, como: maçã, manga e abacaxi. Esses produtos estão em constante avanço, pois são práticos e nutritivos (FONTES, 2009). Campos e Calliari (2016), por exemplo, elaboraram chips de batata doce condimentada e avaliaram suas características físico-químicas e sensoriais, sendo um carboidrato complexo, de lenta absorção e ótima opção para o lanche.

3 MATERIAL E MÉTODOS

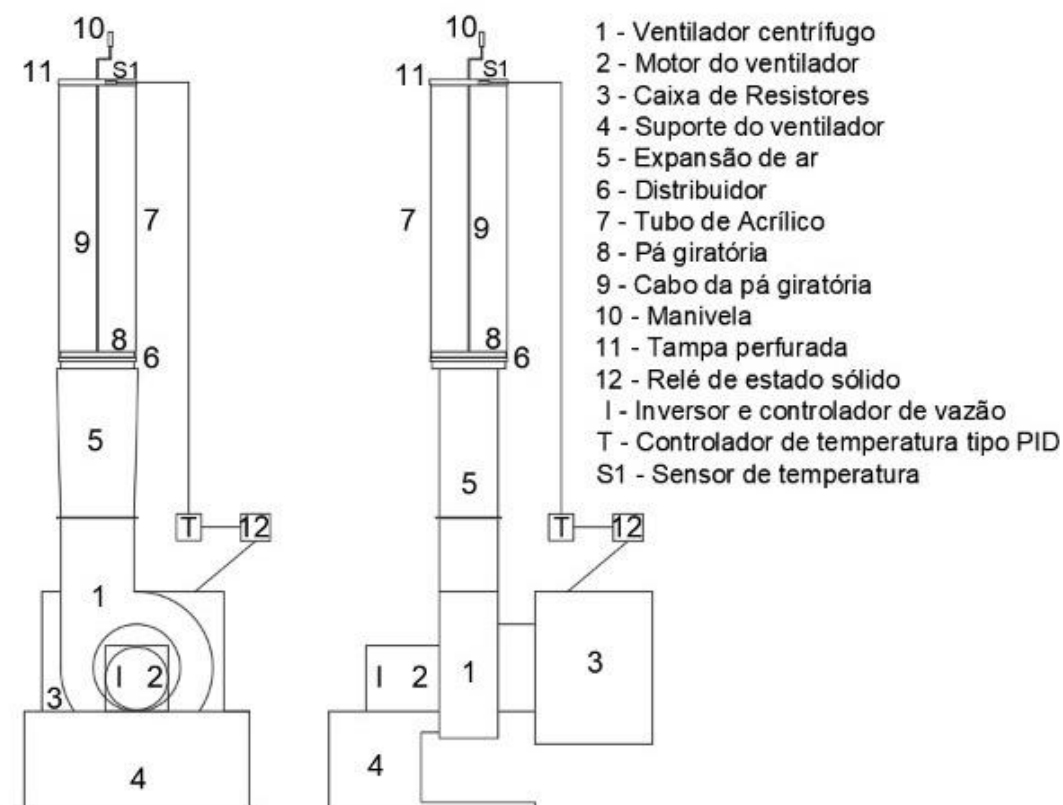
3.1 Localização e descrição da área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido no Laboratório de Secagem e Armazenamento de Produtos Vegetais, do Campus Central – Ciências Exatas e Tecnológicas, sede Anápolis, da Universidade Estadual de Goiás. O laboratório situa-se no Planalto Central Brasileiro, com latitude 16°19' 36" S e longitude: 48° 57' 10" O e altitude de 1.017 m, com clima tropical de savana, megatérmico, do tipo Aw conforme classificação de Köppen (1931), e temperaturas médias variando de 18° a 36 °C.

3.2 Projeto do secador de leito fluidizado

O secador de leito fluidizado foi projetado em um software de CAD, Figura 7. Seus componentes foram selecionados visando proporcionar os parâmetros dimensionados.

Figura 7. Esquema do secador de leito fluidizado e seus componentes.



Fonte: Autor (2021).

3.2.1 Ventilador centrífugo

Ventilador centrífugo: o ventilador centrífugo utilizado no experimento para insuflar ar no secador de leito fluidizado, Figura 8, foi o modelo EC1-TAR, da marca Ventisilva com rotor tipo radial e acoplamento direto. A vazão máxima é de $22 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ a uma pressão de 120 mmCA.

Figura 8. Ventilador centrífugo.



Fonte: Autor (2021).

3.2.2 Motor do ventilador

O motor de indução trifásico, Figura 9, que foi utilizado no ventilador é o modelo 1LA9075-2HA90 da marca Siemens, podendo ser utilizado nas tensões de 220/380/440 V, com potência de 1 cv, frequência máxima de 60 Hz e 3425 rpm com ventilação forçada e podendo utilizar inversor de frequência, com corrente de 3,2; 1,85 e 1,6 A.

Figura 9. Motor de indução trifásico utilizado no ventilador.



Fonte: Autor (2021).

3.2.3 Inversor e controlador de vazão

O inversor para controle de vazão de ar, Figura 10, é da marca Allen Bradley Power Flex 40 de 380 V, podendo variar de 0,4 a 11 kW, e 1,4 a 24 A. Foi utilizado para controlar a rotação do rotor do ventilador, o que proporciona o controle da vazão de ar do secador de leite fluidizado.

Figura 10 - Inversor de frequência.

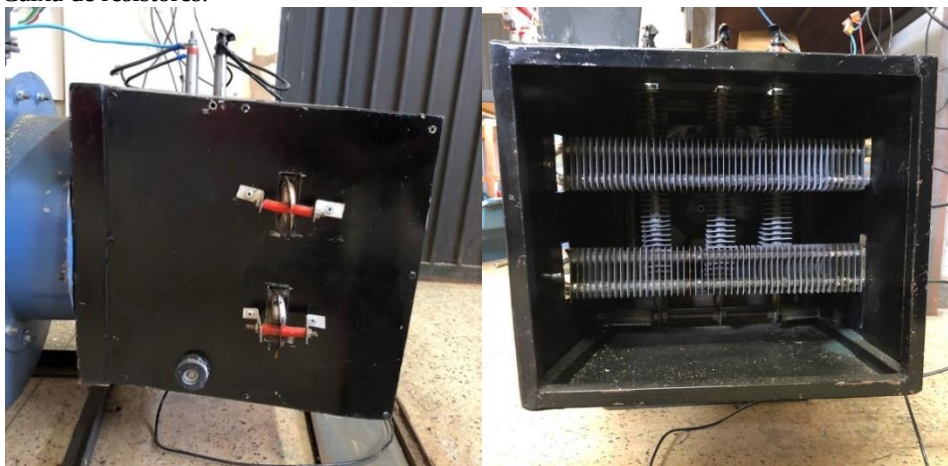


Fonte: Autor (2021).

3.2.4 Caixa de resistores

A caixa de resistores utilizada foi produzida em chapa metálica e possui 0,33 m de comprimento, 0,28 m de largura na conexão com o ventilador e 0,36 m de largura na saída onde tem a entrada do fluxo de ar, e 0,30 m de altura, onde agrupou os cinco resistores elétricos que foram utilizados. Dos cinco resistores, um resistor possui potência de 1000 w com 0,30 m de comprimento, dois resistores de 1500 w com 0,30 m de comprimento e dois resistores de 2000 w com 0,38 m de comprimento, como mostra a Figura 11.

Figura 11. Caixa de resistores.



Fonte: Autor (2021).

3.2.5 Relé de estado sólido

O Relé de estado sólido usado para controlar a temperatura ligando e desligando o resistor (Figura 12), é um dispositivo eletrônico usado no chaveamento de cargas resistivas ou indutivas com inúmeras vantagens: ótima vida útil, alta velocidade de manobra sem ruído elétrico sem faiscamento ou desgaste mecânico; e baixa potência necessária para seu disparo. Trabalha com correntes de 10 A até 100 A, tem uma tensão máxima de 480 Vac, um LED indicador de estado e uma tensão de disparo de 3 a 32 Vdc.

Figura 12- Relé de estado sólido.



Fonte: Autor (2021).

3.2.6 Controlador de temperatura tipo PID

Foi utilizado o controlador de temperatura tipo PID, Figura 13, do modelo REX-C100 da marca RKG, com alimentação de 100-240 V e 50/60 Hz, com leituras em graus Celsius (°C) na faixa de 0 ~1372 °C, com precisão de 0,5%.

Figura 13 - Controlador de temperatura tipo PID.



Fonte: Autor (2021).

3.2.7 Sensor de temperatura

O sensor de temperatura, Figura 14, da marca Omega e modelo Termopar probe cable que foi conectado ao controlador de temperatura. Possui diâmetro de 0,0045 m, com isolamento interno fiberglass, e com leitura de temperatura de 0 – 400 °C.

Figura 14 - Sensor de temperatura usado juntamente com o controlador de temperatura.



Fonte: Autor (2021).

3.2.8 Suporte do ventilador

O suporte para apoiar e fixar o ventilador foi produzido em chapa metálica usado para fixar e dar apoio ao ventilador, deixando-o imóvel na sua utilização, possuindo 0,43 m de comprimento, 0,39 m de largura e 0,46 m de altura (Figura 15).

Figura 15 - Suporte de apoio e fixação do ventilador.



Fonte: Autor (2021).

3.2.9 Expansão de ar

Foi produzido uma expansão de ar em chapa de ferro, com a finalidade de unir o ventilador ao tubo de acrílico, Figura 16, e assim facilitar e direcionar o fluxo de ar para o leito após o funcionamento do ventilador centrífugo, possuindo 0,17 m de comprimento e 0,15 m de largura na conexão com o ventilador para receber o fluxo de ar e 0,20 m de comprimento e 0,20 m de largura na saída do fluxo de ar para o leito (tubo de acrílico), com 0,47 m de altura.

Figura 16 - Expansão de ar.



Fonte: Autor (2021).

3.2.10 Distribuidor

O distribuidor de ar (Figura 17) foi posicionado na parte inferior do secador, na junção da expansão de ar com o tubo de acrílico, com a função de distribuir igualmente o fluxo de ar dentro do secador e foi construído com uma placa perfurada de ferro com 0,20 m de diâmetro.

Figura 17. Distribuidor de ar.



Fonte: Autor (2021).

3.2.11 Tudo de Acrílico

O tubo de acrílico transparente da marca Acrildestac (Figura 18) foi utilizado como o leito do secador, e por ser transparente facilita a visualização das amostras durante o processo de secagem, com dimensões de 0,20 m de diâmetro e 0,50 m de altura.

Figura 18 - Tubo de acrílico (leito).



Fonte: Autor (2021).

3.2.12 Pá giratória

A pá giratória, Figura 19, foi moldada de uma chapa de alumínio com 0,18 m de comprimento e 0,025 m de largura, para facilitar e ajudar no manuseio das amostras durante o processo de secagem. É utilizada no início do processo quando as amostras estão com alto teor de água e ficam se sobrepondo, dificultando a fluidização.

Figura 19 - Pá giratória usada para facilitar o manuseio das amostras.



Fonte: Autor (2021).

3.2.13 Cabo da pá giratória

O cabo da pá giratória usado para conectar a pá com a manivela, Figura 20, é uma barra de ferro que faz a junção da manivela com a pá dentro do secador, com 0,69 m de comprimento e 0,01 m de espessura, ajudando no processo de retirar as amostras sobrepostas.

Figura 20 - Cabo da pá giratória.



Fonte: Autor (2021).

3.2.14 Manivela

A manivela utilizada para manusear a pá durante a secagem foi feita com 0,07 m de comprimento e 0,02 m de diâmetro, e por ficar em cima do secador o fluxo de ar passa por ela, sendo utilizada madeira como material por ser um mau condutor térmico e por isso facilita o manuseio com altas temperaturas (Figura 21).

Figura 21 - Manivela para movimentar a pá.

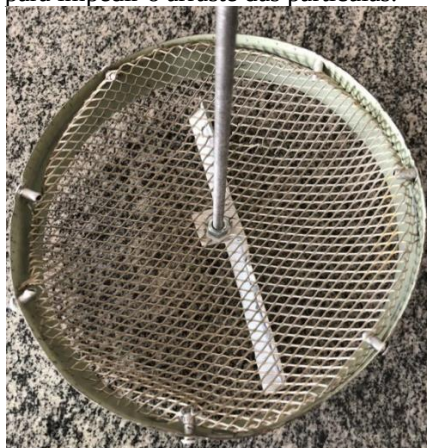


Fonte: Autor (2021).

3.2.15 Tampa perfurada

A tampa perfurada, Figura 22, se encontra na parte superior do secador, sendo colocada com o intuito de impedir o arraste das amostras para fora do tubo de acrílico durante o processo de secagem. Produzida com chapa de ferro com 0,20 m de diâmetro e uma grade perfurada, para o fluxo de ar passar com facilidade.

Figura 22 - Tampa perfurada usada para impedir o arraste das partículas.



Fonte: Autor (2021).

3.3 Dimensionamento do secador de leito fluidizado

O dimensionamento do secador em leito fluidizado foi realizado utilizando as equações necessárias para determinar as grandezas relevantes nesse processo. Foram determinados o raio e a espessura dos chips de batata-doce, que foram utilizados no processo de secagem, com o auxílio de um paquímetro digital de precisão de 0,01mm. Com estes dados foram estimados a área e o volume dos chips, Equações 6 e 7.

$$A_{chips} = 2. \pi. r. (h + r) \quad (6)$$

Em que,

A_{chips} – Área dos chips, m²;

r – Raio dos chips, m; e

h – Espessura dos chips, m.

$$V_{chips} = \pi. r^2. h \quad (7)$$

Em que,

V_{chips} – Volume dos chips, m³;

r – Raio dos chips, m; e

h – Espessura dos chips, m.

A esfericidade dos chips foi estimada levando em consideração a razão da área da esfera pela área dos chips, Equação 8.

$$\emptyset = \frac{A_{esf}}{A_{chips}} \quad (8)$$

Em que,

$\emptyset$ – Esfericidade ou fator de forma da partícula, adimensional;

A_{esf} – Área da esfera, m²; e

A_{chips} – Área dos chips, m².

Sendo que a A_{esf} e $\emptyset$ são estimados pelas Equações 9 e 10, respectivamente.

$$A_{esf} = \pi \cdot d_{eq}^2 \quad (9)$$

Em que,

A_{esf} – Área da esfera, m²;

d_{eq} - Diâmetro equivalente, m.

$$d_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{chips}}{\pi}} \quad (10)$$

Em que,

d_{eq} – Diâmetro equivalente, m;

V_{chips} – Volume dos chips, m³.

Outro parâmetro importante para o dimensionamento do ventilador do secador de leito fluidizado, é a velocidade mínima de fluidização (RHODES, 2008). Esse parâmetro foi estimado por meio da Equação 14. Para tal, foram necessárias as determinações dos parâmetros estimados nas Equações 11, 12 e 13. Foram estimadas, também, a velocidade ótima e a velocidade terminal teórica pelas Equações 15 e 16, respectivamente.

$$A_R = \frac{d_{eq}^3 \cdot (\rho_p - \rho_f)}{\nu_g^2 \cdot \rho_f} \quad (11)$$

Em que,

A_R – Número de Arquimedes, adimensional;

ρ_p – Massa volumétrica da partícula, Kg m⁻³; e

ρ_f – Massa Volumétrica do ar, Kg m⁻³; e

ν_g – Viscosidade cinemática do ar, m² s⁻¹.

$$\varepsilon_{mf} = (0,071 \cdot \phi^{-1})^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Em que,

ε_{mf} – Porosidade do leito nas condições de fluidização mínima, adimensional.

$$\frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} Re_{\rho, mf} + \frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} Re_{\rho, mf}^2 = Ar \quad (13)$$

Em que,

$Re_{\rho, mf}$ – Número de Reynolds, adimensional.

$$v_{mf} = \frac{Re_{\rho, mf} \cdot \mu_f}{\rho_f \cdot d_{eq}} \quad (14)$$

Em que,

v_{mf} – Velocidade Mínima de Fluidização, $m \cdot s^{-1}$;

μ_f – Viscosidade do ar, $Kgm^{-1} \cdot s^{-1}$.

$$V_o = 0,547 \cdot \sqrt{Ar} \cdot \frac{vg}{d_{eq}} \quad (15)$$

Em que,

V_o – Velocidade ótima, $m \cdot s^{-1}$;

$$V_t = \frac{Ar}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{Ar}} \cdot \frac{vg}{d_{eq}} \quad (16)$$

Em que,

V_t – Velocidade terminal teórica, $m \cdot s^{-1}$;

Ar – Número de Arquimedes, adimensional; e

vg – Viscosidade cinemática do ar, $m^2 \cdot s^{-1}$; e

d_{eq} – Diâmetro equivalente, m.

Ao que se refere ao leito, as dimensões utilizadas para o diâmetro e a altura foram fixadas em 0,2 m e 0,5 m respectivamente, em função dos materiais utilizados para confecção do mesmo. Em sequência foi determinado a área e o volume do leito pelas Equações 17 e 18, respectivamente (GONÇALVES, 2011).

O distribuidor (placa perfurada) utilizado no secador é fundamental para que não ocorra a formação de caminhos preferenciais, sendo dimensionado por meio da queda de pressão do fluido no leito (Equação 19), pela perda de carga no distribuidor (Equação 20) e também pela velocidade do fluido no orifício (Equação 22), onde precedentemente foi necessário calcular um novo número de Reynolds para o orifício (Equação 21) estimando o coeficiente necessário para determinar essa velocidade. Por fim, foram determinados o número de orifícios e o número de orifícios no leito, para que tenha uma boa distribuição do fluxo de ar (RHODES, 2008), pelas Equações 23 e 24, respectivamente.

$$A_L = \frac{V_L}{H_{mf}} \quad (17)$$

Em que,

A_L – Área do Leito, m²;

V_L – Volume do Leito, m³; e

H_{mf} – Altura do leito fixo, m.

$$V_L = \pi \cdot \frac{D^2}{2} \cdot H_{mf} \quad (18)$$

Em que,

V_L – Volume do Leito, m³;

D – Diâmetro do Leito, m; e

H_{mf} – Altura do leito fixo, m.

$$\Delta_{pb} = (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot H_{mf} \quad (19)$$

Em que,

Δ_{pb} - Queda de pressão no leito, Pa;

ε_{mf} – Porosidade do leito nas condições de fluidização mínima, adimensional; e

ρ_p – Massa Volumétrica da partícula, Kg m⁻³; e

ρ_f – Massa Volumétrica do ar, Kg m⁻³; e

g – Aceleração gravítica, m s⁻²; e

$$\Delta P_{dist} = 0,3 \cdot \Delta p_b \quad (20)$$

Em que,

ΔP_{dist} - Queda de pressão no distribuidor, Pa;

$$Re_{or} = \frac{D \cdot V_o \cdot \rho_f}{\mu_f} \quad (21)$$

Em que,

Re_{or} – Número de Reynolds para o orifício no distribuidor, adimensional;

D – Diâmetro do Leito, m; e

V_o – Velocidade ótima, $m \cdot s^{-1}$; e

ρ_f – Massa Volumétrica do ar, $Kg \cdot m^{-3}$; e

μ_f – Viscosidade do ar, $Kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$.

$$V_{or} = C_{d,or} \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta P_{dist}}{\rho_f} \right)^{0,5} \quad (22)$$

Em que,

V_{or} – Velocidade do ar no orifício, $m \cdot s^{-1}$;

$C_{d,or}$ – Coeficiente do orifício para número de Reynolds, adimensional; e

ΔP_{dist} - Queda de pressão no distribuidor, Pa; e

ρ_f – Massa Volumétrica do ar, $Kg \cdot m^{-3}$.

$$N_{or} = \frac{V_o \cdot 4}{\pi \cdot V_{or} \cdot d_{or}^2} \quad (23)$$

Em que,

N_{or} – Número de orifícios, nº orifícios m^{-2} ;

V_o – Velocidade ótima, $m \cdot s^{-1}$; e

V_{or} – Velocidade do ar no orifício, $m \cdot s^{-1}$; e

d_{or} – Diâmetro do orifício, m.

$$N_L = N_{or} \cdot A_L \quad (24)$$

Em que,

N_L – Número de orifícios no leito, adimensional;

A_L – Área do Leito, m^2 .

3.4 Montagem do secador

Inicialmente foi utilizado um inversor de frequência da marca Allen Bradley Power Flex 40 de 380 V no motor do ventilador centrífugo da marca Ventisilva com 0,5 CV de potência para controlar a vazão do fluxo de ar.

O ventilador centrífugo utilizado, possui uma entrada e uma saída para o fluxo de ar, nos quais na parte da entrada foi conectada uma caixa de resistores, que era composta por cinco resistências elétricas, sendo uma de 1000 w, duas de 1500 w e duas de 2000 w para realizar o aquecimento do ar. Na saída, criou-se uma expansão de ar para conectar o ventilador centrífugo ao tubo de acrílico (leito), encaixando-se as duas peças com parafuso para fixar melhor e obter uma boa fluidização de forma a não haver escapes.

O tubo de acrílico (leito) utilizado para a construção possui dimensões de 0,50 m de altura e 0,20 m de diâmetro, tendo na parte inferior um distribuidor que estava conectado à expansão de ar e uma tampa na parte superior para impedir que os chips saíssem do leito caso a velocidade utilizada fosse superior à velocidade necessária. Ainda na parte superior do leito, foi conectado um sensor de temperatura que estava ligado a um termostato digital modelo REX-C100 da marca RKG que estava conectado a uma resistência de 1500 w, no qual era feito a regulagem e o controle da temperatura que seria utilizado na secagem através do Relé de estado sólido.

Para facilitar e melhorar a fluidização no início do processo de secagem foi montado uma manivela ligada a um cabo de ferro e uma pá giratória que auxiliavam no processo de secagem e na fluidização dos chips, pois os mesmos, por estarem umedecidos, acabavam sobrepondo-se uns aos outros dificultando a fluidização.

3.5 Determinação das propriedades físicas e aerodinâmicas da batata-doce

3.5.1 Volume Aparente

O volume aparente foi estimado conforme a Equação 1.

$$V_{ap} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (1)$$

Em que,

V_{ap} – Volume aparente, m³;

r – Raio, m; e

h – Altura, m.

3.5.2 Massa específica aparente

A massa específica aparente (ρ_{ap}) das amostras foi determinada pela razão entre a massa da amostra (m_s) e o volume aparente (V_{ap}), conforme mostra a Equação 2.

$$\rho_{ap} = \frac{m_s}{V_{ap}} \quad (2)$$

Em que,

ρ_{ap} – Massa específica aparente, Kg m⁻³;

m_s – Massa da amostra, Kg; e

V_{ap} – Volume aparente, m³.

3.5.3 Teor de água

A umidade das amostras foi determinada seguindo a metodologia do INSTITUTO ADOLFO LUTZ (2008), utilizando-se uma estufa da marca Solab a 105 °C, com circulação de ar forçado até massa constante, em três repetições. A umidade foi estimada pela seguinte equação:

$$U = \frac{100 \cdot N}{P} \quad (3)$$

Em que,

U – Umidade, %b.u.;

N – Perda de peso da amostra, g; e

P – Massa da amostra inicial, g.

3.5.4 Rendimento

O rendimento foi obtido por meio da pesagem dos chips de batata-doce, antes e após a secagem, conforme Equação 4 (PAGANI et al., 2015).

$$R = \left(\frac{P_p}{P_a} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Em que,

R – Rendimento, %;

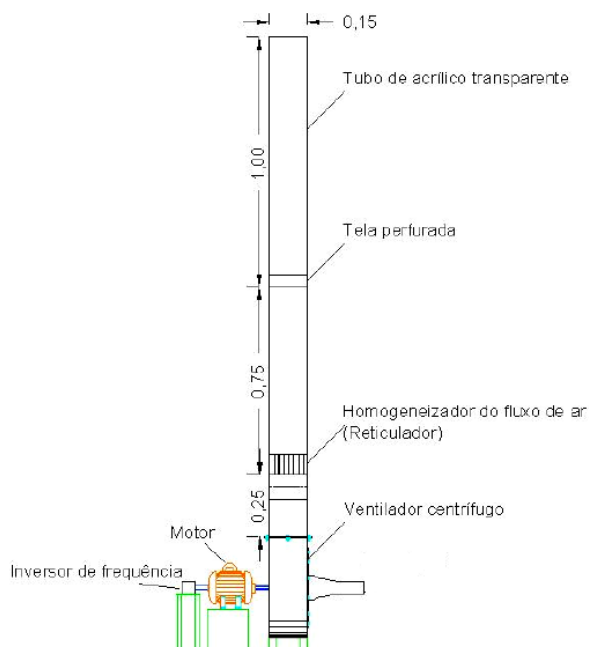
P_p – Peso após a secagem, Kg; e

P_a – Peso antes da secagem, Kg.

3.5.5 Velocidade terminal

Para a determinação da velocidade terminal experimental foi utilizado um equipamento, composto por um ventilador centrífugo, conectado a um tubo de acrílico transparente, com diâmetro de 0,15 m e 2,0 m de comprimento, (Figura 8). A 1,0 m da parte superior foi instalada uma tela perfurada onde o produto foi alocado, e a 1,75 m foi acoplado o reticulador para uniformizar a distribuição da velocidade do ar na seção transversal do tubo. O ventilador foi acionado por um motor trifásico de 0,735 kW e o controle da vazão de ar foi realizado variando as rotações do eixo do ventilador por meio de um inversor de frequência.

Figura 8. Desenho esquemático do equipamento que foi utilizado para a determinação da velocidade terminal experimental dos chips de batata-doce.



Fonte: NUNES (2009).

Na parte central da tela perfurada foram inseridas as amostras de chips de batata-doce úmida. Logo após, o fluxo de ar foi regulado até o início do processo de flutuação do produto. Realizou-se as leituras da velocidade do ar por meio de um anemômetro digital modelo Gm-816 da marca Benetech com 95% de precisão, disposto na parte superior do cilindro de acrílico, determinada em 3 repetições. O coeficiente aerodinâmico de arraste foi estimado por meio da Equação (5), utilizando-se a velocidade terminal experimental e as propriedades do produto e do sistema.

$$V_t = \left[\frac{2 \cdot W \cdot (\rho_p - \rho_f)}{C \cdot \rho_f \cdot \rho_p \cdot A_p} \right]^{0,5} \quad (5)$$

Em que,

V_t = Velocidade terminal, $m \cdot s^{-1}$;

W = Peso da partícula, N; e

ρ_p = Massa específica da partícula, $Kg \cdot m^{-3}$; e

ρ_f = Massa específica do fluido, $Kg \cdot m^{-3}$; e

C = Coeficiente de arraste, adimensional; e

A_p = Área projetada da partícula, normal ao seu movimento em relação ao fluido, m^2 .

3.6 Seleção e preparo das amostras de chips de batata-doce

3.6.1 Recepção e seleção

As batatas-doces, *Ipomoea batatas* L. Lam. com casca na coloração roxa e polpa creme, foram adquiridas no comércio local na cidade de Goiânia-GO no dia anterior aos dias do processo de secagem. A seleção das amostras foi realizada por análise manual e visual, quanto à presença de cortes, furos e microrganismos visando homogeneizar o lote (Figura 25). As amostras foram mantidas sob refrigeração entre 6 e 8 °C no refrigerador até o momento da sua utilização.

Figura 25 - Batatas-doces utilizadas no experimento.



Fonte: Autor (2021).

3.6.2 Lavagem

As batatas-doces passaram por uma lavagem com água corrente limpa para eliminar as sujidades e também o material mais grosseiro aderido à batata proveniente do campo ou das impurezas do comércio local (RAMALHO, 2018).

3.6.3 Escorrimento

Após o procedimento de lavagem, as batatas-doces foram transferidas para uma superfície limpa e seca, em uma armação elevada com superfície perfurada, para servir de

escorredor. Esta etapa é essencial para reduzir o tempo de secagem e a economia de energia utilizada para a retirada da umidade do alimento (CTA, 2008).

3.6.4 Descascamento

O processo de descascamento foi realizado manualmente com o auxílio de um descascador suíço da marca Alston (Figura 26), com cuidado para que o mínimo da polpa de batata-doce seja removido juntamente com a casca, como forma de diagnóstico da condição interna da batata.

Figura 26 - Descascador.



Fonte: Autor (2021).

3.6.5 Fatiamento

Para melhor uniformidade e obter um processo de secagem mais eficiente, as batatas-doces foram cortadas em fatias na forma cilíndrica com o auxílio de um processador de alimentos, modelo Power Chop RI7630 da marca Philips Walita, de 0,0012 e 0,0024 m de espessura de corte, além de utilizar um molde de plástico PVC para homogeneizar o diâmetro das fatias em 0,03 m (Figura 27).

Figura 27 - Processador de alimentos (A) usado para fatiar as batatas-doces e molde de plástico PVC (B).



Fonte: Autor (2021).

3.6.6 Branqueamento

Após passarem pela etapa de fatiamento, as amostras passaram por processo de branqueamento, Figura 28, sendo imersas em um recipiente com água quente (60 °C/60 segundos) e posteriormente, por 60 segundos em um recipiente com água gelada, com o objetivo de ocasionar choque térmico. Logo após, foram imersas em solução de 20 mL de limão para 1000 mL de água por 5 minutos e colocadas em um escurridor para a retirada do excesso da solução, para inativar as enzimas e evitar, assim, o escurecimento imediato (ANDRADE, 2017). Após isso, os chips foram colocados em papel toalha para retirada do excesso de água (Figura 29).

Figura 28 - Chips de batata-doce após o branqueamento.



Fonte: Autor (2021).

3.6.7 Pesagem

Após o branqueamento, as fatias das batatas-doces foram dispostas em três bandejas para determinação do peso inicial por meio de uma balança analítica digital do modelo Tepron Mark500, com capacidade de 500 g e precisão de 0,001 g.

3.6.8 Processo de secagem

No secador de leito fluidizado foram secos 30 chips de batata-doce por repetição. Os chips foram espalhados uniformemente na parte inferior do leito do secador para facilitar o processo de secagem.

As espessuras de fatia avaliadas foram 0,0012 e 0,0024 m e as temperaturas de secagem 40, 50, 60 e 70 ± 1 °C, com três repetições para cada tratamento em um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Durante a secagem, as amostras foram pesadas periodicamente em balança analítica modelo Tepron Mark500 aumentando o intervalo do tempo quando a perda de água era muito baixa, até atingirem teor de água final de 7%. A variável analisada foi o tempo de secagem dos chips de batata-doce para cada espessura de fatia e temperatura de secagem.

3.7 Análise estatística

Neste trabalho foi utilizado o Delineamento Inteiramente Casualizado, em Esquema Fatorial 4x2, sendo os fatores a temperatura de secagem (40, 50, 60 e 70 °C) e a espessura da fatia de batata-doce (0,0012 e 0,0024 m). Foi considerada como variável dependente o tempo de secagem. Os dados foram submetidos à análise de variância ($P \leq 0,05$) utilizando o Software Sisvar 5.6 (FERREIRA, 2014).

3.8 Modelagem matemática da cinética de secagem

Os modelos matemáticos, Tabela 1, foram ajustados aos dados experimentais. A razão de umidade foi estimada pela equação:

(25)

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e}$$

Em que,

RX – razão de teor de água do produto, adimensional;

X – teor de água do produto, decimal b.s.; e

X_i – teor de água inicial do produto, decimal b.s.; e

X_e – teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para prever a cinética de secagem de produtos agrícolas.

Modelo	Equação	Nº
Aproximação da Difusão	$RX = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	(26)
Dois Termos	$RX = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(27)
Exponencial de Dois Termos	$RX = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	(28)
Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-kt)$	(29)
Henderson e Pabis Modificada	$RX = a \exp(-k t) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$	(30)
Logarítmico	$RX = a \exp(-kt) + c$	(31)
Midilli	$RX = \exp(-kt^n) + bt$	(32)
Newton	$RX = \exp(-kt)$	(33)
Page	$RX = \exp(-kt^n)$	(34)
Thompson	$RX = \exp((-a - (a^2 + 4bt)^{0.5}) / 2b)$	(35)
Verma	$RX = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-k_1t)$	(36)
Wang e Singh	$RX = 1 + at + bt^2$	(37)

RU - razão de teor de água do produto, adimensional; t - tempo de secagem, h; k, k₀, k₁ - constantes de secagem, h⁻¹, e a, b, c, n - coeficientes dos modelos.

O melhor modelo de secagem de batata-doce foi selecionado utilizando-se os valores de P, SE e χ^2 , equações 38, 39 e 40.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y - Y_0|}{Y} \quad (38)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (39)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y - Y_0)^2}{GLR} \quad (40)$$

Em que,

Y – valor experimental;

Y0 – valor estimado pelo modelo; e

n – número de observações experimentais; e

GLR – número de graus de liberdade do modelo.

O critério de seleção dos estimadores estatísticos foi o R² próximo de 100%, P<10%, SE e χ^2 próximos de zero (MADAMBA et al., 1996). A modelagem matemática foi desenvolvida no software Statistica 12.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O capítulo que se segue está relacionado com a apresentação de resultados e a respectiva discussão. Numa primeira fase, serão abordados os resultados relacionados ao dimensionamento do secador de leito fluidizado e os parâmetros fundamentais para seu projeto. Em um segundo momento serão apresentadas as propriedades físicas e aerodinâmicas dos chips de batata-doce. E por fim será apresentada a modelagem matemática e cinética de secagem de chips de batata-doce sob influência de diferentes temperaturas de secagem e espessuras de fatia.

4.1 Dimensionamento do secador de leito fluidizado

Para o dimensionamento do secador foi necessária a obtenção de parâmetros de projeto fluidodinâmicos que serviram de base para todo o desenvolvimento deste trabalho. Estes parâmetros são descritos a seguir. Todas as etapas de cálculo do dimensionamento encontram-se no APÊNDICE A.

Para determinar as grandezas relevantes nesse processo foram determinados o raio e a espessura dos chips de batata-doce. O raio utilizado foi de 0,015 m, obtido por meio de um molde de plástico PVC. As espessuras de corte avaliadas no processo de secagem foram de 0,0012 e 0,0024 m, porém utilizou-se a maior espessura (0,0024 m) como parâmetro no dimensionamento do secador. A Tabela 2 que se segue apresenta os valores estimados da área, volume, diâmetro equivalente e esfericidade dos chips.

Tabela 2 - Valores de área, volume, diâmetro equivalente e esfericidade dos chips de batata-doce.

Área (m ²)	Volume (m ³)	Diâmetro equivalente (m)	Esfericidade (adm)
0,00164	1,70x10 ⁻⁶	0,0148	0,419

A velocidade de operação é dependente da velocidade mínima de fluidização, sendo cerca de 2,5 vezes superior a esta (MUJUMDAR et al, 2006). Para valores inferiores à velocidade mínima de fluidização, não ocorre fluidização e o leito mantém-se fixo. No entanto, é também preciso que esta velocidade não seja superior à velocidade terminal para que não ocorra arrastamento de partículas. A velocidade terminal ou máxima de fluidização (V_t) corresponde à velocidade do ar onde as partículas começam a ser arrastadas. Isso acontece quando a força de arraste do ar se iguala ao peso das partículas que se encontram suspensas pelo fluido, este é um fator importante no projeto de leito fluidizado.

Para este projeto obteve-se velocidade mínima de fluidização de $1,06 \text{ m s}^{-1}$, velocidade terminal de $10,82 \text{ m s}^{-1}$ e velocidade ótima de operação de $3,57 \text{ m s}^{-1}$, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de velocidade mínima de fluidização, velocidade terminal e ótima.

Velocidade mínima (m s^{-1})	Velocidade ótima (m s^{-1})	Velocidade terminal (m s^{-1})
1,06	3,57	10,82

Ao que se referem ao leito, as dimensões utilizadas para o diâmetro (D) e a altura do leito fixo (H_{mf}) foram fixadas em 0,2 m e 0,5 m respectivamente, em função dos materiais utilizados para confecção do mesmo. Dessa forma, o volume e a área do leito foram de $0,031 \text{ m}^3$ e $0,063 \text{ m}^2$ respectivamente.

O cálculo da queda de pressão (Δ_{pb}) não só permite saber o valor da perda de carga ao longo do leito, mas também é necessário para o dimensionamento do distribuidor. Para realizar os cálculos de queda de pressão no leito utilizou-se a porosidade do leito nas condições de fluidização mínima (ϵ_{mf}) de 0,63; a massa volúmica da partícula (ρ_p) de $3184,71 \text{ Kg m}^{-3}$, a massa volúmica do ar (ρ_f) de $1,104 \text{ Kg m}^{-3}$, a aceleração gravítica (g) de $9,8 \text{ m s}^{-2}$ e a altura do leito fixo (H_{mf}) de 0,5 m, e obteve-se o valor de 6970,47 Pa.

Com o conhecimento da queda de distribuição na coluna, o valor da queda de pressão no distribuidor é cerca de 30% da primeira, ou seja 2091,14 Pa, Tabela 4.

Tabela 4 - Volume, área, queda de pressão e queda de pressão no distribuidor do protótipo de secador de leito fluidizado.

Volume (m^3)	Área (m^2)	Queda de pressão no leito (Pa)	Queda de pressão no distribuidor (Pa)
0,031	0,063	6970,47	2091,14

A velocidade do ar através dos orifícios foi de $33,92 \text{ m s}^{-1}$ (Tabela 6). Com a velocidade do fluido no orifício calculada, mais o diâmetro do orifício (0,005 m) e a velocidade do fluido na fluidização obteve-se número de orifícios por unidade de área de distribuidor de 4927,76 orifícios m^{-2} . Com o valor da área de seção reta do distribuidor, foi possível calcular o número de orifícios total no leito, multiplicando-se por o número de orifícios por unidade de área de distribuidor, onde se obteve valor de 310 orifícios (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores de velocidade do fluido no orifício e o número de orifícios no leito.

Velocidade do fluido no orifício (m s^{-1})	Número de orifícios no leito
36,93	310

Após o dimensionamento de todas as peças e equipamentos necessários foi realizada a montagem dos componentes do sistema de secador de leito fluidizado como mostra a Figura 30.

Figura 29 - Secador em leito fluidizado.



Fonte: Autor (2021).

4.2 Propriedades físicas e aerodinâmicas dos chips de batata-doce

As propriedades físicas dos chips de batata-doce *in natura* e após o processo de secagem estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Volume aparente, massa específica aparente e teor de água de batata-doce *in natura* e após a secagem em secador de leito fluidizado.

	Volume aparente (cm ³)	Massa específica aparente (g m ⁻³)	Teor de água (%)
<i>In natura</i>	0,85	1,19	77,29
Após a secagem	0,55	0,63	7,00

Verifica-se na Tabela 6 a redução do volume aparente dos chips de batata-doce de 0,30 cm³, ou seja, redução de 35% do volume aparente com o processo de secagem.

Com relação a massa específica aparente das fatias de batata-doce, verificou-se valor inicial de 1,19 g cm⁻³ para as amostras *in natura*, com redução para 0,63 g cm⁻³ após a secagem, representando decréscimo de 66,84%. A diminuição da massa específica aparente com a

secagem demonstra que este processo é capaz de produzir chips de batata-doce altamente porosos, característica desejável que contribui positivamente para os atributos sensoriais e de textura (crocância).

Domingos (2018), em estudo sobre as propriedades físico-químicas de chips de batatas-doce desidratados por micro-ondas a vácuo, determinou valores de massa específica aparente de $1,077 \pm 0,007 \text{ g cm}^{-3}$ para as amostras *in natura*, sendo esse valor reduzido para $0,456 \pm 0,119 \text{ g cm}^{-3}$ após a secagem. Esses valores se encontram próximos dos verificados neste estudo, demonstrando comportamento característico para batata-doce em relação a massa específica aparente *in natura* e após a secagem.

A batata-doce apresentou um alto teor de água, cerca de 77,29%. Este valor foi superior aos verificados por Fontes et al. (2012), de 64,37%, e por Araújo et al. (2016), de 69,23%. Carmona (2015) avaliando o teor de água de 13 variedades de batata-doce, encontrou resultados variando de 61,02% a 77,97%, o que significa que o resultado referente ao teor de água da batata-doce utilizada para obtenção dos chips deste estudo, se encontra dentro do esperado.

Vale ressaltar que a batata-doce assim como outros tubérculos e raízes possui alto teor de água, e as diferenças na composição química das cultivares pode ser atribuída a diferença genética, dependendo de fatores como cultivar, grau de maturidade, localização, clima, práticas de cultivo, entre outros (ROSE e VASANTHAKAALAM, 2011; SUN et al., 2014). Assim, os resultados obtidos são importantes para caracterizar a batata-doce em estudo e avaliar as condições de tempo e temperatura que devem ser empregadas no processo de secagem para a obtenção de chips.

As amostras de chips de batata-doce secas apresentaram umidade final média de 7,0% b.u que foi pré-determinada antes do processo de secagem conforme Gonçalves (2011). O produto resultante da secagem das amostras de batata-doce apresenta valores de umidade em conformidade com a RDC nº 272, de 22 de setembro de 2005 (ANVISA), que estabelece um teor máximo de água (em base úmida) de 12% para produtos vegetais secos ou desidratados. Além disso, o baixo valor de atividade de água encontrado para os chips de batata doce favorece a estabilidade do produto frente à deterioração, pois são desaceleradas as atividades metabólicas.

Com relação ao rendimento dos chips de batata-doce com o processo de secagem, não foi verificada tendência definida para esse parâmetro em relação às temperaturas analisadas, bem como com as espessuras de fatia avaliadas, Tabela 7. O maior valor de rendimento, de

27,21%, foi encontrado para a temperatura de 70 °C e espessura de 0,0012 m. Para a espessura de 0,0024 m, a temperatura que proporcionou maior rendimento aos chips de batata-doce foi a de 60 °C, com valor de 24,97%. A secagem com temperatura de 40 e 60 °C com espessura de fatia de chips de 0,0012 m foram as que apresentaram menores valores de rendimento em batata-doce.

Araújo et al. (2016), avaliando a qualidade de farinha de batata-doce em função da temperatura de secagem, verificaram que farinhas processadas na temperatura de 40 °C apresentaram um maior rendimento com 25,25%, seguida de 24,11% e 18,43%, para as farinhas produzidas nas temperaturas de 50 e 60 °C, respectivamente. Jaime et al. (2020) encontraram rendimento de 9,66 e 15,31% para batata-doce biofortificada.

Tabela 7 - Valores de rendimento para o processo de secagem de chips de batata-doce sob condições de temperatura do ar de secagem de 70, 60, 50 e 40°C e espessura da fatia de 0,0012 e 0,0024 m.

Espessura (m)	Temperatura de secagem (°C)	Rendimento (%)
0,0012	40	18,36
	50	22,68
	60	21,04
	70	27,21
0,0024	40	21,92
	50	23,86
	60	24,97
	70	21,60

Por meio dos testes experimentais, obteve-se a velocidade terminal experimental de 2,76 e 4,30 m s⁻¹ para as fatias com espessuras de 0,0012 e 0,0024 m respectivamente (Tabela 8). Observa-se dessa forma que o aumento na espessura das fatias de batata-doce resultou em aumento na velocidade terminal, cerca de 55% para as mesmas. O inverso é verificado em relação ao coeficiente de arrasto, onde a espessura de 0,0012 m ocasionou em maior valor (0,157) para esse parâmetro, bem como na espessura de 0,0024 m obteve-se menor coeficiente de arrasto, 0,097.

Tabela 8 - Valores de velocidade terminal experimental e coeficiente de arrasto para chips de batata-doce com espessuras de 0,0012 e 0,0024m.

Espessura (m)	Velocidade terminal (m s ⁻¹)	Coeficiente de arrasto (adm)
0,0012	2,76	0,157
0,0024	4,30	0,097

4.3 Modelagem matemática da cinética de secagem

Na Tabela 9 é mostrado o resumo dos ajustes dos modelos matemáticos por meio de regressão não linear aos dados experimentais de secagem de chips de batata-doce para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60 e 70 °C e espessuras de 0,0012 e 0,0024 m.

Em relação aos coeficientes de determinação (R^2), nota-se que para todos os dados a equação apresentou valores acima de 99,59% o que segundo Madamba et al. (1996) ratifica um bom ajuste dos modelos para representação do fenômeno de secagem. Entretanto, a utilização do coeficiente de determinação como único critério de avaliação para a seleção dos modelos de secagem não constitui um bom parâmetro, sendo necessária a análise conjunta de outros parâmetros estatísticos (MOHAPATRA e RAO, 2005). Ainda assim, o modelo de Henderson e Pabis Modificada se firma com o melhor ajuste aos dados, apresentando menores valores de erro relativo (<10), erro médio estimado e valor de qui-quadrado mais próximos de zero conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Valores dos coeficientes de determinação (R^2), do Erro relativo (P), do erro médio estimado (SE) e do teste do qui-quadrado (X^2) estimados para chips de batata-doce obtidos na secagem sob temperaturas de 40 °C à 70 °C e espessura de 0,0012 m e 0,0024m para o melhor modelo matemático.

Espessura (m)	Temperatura (°C)	Modelos Matemáticos	R2 (decimal)	P (%)	Se (decimal)	X2 (decimal)
0,0012	40	Henderson e Pabis				
		Modificada	0,9974	9,26	0,0287	0,0008
0,0012	50	Henderson e Pabis				
		Modificada	0,9983	6,41	0,0296	0,0009
0,0012	60	Henderson e Pabis				
		Modificada	0,9982	7,36	0,0283	0,0008
0,0012	70	Henderson e Pabis				
		Modificada	0,9984	7,57	0,0235	0,0006
0,0024	40	Henderson e Pabis				
		Modificada	0,9959	9,88	0,062	0,0037
0,0024	50	Henderson e Pabis				
		Modificada	0,9989	3,17	0,0274	0,0007
0,0024	60	Henderson e Pabis				
		Modificada	0,9973	8,85	0,0403	0,0016
0,0024	70	Henderson e Pabis				
		Modificada	0,9978	7,27	0,0316	0,001

Para predição da cinética de secagem dos chips de batata-doce sob todas as condição de temperatura de secagem e espessuras, o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Henderson e Pabis Modificada, apresentando o melhor valor de coeficiente de

determinação (R^2) na temperatura de secagem de 50 °C e espessura de 0,0024 m, e o menor valor encontrado para esse coeficiente foi na temperatura de secagem de 40 °C e espessura de 0,0024 m, mostrando que todos se ajustaram bem ao modelo com valores bem próximos a 100%.

De acordo com Mohapatra e Rao (2005), valores do erro médio relativo inferiores a 10% indica uma representação adequada do fenômeno de secagem, fato esse observado para todos os tratamentos, variando entre 3,17 e 9,88 nas temperaturas de 50 e 40 °C respectivamente, com espessura de 0,0024 m, apresentando bons ajustes aos dados experimentais. Para os outros valores dos coeficientes avaliados como erro médio estimado (SE) e do teste do qui-quadrado (X^2), notou-se que todos eles se aproximaram de zero, com o maior valor encontrado de 0,06 e o menor de 0,0006.

Os resultados diferem dos obtidos por Barros (2018) que avaliaram as características da secagem convectiva de batata-doce a diferentes níveis de temperatura e concluíram que os modelos Logarítmico e de Midilli foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais, apresentando menores valores de erro médio relativo quando comparado aos demais modelos.

Para Souza (2020), o modelo de Wang e Singh foi selecionado para representar a cinética de secagem da polpa da batata-doce biofortificada, por apresentar melhor ajuste a maioria das condições de secagem, o que se opõe ao presente trabalho, visto que para este estudo o modelo de Wang e Singh foi o que apresentou menores valores de coeficiente de determinação, além de erro relativo acima de 10%.

No entanto, Corrêa et al. (2007) também observaram baixos valores do erro médio estimado para o modelo de Henderson e Pabis Modificada durante a modelagem da secagem do feijão vermelho, assim como Reis (2011) avaliando diferentes condições de processo sobre parâmetros de qualidade e cinética de secagem de yacon observou-se que o maior valor de R^2 foi obtido para esse modelo, corroborando com os resultados deste estudo.

Outros trabalhos também relatam a adequação do modelo de Henderson e Pabis Modificada à cinética de secagem de produtos vegetais, apresentando bons ajustes aos dados experimentais, como para feijão-caupi (MORAIS et al., 2013), sementes de pinhão-manso (RESENDE et al., 2011), folhas de sálvia (RADÜNZ et al., 2010) e frutos de café (ALVES et al., 2013).

Em linhas gerais, todos os resultados da modelagem matemática da cinética de secagem se encontra no Apêndice B, demonstrando que grande parte dos modelos empregados no presente estudo apresentaram altos coeficientes de determinação ($>98\%$), o que são valores considerados aceitáveis para descrever o fenômeno de secagem. Todavia quando se considera o critério de erro médio relativo (P) inferior a 10%, para um ajuste aceitável, os resultados obtidos demonstram que apenas o modelo de Henderson e Pabis Modificado apresentou ajuste adequado para descrever o processo de secagem de chips de batata-doce sob todas as condições de secagem avaliadas. Para a temperatura de secagem de 50 °C e espessura de 0,0024 m, os modelos da Aproximação da Difusão, Dois termos, Exponencial de Dois Termos e de Verma também apresentaram bons ajustes aos dados experimentais, porém o modelo de Henderson e Pabis Modificado apresentou ajuste superior.

Com relação aos coeficientes do modelo Henderson e Pabis Modificada (Tabela 17), ajustados aos dados observados da cinética de secagem de chips de batata-doce para as diferentes temperaturas do ar de secagem e diferentes espessuras, observou-se tendência definida na variação da magnitude dos valores apenas do parâmetro “k” em relação a temperatura do ar de secagem para a espessura de 0,0012 m. Com a elevação da temperatura do ar de secagem, houve aumento nos valores de k. Estes resultados corroboram com os apresentados por Botelho et al. (2011) para fatias de cenoura, Moscon et al. (2017) para grãos de quinoa, Goneli et al. (2014) para folhas de aroeira, Oliveira et al. (2012) para grãos de milho e Sousa et al. (2011) para grãos de nabo forrageiro, onde os valores de k aumentaram com a elevação da temperatura do ar de secagem.

Para os parâmetros “a”, “b” e “c”, não houve tendência observada. As variações dos parâmetros “a”, “b” e “c” se devem mais a ajustes matemáticos do que relacionados a algum fenômeno de secagem, uma vez que o modelo de Henderson e Pabis Modificada é semiempírico.

A constante de secagem (k), que representa as condições externas de secagem, pode ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura, e está relacionada com a difusividade efetiva no processo de secagem, no período decrescente, e à difusão líquida que controla o processo (BABALIS e BELESSIOTIS, 2004). Portanto, o parâmetro “k” tende a aumentar com o aquecimento, visto que maiores temperaturas acarretam maiores taxas de secagem, chegando ao teor de água de equilíbrio em menor tempo de exposição do produto ao ar de secagem (CORRÊA et al. 2010).

Tabela 10 - Valores dos coeficientes do modelo de Henderson e Pabis Modificada para a cinética de secagem chips de batata-doce nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C e espessuras de espessura de 0,0012 e 0,0024 m.

Espessura	°C	a	b	c	k	k0	k1
0,0012	40	-2,39200	1,71687	1,65039	0,08384	0,05561	0,05339
0,0012	50	-3,39197	4,24382	0,13617	0,11366	0,08835	0,00473
0,0012	60	-5,72132	6,60246	0,11345	0,16490	0,13773	0,00486
0,0012	70	-5,11521	6,01345	0,09880	0,18709	0,16040	0,00662
0,0024	40	0,856116	0,193254	0,000305	0,016976	0,017720	-0,040539
0,0024	50	-0,059111	0,886925	0,172185	0,040631	0,029857	-0,000637
0,0024	60	-0,167037	1,011330	0,155707	0,07261	0,048796	0,004687
0,0024	70	-4,5923	0,04897	5,53417	0,12486	-0,00637	0,10149

4.4 Cinética de secagem de chips de batata-doce

Na Figura 31, são apresentadas, para as condições de secagem estudadas, comparações entre os valores observados e os estimados, pelo modelo de Henderson e Pabis Modificada, da razão de umidade dos chips de batata-doce durante o período de secagem em função da temperatura para a espessura de 0,0012 m. As curvas de secagem permitem predizer o momento do processo em que se atinge o teor de água desejado e desta forma é possível obter um produto de boa qualidade (SANTOS et al., 2012).

Por meio das curvas de secagem nota-se que as diferentes temperaturas influenciaram na perda de água do material, sendo que a secagem ocorreu em maior celeridade para temperaturas mais altas. Além disso, observa-se que a maior taxa de secagem ocorre no início do processo, elucidada pela maior inclinação das curvas. Segundo Fiorentin et al. (2010) o aumento da temperatura de secagem acelera o processo, promovendo a redução do teor de água mais rapidamente no início da secagem que, conseqüentemente, ocasiona menor tempo gasto no processo.

A redução da umidade mais significativa no início da secagem para todas as temperaturas e, posterior diminuição mais lenta com o aumento do tempo ocorre em função da ligação mais forte entre as moléculas de água e os demais constituintes do vegetal ao longo da secagem, o que torna a remoção da água mais difícil.

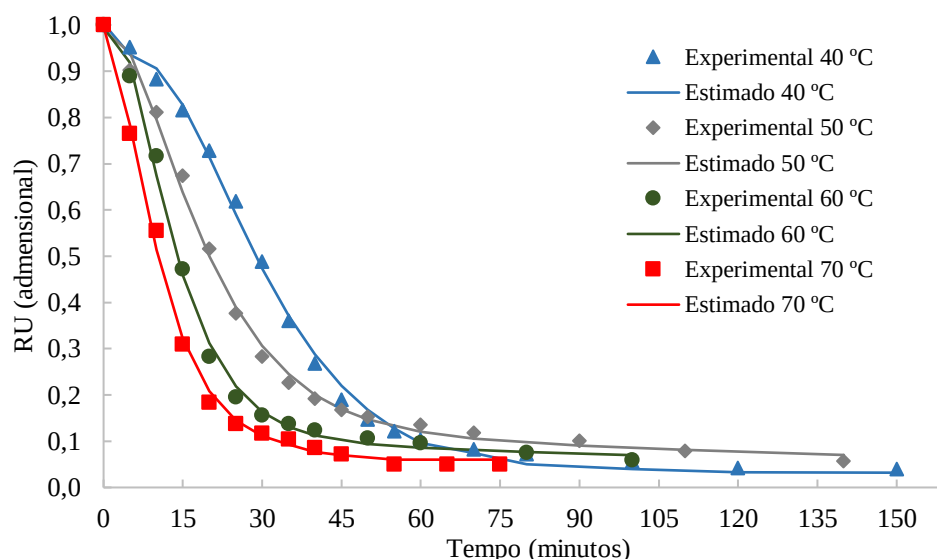
Os chips de batata-doce de espessura de 0,0012 m apresentaram tempo de secagem de aproximadamente 150, 140, 100 e 75 minutos (2,5; 2,3; 1,6 e 1,25 horas) respectivamente para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, apresentando assim tempo de secagem inversamente proporcional ao aumento da temperatura do ar de secagem. Este fato é explicado por Silva et al. (2017) que afirmam que o acréscimo da temperatura do ar de secagem proporciona maior atuação dos mecanismos difusivos no interior do vegetal, obtendo-se maior quantidade de sítios ativos na superfície de evaporação, proporcionando uma maior taxa de remoção de água do produto e diminuição do tempo de secagem.

Este comportamento era esperado e foi registrado por outros autores na secagem de fatias de abóbora (BORGES et al., 2008); massa fibrosa de mandioca (CASTIGLIONI et al., 2013) fatias de limão (WANG et al., 2018) casca e polpa da banana verde (GONÇALVES, 2017) em que elevando a temperatura obtém-se maiores taxas de vaporização da água em menor tempo de secagem.

Para secagem de polpa de batata-doce biofortificada, Souza (2020) obteve valores aproximados de 6,6; 6,2; 4,7 e 2,6 horas para nas temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C respectivamente. De igual forma, Sbrunhera (2016) avaliando o processo de secagem de batata-doce em diferentes temperaturas (50, 60 e 70°C), constataram que a umidade de equilíbrio do produto foi atingida aos 440 minutos (7,33 horas) para a secagem a 70 °C, 420 minutos (7 horas) para 60 °C e 460 minutos (7,6) para 50 °C. O autor esclarece ainda que comportamento atípico na curva de secagem a 70 °C pode ser associado a uma rápida desidratação da superfície do alimento, dificultando assim a difusão da umidade interna, resultando em um tempo de secagem e uma razão de umidade maior que os verificados a 60 °C.

Evidencia-se também o bom ajuste do modelo de Henderson e Pabis Modificado aos dados observados (Figura 31), pela correspondência entre os valores experimentais e estimados para todas as temperaturas, reforçando assim o ajuste satisfatório do modelo na predição dos dados de secagem de chips de batata-doce.

Figura 30 - Cinética de secagem de chip de batata-doce segundo o modelo de Henderson e Pabis Modificada nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C e espessura de 0,0012 m.



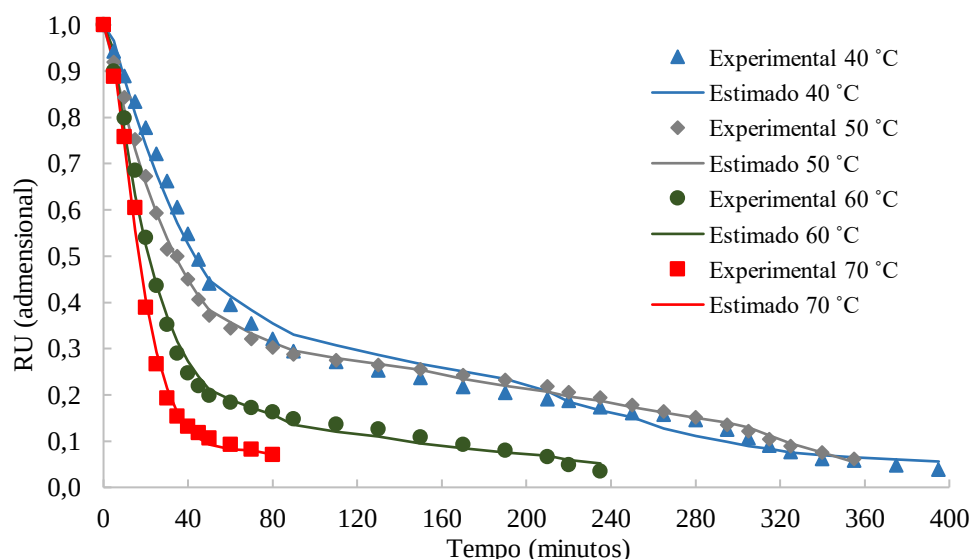
Fonte: Autor (2021).

De acordo com a Figura 32, para os chips de batata-doce de espessura de 0,0024 m, também foi observado que o aumento da temperatura do ar de secagem proporcionou redução no tempo necessário para a remoção de água do produto, concordando com os resultados obtidos para os chips em espessura de 0,0012 m.

Nota-se que o tempo necessário para os chips com espessura de 0,0024 m atingir o teor de água final de 7%, na temperatura de 40 °C foi de, aproximadamente, 400 minutos (6,6 horas). Para a temperatura de 50 °C o tempo de secagem foi de 360 minutos (6 horas), ocorrendo a redução de 10% no tempo de desidratação dos chips. Com temperatura de 60 °C as fatias atingiram a umidade de equilíbrio com o tempo de 240 minutos (4 horas). Para a temperatura de 70 °C, o equilíbrio higroscópico foi atingido rapidamente, em relação às demais temperaturas, sendo necessário o tempo aproximadamente de 80 minutos (1,3 horas). Dessa forma, o aumento da temperatura de 40 °C para a de 70 °C proporciona redução de 5,3 horas no processo de secagem de chips de batata-doce, o que representa uma redução considerável de tempo em relação às demais temperaturas estudadas, bem como menor consumo de energia.

Diversos autores, também comprovaram a redução do tempo de secagem com o aumento da temperatura do ar, pesquisando diferentes produtos agrícolas e diferentes temperaturas (MENEZES et al., 2013; PEREZ et al., 2013; MADUREIRA et al., 2011; MACHADO et al., 2012a).

Figura 31 - Cinética de secagem de chip de batata-doce segundo o modelo de Henderson e Pabis Modificada nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C e espessura de 0,0024 m.



Fonte: Autor (2021).

Analisando a influência da espessura sobre o tempo de secagem de chips de batata-doce pode-se observar que para todas as temperaturas de secagem avaliadas, a espessura de 2,4 mm proporcionou um maior tempo de secagem para o produto.

4.5 Avaliação do tempo de secagem

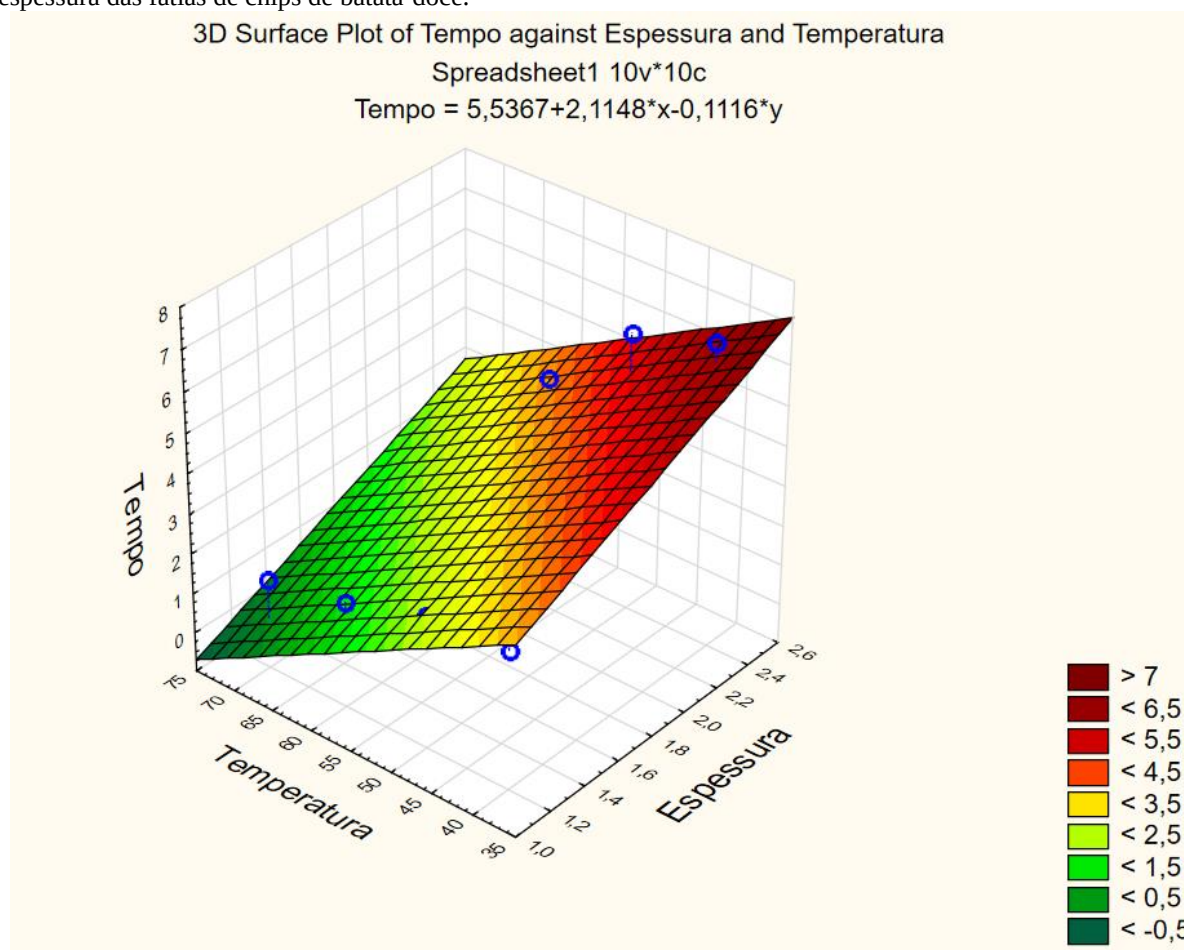
Na Tabela 18 é mostrada a análise de variância aplicada ao tempo de secagem informa os fatores e a interação entre eles que apresentaram diferença significativa em relação ao tempo de secagem de chips de batata-doce em função de diferentes espessuras de fatia e temperaturas de secagem.

Nota-se, na Tabela 18 que houve diferença significativa quanto às diferentes espessuras de fatia dos chips, bem como para as temperaturas de secagem e a interação entre esses fatores. Assim, na Figura 33 tem-se a superfície de resposta da variável tempo de secagem em função da temperatura de secagem e da espessura das fatias de chips de batata-doce.

Tabela 11 - Quadro de análise de variância aplicada ao tempo de secagem de chips de batata-doce em função de diferentes espessuras de fatia e temperatura de secagem.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Pr>Fc
Espessura	1	214704	214704,16	0,0000
Temperatura	3	64691,7	21563,88	0,0000
Espessura x Temperatura	3	27754,2	9251,38	0,0001
Erro	16	10533,3	658,33	
CV (%)			9,3	

Figura 32 - Superfície de resposta da variável tempo de secagem em função da temperatura de secagem e da espessura das fatias de chips de batata-doce.



Conforme os resultados, Figura 33, a combinação de maiores temperaturas do ar de secagem com menores espessuras de fatia proporcionam um menor tempo de secagem para chips de batata-doce em secador de leito fluidizado. Nessas condições o menor tempo obtido para secagem dos chips foi com a temperatura de 70 °C e espessura da fatia de 0,0012 m.

Verifica-se que o incremento na espessura apresenta efeito contrário na taxa de secagem, quando comparado com o aumento da temperatura, ou seja, a taxa de secagem diminui com o

aumento da espessura. Assim, as fatias com 0,0012 m de espessura proporcionaram uma maior velocidade de secagem independente da temperatura avaliada, demonstrando assim que a espessura das fatias é um fator determinante no tempo final de secagem de chips de batata-doce.

O aumento na espessura da fatia de 0,0012 para 0,0024 m foi capaz de ocasionar o aumento de 240 minutos (4 horas) no tempo de secagem de chips de batata-doce para a temperatura de 40 °C, 220 minutos (3,6 horas) para a temperatura de 50 °C e 140 minutos (2,3 horas) para a temperatura de 60 °C. Para a temperatura de 70 °C, o aumento no tempo de secagem, de 5 minutos, não foi tão expressivo em relação ao aumento da espessura da fatia. O fato da taxa de secagem diminuir com o aumento da espessura pode estar relacionado, em grande parte, à resistência encontrada pela umidade ao migrar do interior para a superfície do produto (SILVA et al., 2009).

Nguyen e Price (2007) observaram efeito similar ao estudarem a secagem da banana fatiada nas espessuras de 10 e 20 mm, assim como Silva et al. (2009) também verificaram incremento no tempo de secagem de banana-maçã com o aumento da espessura da fatia. De igual forma, Machado et al. (2012b) mediante a comparação de curvas de secagem de fatias de caju com diferentes espessuras observaram que o tempo de secagem diminui significativamente com a redução da espessura das fatias.

5 CONCLUSÕES

Nas condições em que foi desenvolvido este trabalho, pode-se concluir que:

Os ensaios de avaliação do protótipo de secador de leito fluidizado para secagem de chips de batata-doce, mostraram que é vantajoso e promissor a utilização do mesmo.

Dentre os modelos matemáticos analisados, o de Henderson e Pabis modificado foi o que apresentou melhor ajuste estatístico aos dados experimentais da cinética de secagem sob todas as condições avaliadas.

Para secagem de chips de batata-doce, pode-se concluir que este processo é exequível nas temperaturas estudadas, sendo o tempo de secagem inversamente proporcional à temperatura.

A espessura das fatias é um fator determinante sobre a redução do tempo de secagem de chips de batata-doce independente da temperatura analisada, sendo que a espessura de 0,0012 m promoveu uma secagem do produto com menor período.

A melhor combinação de variáveis obtida pelo planejamento fatorial para a secagem de chips de batata-doce em secador de leito fluidizado é com a temperatura de 70°C e espessura da fatia de 0,0012 m.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILERA, J.M.; CHIRALT, A.; FITO, P. Food dehydration and product structure. **Trends in Food Science & Technology**, v. 14, n. 10, p. 432-437, 2003.

AGUIRRE, J.M; GASPARINO FILHO, J. **Desidratação de frutas e hortaliças**. Campinas: TIAL, 2002. 205 p. Manual Técnico.

ALIBAS, I. Energy Consumption and colour characteristics of nettle leaves during microwave, vacuum and convective drying. **Biosystems Engineering**, Amsterdã, v.96, n.4, p. 495–502, 2007.

ANDRADE, M. L. A. **Desidratação de batata doce sob tratamentos osmóticos**. 2017. 22p. Monografia de Graduação em Agronomia - Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2017.

ANDRADE JÚNIOR, V.C; VIANA, D.J.S; PINTO NA,V.D; RIBEIRO, K.G; PEREIRA, R.C; NEIVA, I.P; AZEVEDO, A.M; ANDRADE, P.C.R. Características produtivas e qualitativas de ramas e raízes de batata-doce. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.30, n.4, p. 584-589, 2012.

ANTONUCCI, C.M.; BORZONE, L.A. Numerical study of regime transitions in a fluidized bed. **Particulate Science and Technology**, v.34, n.1, p.691-698, 2016.

ARAÚJO, C. DA S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; SARAIVA, S. H.; OLIVEIRA, A. DO N.; TEIXEIRA, L. J. Q. Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v.20, n.1, p.1-9, 2017.

BETEMPS, C.; PINTO, L. E. A batata-doce ganha espaço à mesa no inverno, mas é preciso atenção ao sistema de produção da cultura. Brasília: Embrapa, 2015.

BEZERRA, T.S. **Desidratação de hortaliças: Aspectos teóricos**. 2007. 54p. Monografia (Especialização em Tecnologia de Alimentos), Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

BORGES, J.T.S; OLIVEIRA, A.G.DE.; CARVALHO, J.B.DE.; NUNES, L.R.; BARCELOS, M.C.S.DE.; CARVALHO, S.G.A.; PAULA, C.D.DE.; MORAES, D.S.A.B.DE. Avaliação física e sensorial de chips desidratados de maçã sabor natural e canela. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v.6, n.9, p.66554-66573, 2020.

BOTELHO, F.M; GRANELLA, S.J; BOTELHO, S.C.C; GARCIA, T.R.B. Influência da temperatura de secagem sobre as propriedades físicas dos grãos de soja. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.23, n.3, p.212-219, 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**, Brasília, DF, 2009. 399p.

- BROCHIER, B. **Estudo da desidratação osmótica de yacon (*smallanthus sonchifolius*) usando solutos alternativos a sacarose**. 2013. 115p. Dissertação (mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- BORGES, S. V.; MANCINI, M. C.; CORRÊA, J. L. G.; LEITE, J. Secagem de bananas prata e d'água por convecção forçada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, n. 3, p. 605-612, 2010.
- CAETANO, G. S.; SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; SALES, J. F.; COSTA, L. M. Higroscopicidade de sementes de caju-de-árvore-do-cerrado. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. Goiânia, v. 42, n. 4, p. 437-445, out./dez. 2012.
- CAMPOS, V. R.; CALLIARI, C. M. **Elaboração de snack de batata doce (*Ipomoea batatas*)**. In: Tópicos em Ciências e Tecnologia de Alimentos: Resultados de Pesquisas Acadêmicas. São Paulo: Blucher, 2016. Cap.10, p.263-284.
- CARTER, A.; BRIENS, L. Inline acoustic monitoring to determine fluidized bed performance during pharmaceutical coating. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 549, n. 1-2, p. 293-298, 2018.
- CARVALHO, M. S. **Produção de polpa de abóbora em pó pelo processo de secagem em leito de espuma**. 2014. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- CAVARIANI, C. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. 1996. 85p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal), Piracicaba, 1996.
- CELESTINO, S.M.C. **Princípios de Secagem de Alimentos**. 1.ed. Planaltina, Distrito Federal: Embrapa Cerrados, 2010. 49p. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/883845/1/doc276.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2020.
- CENTRO TÉCNICO DE COOPERAÇÃO AGRÍCOLA E RURAL (CTA). **Como fazer Chips e farinha de batata doce**. Coleção guias práticos CTA n. 6, Países Baixos, 2008.
- CHEN, H.H.; MUJUMDAR, A.S. Desenvolvimento e Análise de desempenho de um novo secador fotocatalítico assistido por energia solar. **Tecnologia de Secagem**, Milton Park, v.26, n.4, p.503-507, 2008.
- CORRÊA, L.J. **Estudo da secagem de sementes de embaúba em leito fluidizado**. 2012. 87p. Dissertação em Engenharia Química, Universidade Estadual de São Carlos, São Carlos, 2012.
- COSTA, Z. R. T.; SILVA, L. P. F. R.; ALVES, V. R.; SILVA, H. A.; VIEIRA, A. F. Modelos matemáticos da cinética de secagem de banana (*Musa spp.*). In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, **Anais...** Maceió, 2018.

- DISSA A.O.; DESMORIEUX H.; BATHIEBO J.; KOULIDIATI J. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage. **Journal of food Engineering**, Amsterdã, v.88, n.4, p.429-437, 2008.
- DOMINGOS, J.D. **Determinação das propriedades físico-químicas de chips de batatas-doces desidratados por micro-ondas a vácuo**. 2018. 67p. Monografia (Engenharia de Alimentos), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Statistics of fruits and vegetables world production**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em: 27 outubro 2021.
- FELLOWS, P.J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. 2ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 968p.
- FERNANDES, A.M.; LEONEL, M.; GARCIA, E.L. Influência da adubação verde e nitrogenada na nutrição foliar da batata doce. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35, 2015, Natal. **Anais....** Natal: CBCS, 2015. p.1-4.
- FERRAREZZO, E. M. **Desenvolvimento de mandioca chips, moldada e frita**. 2011. 190p. Tese (Doutorado em Zootecnia), Faculdade de zootecnia e engenharia de alimentos - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, n.6, p.1039-1042, 2014.
- FERREIRA, J.C.; RESENDE, G.M.DE. Batata-doce cultivar adequada faz toda a diferença. **Campo & Negócios Hortifrúti**. p.24-25, 2019. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/202890/1/Batata-doce-no-VSF-2019.pdf>>. Acesso em: 31 maio 2020.
- FIB, **FOOD INGREDIENTES BRASIL**. (2013), Dossiê alimentos desidratados. n.26. Disponível em <<http://www.revista-fi.com/materias/338.pdf>>.
- FONSECA, O.L.C. **Estudo Preliminar da Fluidodinâmica do Escoamento Gás-Sólido de um Leito Fluidizado Circulante Através da Análise dos Sinais Dinâmicos de Pressão**. 2009. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- FONTES, L. C. B. **Efeito de desidratação osmótica e coberturas comestíveis na qualidade de chips de batata-doce elaborado pelo processo de fritura por imersão**. 2009. 305p. Tese (Doutorado em engenharia de alimentos). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- FONTES, L. C. B.; SIVI, T. C.; RAMOS, K. K.; QUEIROZ, F. P. C. Efeito das condições operacionais no processo de desidratação osmótica de batata-doce. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.14, n.1, p.1-13, 2012.

FREITAS, R.P. **Estudo experimental e da simulação da secagem de sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em Leito Fluidizado**. 2016. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2016.

GALVÃO, A.M.M.T. **Secagem em leito fluidizado de snacks de maçã incorporados com probiótico**. 2020. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

GERMANO, L. M. L. P. **Métodos alternativos de secagem de banana verde**. 2016. 44p. Monografia de graduação em Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

GOMES, Helton. **Snacks de frutas devem crescer 35%**. Abril, 2009. Disponível em: <http://www.sm.com.br/Editorias/Categorias/Snacks-de-frutas-devem-crescer-35%25-3555.html>> Acesso em: 12 outubro 2021.

GONÇALVES, J.F.T. **Dimensionamento de um secador em leito fluidizado para a secagem de cereais**. 2011. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2011.

GONELI, A.L.D; MARTINS, E.A.S; JORDAN, R.A; GEISENHOF, L.O; GARCIA, R.T. Projeto experimental de secador para produtos agrícolas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.36, n.5, p.938-950, 2016.

GURGEL, C.E.M.R. **Secagem da polpa de graviola (*annona muricata* L.) em camada de espuma** - desempenho do processo e características do produto. 2014. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

GOSAVI, S.; KULKARNI, N.; MATHPATI, C. S.; MANDAL, D. CFD modeling to determine the minimum fluidization velocity of particles in gas-solid fluidized bed at different temperatures. **Powder Technology**, v.327, n.1, p.109-119, 2018.

HARTMAN, M.; TRNKA, O.; SVOBODA, K. Use of pressure fluctuations to determine online the regime of gas-solids suspensions from incipient fluidization to transport. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.48, n.14, p.6830-6835, 2009.

HORTIBRASIL. Instituto Brasileiro de Qualidade em Horticultura. **Normas de Classificação - batata-doce - Programa Brasileiro para a Modernização da Horticultura**. Disponível em: <http://www.hortibrasil.org.br/images/stories/folders/batata_doce_folder.pdf>. São Paulo, v.12, n.12, p.1-7, 2014.

IBGE. Instituto brasileiro de geográfica e estatística. **Produção agrícola municipal – Produto das lavouras temporárias e permanentes – Batata-doce**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado>>. Acesso em: 27 outubro 2021.

INCA – INSTITUTO DO CÂNCER. **Hábitos alimentares**. Disponível em: <www.inca.gov.br/conteudo_view?id=18#topo>. Acesso em: 23 de nov. 2021.

INCROPERA, F.P; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 2008. 380 p.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos** - 4ª Edição. 1ª Edição Digital. São Paulo. 1002 p. 2008.

IMRE, L. **Solar Drying**. In: MUJUMDAR, A.S. Handbook of Industrial Drying. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2014. Cap. 13, p.304-346.

JAYARAMAN, K. S.; GUPTA, D. K. **Drying of Fruit and Vegetables**. 2014 In: MUJUMDAR, A.S. Handbook of Industrial Drying. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2015. Cap. 25, p.612-633.

KARAM, M. C; PETIT, J; ZIMMER, D; DJANTOU, E. B; SCHER, J. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. **Journal of Food Engineering**, Califórnia, v.188, n.5, p.32-49, 2016.

KEMP, I.C.; BAHU, R.E. A new algorithm for dryer selection. **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., v.13, n.(5-7), p.1563-1578, 1995.

KÖPPEN, William. 1931. Climatologia. México, Fundo de Cultura Econômica.

LINHARES, M. C.; SANTOS, L. D.; PRADO, M. M. Estudo do comportamento fluidodinâmico de grãos de polén apícola em leite fluidizado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. **Anais [...]** Florianópolis: 2014. Disponível em: <[http://www.conhecer.org.br/enciclop/2012a/engenharia/estudo do comportamento.pdf](http://www.conhecer.org.br/enciclop/2012a/engenharia/estudo%20do%20comportamento.pdf)>. Acesso em: 10 julho 2020.

MACEDO, A.S. **Estudo da fluidodinâmica e da secagem de resíduos do processamento do cacao em leite fluidizado**. 2017. 29p. Monografia (Engenharia Química) Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, 2017.

MACHADO, A. M.; SOUZA, M. C.; JUNQUEIRA, M. S.; SARAIVA, S. H.; TEIXEIRA, L. J. Q. Cinéticas de Secagem do abacaxi cv. Pérola. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 15, p. 428-437, 2012.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, Davis, v.29, n.1, p.75-97, 1996.

MAGALHÃES, A. C. **Desenvolvimento e avaliação de uma máquina colhedora de café em terreiro utilizando transporte pneumático**. 2013. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

MANONMANI, A.; THYAGARAJAN, T.; SHUTA, S. Evolutionary algorithm-based multi-objective control scheme for food drying process. **International Journal of Food Engineering**, Jiangsu, v.13, n.1, p.1-12, 2016.

MARQUES, K. R. **Reação de genótipos de batata-doce à isolados locais de *Plenodomus Destructans* Harter, agente causal do Mal-do-pé**. 2015. 57p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2015.

MELONI, P. L. S. **Produção de frutas desidratadas e cristalizadas**. Fortaleza: Instituto Frutal, 2009. 120p.

MIN, S. C.; KIM, Y. T.; HAN, J. H. **Packaging and the shelf life of cereals and snack foods**. In: ROBERTSON, G. L. Food packaging and shelf life. Boca Raton: CRC Press, 2010. p. 339-352.

MONTEIRO, R.L. **Secagem de batata-doce em micro-ondas a vácuo com controle da temperatura pela manipulação da potência**. 2018. 186p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2018.

MONTEIRO, R.L.; CARCIOFI, B.A.M.; LAURINDO, J.B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. **Journal of Food Engineering**, California, v.178, n.1, p.1-11, 2016.

MOUNIR, S; TÉLLEZ-PÉREZ, C; ALONZO-MACÍAS, M; ALLAF, K. **Swell-Drying**. In: Allaf, T.; Allaf, K. Instant controlled pressure drop (DIC) in food processing. Food Engineering Series. New York: Springer New York, 2014. Cap.1, p.3-43.

MUJUMDAR, A. S.; editor. **Handbook of Industrial Drying**. 4rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2015. 628p.

Mujumdar, A.S; Devahastin, S. **Applications for fluidized bed drying**. In: Yang, W.C. Handbook of Fluidization and Fluid Systems. New York: Ed. Marcel Dekker, 2003. Cap.18, p.469-484.

NEIVA, I. P; ANDRADE JÚNIOR, V. C.; VIANA, D. J. S.; FIGUEIREDO, J. A.; MENDONÇA FILHO, C. V.; PARRELLA, R. A. C.; SANTOS, J.B. Caracterização morfológica de acessos de batata-doce do banco de germoplasma da UFVJM, Diamantina. **Horticultura Brasileira**, Campinas, v.29, n.1, p.537-541, 2011.

NUNES, D.M.C. Propriedades físicas, térmicas e aerodinâmicas de grãos de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). 2009. 68p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2009.

OIKONOMOPOULOU, V. P.; KROKIDA, M. K.; KARATHANOS, V. T. The influence of freeze drying conditions on microstructural changes of food products. **Procedia food science**, v. 1, n.1, p. 647-654, 2011.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 181-189, 2006.

OLIVEIRA, A. P. de, GONDIM, P. C., SILVA, O. P. R. da, OLIVEIRA, A. N. P. de,

GONDIM, S. C. SILVA, J.A. Produção e teor de amido da batata-doce em cultivo sob adubação com matéria orgânica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 17, n. 8, p.830-834, 2013

OLIVEIRA, T.J.P. **Aspectos fluidodinâmicos de misturas binárias de resíduo de tabaco e areia em leito fluidizado**. 2012. 84p. Dissertação (Mestrado em Engenharias), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

ORDÓÑES, J.A. **Tecnologia de alimentos: componentes dos alimentos e processos**. Porto Alegre: Artmed, 2005. 350p.

ORIKASA, T; KOIDE S; OKAMOTO S; IMAIZUMI T; MURAMATSU Y; TAKEDA J; SHIINA T; TAGAWA A. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. **Journal of Food Engineering**, Califórnia, v.125, n.6, p.51-58, 2014.

PAGANI, A.A.C; LEITE, T.S; GOIS, C.A.de; TRAJANO, C.T; BERY, C.C.de.S; SILVA, G.F.da. Avaliação sensorial de chips de batata doce roxa e branca e enriquecida com ácido ascórbico, p. 1714-1718. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 37, ENEMP, 2015, São Paulo. Anais... São Paulo: Blucher, 2015.**

PALACIN, J.J.F.; LACERDA FILHO, A.F.; CECON, P.R.; MONTES, E.J.M. Determinações das curvas de secagem de milho nas espigas (*Zea mays L.*). **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 13, n. 4, p.300-313, 2005.

PARK, K. J. B. et al. Secagem: fundamentos e equações, **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.16, n.1, p.93-127, 2014.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C. **Análises de materiais biológicos**. 2006. 44p. Monografia (Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2006.

PARK, K.B.; PARK, K.J.; ALONSO, L.F.T.; CORNEJO, F.E.P.; FABBRO, I.M.D. Secagem: Fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.16, n.1, p.93-127, 2014.

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

PAVAN, M.A.; SCHMIDT, S.J.; FENG, H. Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air dried açai (*Euterpe oleracea Martius*) juice. **LWT – Food Science and Technology**, Illinois, v.48, n.1, p.75-81, 2012.

PINHEIRO, M. C. **Propriedades físicas de frutos- de soja UFV-1**. 1975. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1975.

PRAKASH, O.; KUMAR, A. Solar greenhouse drying: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Bhopal, v.29, n.1, p.905-910, 2014.

PRESEA ALIMENTOS. **Frutas Desidratadas**. Disponível em: < www.presea.com.br.> Acesso em: 22 jun. 2014.

RAMALHO, W.J.C.R. **Análise da cinética de secagem da batata-doce (*Ipomea batatas* L.) por diferentes técnicas de secagem**. 2018. 89p. Monografia (Bacharel em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Paraíba, João Pessoa, 2018.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. **Journal of food engineering**, Amsterdã, v.49, n.4, p.311-319, 2001.

RHODES, M. **Introduction to Particle Technology**. 2.ed. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England, 2008. 449p.

RITSCHER PS; LOPES CA; HUAMÁN Z; FERREIRA ME; FRANCA FJ; MENÊZES JE; TEIXEIRA DMC; TORRES AC; CHARCHAR JM; THOMAZELLI L. **Organização do banco ativo de germoplasma de batata-doce: situação atual e perspectivas**. In: QUEIROZ MA; GOEDERT CO; RAMOS SRR. (eds). Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o Nordeste brasileiro. Brasília: Embrapa Semi-Árido, 2010.

RONCHETTI, E.F.S. **Estudo do Processo de Secagem em Leito de Espuma de Cenoura, Tomate, Beterraba e Morango**. 2014. 52p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2014.

SANTOS, P. S.; SCHWANZ, F.; PORTO, A. L. G.; SILVA, F. T. C.; FURTADO, G. F. Influência de pré-tratamentos na cinética de secagem de banana da variedade terra (*Musa sapientum*, Linneo). **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 4, n. 2, p. 218-234, 2010.

SANTOS, M.L.; MACHADO, A.V.; ALVES, F.M.S.; COSTA, A.P.L.M. Estudo físico-químico de maçã desidratada em secador convectivo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.8, n.1, p.30-37, 2013.

SANTOS, S.; CARDOSO, W.O.; CAZETTA, M.; GORAYEB, T.C.C. Avaliação da atitude dos consumidores de frutas desidratadas. **Revista Simpósio Nacional de Tecnologia em Agronegócio**, v.1, n.1, p.1-6, 2016.

SANTOS, T.P.R.; FERNANDES, D.S.; LEONEL, M. Efeito da variedade e do tipo de processamento nos atributos físicos e intenção de compra de chips de batata-doce de polpa alaranjada. In: JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA FATEC DE BOTUCATU, 8, 2019. São Paulo. **Anais [...]** Botucatu: Jornacitec, 2019. (Resumo)

SILVA G.O; PONIJALEKI R; SUINAGA F.A. Divergência genética entre acessos de batata-doce utilizando caracteres fenotípicos de raiz. **Horticultura Brasileira**, Campinas, v.30, n.1, p.595-599, 2012.

SINGH, R.P.; HELDMAN, D.R. **Introduction to Food Engineering**. 4 ed., San Diego: Academic Press, 2009.

SIVAKUMAR, R.; SARAVANAN, R.; PERUMAL, A. E.; INIYAN, S. Fluidized bed drying of some agro products - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Califórnia, v.61, p.280-301, 2016.

SOARES, R.R. **Estudo da eficácia de modelos matemáticos simplificados na simulação e dimensionamento de secadores contínuos**. 2014. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

SOUSA, M. de B.; PEDROZA, J.P.; BELTRÃO, N.E. de M.; SEVERINO, L.S.; DANTAS, F.P. Cinética de secagem do farelo de mamona. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.8, n.2, p.139-146, 2006.

SOUSA, S.L. **Aplicação do processo de secagem em leito de jorro para obtenção de suco de caju em pó**. 2015. 106p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

SOUZA, D. G.; RESENDE, O.; MOURA, L. C.; FERREIRA JUNIOR, W. N.; ANDRADE, J. W. S. Drying kinetics of the sliced pulp of biofortified sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 2, p. 176-181, 2019.

ŠUMIC, Z.; TEPIC, A.; VIDOVIC, S.; JOKIC, S.; MALBAŠA, R. Optimization of frozen sour cherries vacuum drying process. **Food chemistry**, v. 136, n. 1, p. 55-63, 2013.

TOREZAN, G. A. P. **Desenvolvimento de processo combinado de desidratação osmótica-fritura para obtenção dos chips de manga**. 2005. 291p. Tese Doutorado (Tecnologia de Alimentos) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

TRONCOSO, E; PEDRESCHI, F. Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. **LWT—Food Science and Technology**, Amsterdã, v.42, n.6, p.1164–1173, 2009.

VALENTE, M.C.C. **Avaliação das condições de secagem no rendimento e na qualidade do óleo de linhaça (*Linum usitatissimum* L.)**. 2011. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

VARNALIS, A. I.; BRENNAN, J. G.; MACDOUGALL, D. B. A proposed mechanism of high-temperature puffing of potato. Part I. The influence of blanching and drying conditions on the volume of puffed cubes. **Journal of Food Engineering**, v.48, n.4, p.361-367, 2001.

ZIJERVELD, R. C.; JOHNSON, F.; MARZOCHELLA, A.; SCHOUTEN, J.C.; VAN DEN BLEEK, C.M Fluidization regimes and transitions from fixed bed to dilute transport flow. **Powder Technology**, v.95, n.3, p.185-204, 1998.

APÊNDICE A- MEMORIAL DE DIMENSIONAMENTO DO SECADOR DE LEITO FLUIDIZADO.

Área dos chips

$$A_{chips} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (h + r)$$

$$A_{chips} = 2 \cdot \pi \cdot 0,015 \cdot (0,0024 + 0,015)$$

$$A_{chips} = 0,00164 \text{ m}$$

Volume dos chips

$$V_{chips} = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$V_{chips} = \pi \cdot 0,015^2 \cdot 0,0024$$

$$V_{chips} = 1,696 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Diâmetro equivalente

$$d_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{chips}}{\pi}}$$

$$d_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{chips}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 1,696 \times 10^{-6}}{\pi}} = 0,0148 \text{ m}$$

Esfericidade

Para estimar a esfericidade do material foi utilizado o d_{eq} para calcular a área da esfera, e após encontrar esse valor, o mesmo será dividido pela área do material utilizado, no caso a área dos chips. Dessa forma determinou-se a área da esfera (A_{esf}) equivalente aos chips de batata-doce:

$$A_{esf} = \pi \cdot d_{eq}^2$$

$$A_{esf} = \pi \cdot 0,0148^2$$

$$A_{esf} = 0,000688 \text{ m}$$

A esfericidade ($\emptyset$) dos chips foi estimada levando em consideração a razão da área da esfera pela área dos chips, da seguinte forma:

$$\emptyset = \frac{A_{esf}}{A_{chips}}$$

$$\emptyset = \frac{0,000688}{0,0016} = 0,419 \text{ (adm)}$$

Velocidade mínima de fluidização

A velocidade mínima de fluidização pode ser estimada recorrendo à equação de Ergun (Rhodes, 2008). Para o cálculo do número de Arquimedes (Ar) considerou-se a massa volumétrica da partícula de $3184,71 \text{ Kg m}^{-3}$, a massa Volumétrica do ar de $1,104 \text{ (Kg m}^{-3})$ e a viscosidade cinemática do ar de $2,094 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Logo, número de Arquimedes (Ar) foi determinado da seguinte forma:

$$A_R = \frac{d_{eq}^3 \cdot (\rho_p - \rho_f)}{\nu_g^2 \cdot \rho_f}$$

$$AR = \frac{0,0148 \cdot (3184,71 - 1,104)}{2,094 \times 10^{-5^2} \cdot 1,104} = 21307961,17 \text{ (adm)}$$

O cálculo do número de Reynolds ($Re_{p,mf}$) permite estimar o valor do coeficiente de orifício, necessário no cálculo da velocidade do fluido no orifício. Para tanto, retira-se o valor do número de Reynolds da partícula nas condições de fluidização mínima a partir do cálculo do número de Arquimedes, sendo necessário também o valor da porosidade do leito nas condições de fluidização mínima (ε_{mf}).

$$\varepsilon_{mf} = (0,071 \cdot \emptyset^{-1})^{\frac{1}{3}}$$

$$\varepsilon_{mf} = (0,071 \cdot 0,419^{-1})^{\frac{1}{3}} = 0,553 \text{ (adm)}$$

$$\frac{1,75}{0,553^3 \cdot 0,419} \cdot Re_{p,mf}^2 + \frac{150 (1 - 0,553)}{0,553^3 \cdot 0,419^2} \cdot Re_{p,mf} - 21307961,17 = 0$$

$$Re_{p,mf} = 885,24 \text{ ms}^{-1}$$

Com o número de Reynolds calculado, e tendo a viscosidade do ar de $0,0000196 \text{ Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, determinou-se o valor da velocidade mínima de fluidização da seguinte forma:

$$Re_{p,mf} = \frac{v_{mf} \cdot \rho_f \cdot d_{eq}}{\mu_f}$$

$$V_{mf} = \frac{Re_{p,mf}^2 \cdot \mu_f}{\rho_f \cdot d_{eq}} = \frac{885,24 \cdot 0,0000196}{1,104 \cdot 0,0148}$$

$$V_{mf} = 1,062 \text{ ms}^{-1}$$

Velocidade terminal

Com a velocidade mínima de fluidização calculada, é necessário estimar a velocidade terminal. A velocidade terminal ou máxima de fluidização (V_t) corresponde à velocidade do gás onde as partículas começam a ser arrastadas. Isso acontece quando a força de arraste do gás se iguala ao peso das partículas que se encontram suspensas pelo fluido, este é um fator importante no projeto de leito fluidizado.

$$V_t = \frac{Ar}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{Ar}} \cdot \frac{vg}{d_{eq}}$$

$$V_t = \frac{21307961,17}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{21307961,17}} \cdot \frac{2,094 \times 10^{-5}}{0,0148}$$

$$V_t = 10,82 \text{ ms}^{-1}$$

Velocidade ótima

A velocidade ótima de operação deve estar compreendida entre a velocidade mínima de fluidização e a velocidade terminal. Para valores inferiores à velocidade mínima de fluidização, não ocorre fluidização e o leito mantém-se fixo. No entanto, é também preciso que esta velocidade não seja superior à velocidade terminal para que não ocorra arrastamento de partículas.

$$V_o = 0,547 \cdot \sqrt{Ar} \cdot \frac{\nu g}{d_{eq}}$$

$$V_o = 0,547 \cdot \sqrt{21307961,17} \cdot \frac{2,094 \times 10^{-6}}{0,0148} = 3,57 \text{ ms}^{-1}$$

Volume e área do leito

Ao que se referem ao leito, as dimensões utilizadas para o diâmetro (D) e a altura do leito fixo (H_{mf}) foram fixadas em 0,2m e 0,5m respectivamente, em função dos materiais utilizados para confecção do mesmo.

Dessa forma, foram calculados o volume (V_L) e a área (A_L) do leito:

$$V_L = \pi \cdot \frac{D^2}{2} \cdot H_{mf}$$

$$V_L = \pi \cdot \frac{0,2^2}{2} \cdot 0,5$$

$$V_L = 0,0314 \text{ m}^3$$

$$AL = \frac{V_L}{H_{mf}}$$

$$AL = \frac{0,0314}{0,5}$$

$$AL = 0,0628 \text{ m}^2$$

Queda de pressão no leito

O cálculo da queda de pressão (Δ_{pb}) não só permite saber o valor da perda de carga ao longo do leito, mas também é necessário para o dimensionamento do distribuidor. Para realizar os cálculos de queda de pressão no leito utilizou-se a porosidade do leito nas condições de fluidização mínima (ε_{mf}) de 0,63; a massa volúmica da partícula (ρ_p) de 3184,71 Kg m^{-3} , a massa volúmica do ar (ρ_f) de 1,104 Kg m^{-3} , a aceleração gravítica (g) de 9,8 ms $^{-2}$ e a altura do leito fixo (H_{mf}) de 0,5 m;

$$\Delta_{pb} = (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot H_{mf}$$

$$\Delta_{pb} = (1 - 0,553) \cdot (3184,71 - 1,104) \cdot 9,8 \cdot 0,5$$

$$\Delta_{pb} = 6970,47 \text{ Pa}$$

Queda de pressão no distribuidor

Com o conhecimento da queda de distribuição na coluna, o valor da queda de pressão no distribuidor é cerca de 30% da primeira.

$$\Delta P_{dist} = 0,3 \cdot \Delta_{pb}$$

$$\Delta P_{dist} = 0,3 \cdot 6970,47$$

$$\Delta P_{dist} = 2091,14 \text{ Pa}$$

Velocidade do fluido no orifício

É necessário calcular um novo número de Reynolds para o orifício no distribuidor ($Re_{\text{orifício}}$). O cálculo do número de Reynolds permite estimar o valor do coeficiente de orifício, necessário no cálculo da velocidade do fluido no orifício.

$$Re_{or} = \frac{D \cdot V_o \cdot \rho_f}{\mu_f}$$

$$Re_{or} = \frac{0,2 \cdot 3,573 \cdot 1,104}{0,0000196} = 40252,82$$

O número de Reynolds, baseado no diâmetro da coluna é 40252,82, o qual corresponde um coeficiente de atrito $C_{d,or} = 0,60$, determinado a partir da Tabela 2.

Tabela 2. Coeficiente do orifício em função do número de Reynolds (Kunii e Levenspiel, 1991).

Re	100	300	500	1000	2000	> 3000
C_{dor}	0,68	0,7	0,68	0,64	0,61	0,6

Com este valor determinou-se a velocidade do ar através dos orifícios:

$$V_{or} = C_{d,or} \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta P_{dist}}{\rho_f} \right)^{0,5}$$

$$V_{or} = C_{d,or} \cdot \left(\frac{2 \cdot 2091,14}{1,104} \right)^{0,5} = 33,92 \text{ ms}^{-1}$$

Número de orifícios

Com a velocidade do fluido no orifício calculada, mais o diâmetro do orifício (5 mm) e a velocidade do fluido na fluidização, calcula-se o número de orifícios por unidade de área de distribuidor.

$$N_{or} = \frac{V_o \cdot 4}{\pi \cdot V_{or} \cdot d_{or}^2}$$

$$N_{or} = \frac{3,57 \cdot 4}{\pi \cdot 33,92 \cdot 0,005^2} = 4927,76 \text{ orifíciosm}^{-2}$$

Com o valor da área de seção reta do distribuidor, é possível calcular o número de orifícios da placa, multiplicando-se por o número de orifícios por unidade de área de distribuidor.

$$N_L = N_{or} \cdot A_L$$

$$N = 4927,77 \cdot 0,0628$$

$$N = 309,62$$

APÊNDICE B – TABELAS DA MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE SECAGEM

Tabela 9 - Valores do coeficiente de determinação (R^2), do Erro relativo (P), do erro médio estimado (SE) e do teste do qui-quadrado (X^2) estimados para chips de batata-doce obtidos na secagem sob temperatura de 40 °C e espessura de 0,0012 m.

Modelos Matemáticos	R^2 (decimal)	P (%)	Se (decimal)	X^2 (decimal)
Aproximação da Difusão	0,9953	25,00	0,0808	0,0065
Dois Termos	0,9775	30,17	0,1530	0,0234
Exponencial de Dois Termos	0,9953	24,98	0,0809	0,0065
Henderson e Pabis	0,9775	30,18	0,2164	0,0468
Henderson e Pabis Modificada	0,9974	9,26	0,0287	0,0008
Logarítmico	0,9787	38,92	0,1722	0,0296
Midilli	0,9984	14,04	0,0475	0,0023
Newton	0,9678	0,3460	0,3657	0,1337
Page	0,9960	28,60	0,0920	0,0085
Thompson	0,9677	34,55	0,2586	0,0669
Verma	0,9953	24,98	0,0809	0,0065
Wang Singh	0,9776	56,89	0,2163	0,0468

Tabela 10 - Valores do coeficiente de determinação (R^2), do Erro relativo (P), do erro médio estimado (SE) e do teste do qui-quadrado (X^2) estimados para chips de batata-doce obtidos na secagem sob temperatura de 50 °C e espessura de 0,0012 m.

Modelos Matemáticos	R^2 (decimal)	P (%)	Se (decimal)	X^2 (decimal)
Aproximação da Difusão	0,9860	17,43	0,1183	0,0140
Dois Termos	0,9894	15,85	0,0893	0,0080
Exponencial de Dois Termos	0,9860	17,43	0,1183	0,0140
Henderson e Pabis	0,9864	26,30	0,1426	0,0203
Henderson e Pabis Modificada	0,9983	6,41	0,0296	0,0009
Logarítmico	0,9888	14,74	0,1059	0,0112
Midilli	0,9953	16,97	0,0689	0,0048
Newton	0,9838	26,18	0,2200	0,0484
Page	0,9874	29,29	0,1372	0,0188

Thompson	0,9838	26,15	0,1556	0,0242
Verma	0,9860	17,44	0,1183	0,0140
Wang Singh	0,9495	59,58	0,2724	0,0494

Tabela 11 - Valores do coeficiente de determinação (R^2), do Erro relativo (P), do erro médio estimado (SE) e do teste do qui-quadrado (X^2) estimados para chips de batata-doce obtidos na secagem sob temperatura de 60 °C e espessura de 0,0012 m.

Modelos Matemáticos	R^2 (decimal)	P (%)	Se (decimal)	X^2 (decimal)
Aproximação da Difusão	0,9893	32,55	0,0960	0,0092
Dois Termos	0,9891	32,33	0,0838	0,0070
Exponencial de Dois Termos	0,9817	20,744	0,1256	0,0158
Henderson e Pabis	0,9822	31,90	0,1515	0,0229
Henderson e Pabis Modificada	0,9982	7,36	0,0283	0,0008
Logarítmico	0,9844	19,78	0,1160	0,0135
Midilli	0,9947	21,79	0,0680	0,0046
Newton	0,9792	31,36	0,2315	0,0536
Page	0,9852	37,69	0,1382	0,0191
Thompson	0,9792	31,33	0,1637	0,0268
Verma	0,9894	32,96	0,0958	0,0092
Wang Singh	0,9442	69,81	0,2660	0,0707

Tabela 12 - Valores do coeficiente de determinação (R^2), do Erro relativo (P), do erro médio estimado (SE) e do teste do qui-quadrado (X^2) estimados para chips de batata-doce obtidos na secagem sob temperatura de 70 °C e espessura de 0,0012 m.

Modelos Matemáticos	R^2 (decimal)	P (%)	Se (decimal)	X^2 (decimal)
Aproximação da Difusão	0,9925	30,98	0,0720	0,0052
Dois Termos	0,9925	30,98	0,0624	0,0039
Exponencial de Dois Termos	0,9925	31,09	0,0720	0,0052
Henderson e Pabis	0,9905	29,70	0,0994	0,0099
Henderson e Pabis Modificada	0,9984	7,57	0,0235	0,0006
Logarítmico	0,9924	16,34	0,0725	0,0052
Midilli	0,9970	17,41	0,0458	0,0021
Newton	0,9899	29,46	0,1445	0,0209

Page	0,9911	33,21	0,0960	0,0092
Thompson	0,9899	29,38	0,1022	0,0104
Verma	0,9496	46,89	0,1848	0,0341
Wang Singh	0,9453	76,32	0,2355	0,0555

Tabela 13 - Valores do coeficiente de determinação (R^2), do erro relativo (P), do erro médio estimado (SE) e do teste do qui-quadrado (X^2) estimados para chips de batata-doce obtidos na secagem sob temperatura de 40 °C e espessura de 0,0024 m.

Modelos Matemáticos	R^2 (decimal)	P (%)	Se (decimal)	X^2 (decimal)
Aproximação da Difusão	0,9942	11,46	0,1022	0,0104
Dois Termos	0,9958	10,09	0,0754	0,0057
Exponencial de Dois Termos	0,9942	11,46	0,1022	0,0104
Henderson e Pabis	0,9890	27,10	0,1722	0,0296
Henderson e Pabis Modificada	0,9959	9,88	0,062	0,0037
Logarítmico	0,9956	12,52	0,0891	0,0079
Midilli	0,9942	17,80	0,1022	0,0104
Newton	0,9888	26,81	0,2459	0,0605
Page	0,9890	25,44	0,1404	0,0197
Thompson	0,9911	19,70	0,0962	0,0093
Verma	0,9942	11,46	0,1022	0,0104
Wang Singh	0,8927	80,06	0,3690	0,1362

Tabela 14 - Valores do coeficiente de determinação (R^2), do Erro relativo (P), do erro médio estimado (SE) e do teste do qui-quadrado (X^2) estimados para chips de batata-doce obtidos na secagem sob temperatura de 50 °C e espessura de 0,0024 m.

Modelos Matemáticos	R^2 (decimal)	P (%)	Se (decimal)	X^2 (decimal)
Aproximação da Difusão	0,9979	5,22	0,0520	0,0027
Dois Termos	0,9985	4,43	0,0382	0,0015
Exponencial de Dois Termos	0,9980	5,22	0,0520	0,0027
Henderson e Pabis	0,9678	30,53	0,2508	0,0629
Henderson e Pabis Modificada	0,9989	3,17	0,0274	0,0007
Logarítmico	0,9947	13,15	0,0836	0,0070
Midilli	0,9925	12,91	0,0997	0,0099
Newton	0,9634	32,98	0,3780	0,1428

Page	0,9864	16,30	0,1638	0,0268
Thompson	0,9919	12,64	0,1262	0,01594
Verma	0,9980	5,22	0,0520	0,0027
Wang Singh	0,8003	65,66	0,5941	0,3529

Tabela 15 - Valores do coeficiente de determinação (R^2), do Erro relativo (P), do erro médio estimado (SE) e do teste do qui-quadrado (X^2) estimados para chips de batata-doce obtidos na secagem sob temperatura de 60 °C e espessura de 0,0024 m.

Modelos Matemáticos	R^2 (decimal)	P (%)	Se (decimal)	X^2 (decimal)
Aproximação da Difusão	0,9928	13,87	0,0927	0,0086
Dois Termos	0,9945	12,20	0,0698	0,0049
Exponencial de Dois Termos	0,9847	34,40	0,1345	0,0181
Henderson e Pabis	0,9850	34,81	0,1634	0,0267
Henderson e Pabis Modificada	0,9973	8,85	0,0403	0,0016
Logarítmico	0,9943	15,91	0,0825	0,0068
Midilli	0,9921	24,23	0,0972	0,0094
Newton	0,9847	34,40	0,2330	0,0543
Page	0,9850	32,32	0,1630	0,0266
Thompson	0,9877	25,90	0,1475	0,0218
Verma	0,9928	13,87	0,0927	0,0035
Wang Singh	0,8284	108,88	0,7219	0,5212

Tabela 16 - Valores do coeficiente de determinação (R^2), do erro relativo (P), do erro médio estimado (SE) e do teste do qui-quadrado (X^2) estimados para chips de batata-doce obtidos na secagem sob temperatura de 70 °C e espessura de 0,0024 m.

Modelos Matemáticos	R^2 (decimal)	P (%)	Se (decimal)	X^2 (decimal)
Aproximação da Difusão	0,9831	25,27	0,1243	0,9832
Dois Termos	0,9927	24,04	0,0713	0,0051
Exponencial de Dois Termos	0,9832	25,27	0,1243	0,0155
Henderson e Pabis	0,9861	22,87	0,1388	0,0193
Henderson e Pabis Modificada	0,9978	7,27	0,0316	0,0010
Logarítmico	0,9862	20,18	0,1126	0,0127
Midilli	0,9977	11,49	0,0458	0,0021
Newton	0,9827	22,92	0,2185	0,0478

Page	0,9899	28,84	0,1182	0,0140
Thompson	0,9827	22,90	0,1546	0,0239
Verma	0,9832	25,26	0,1243	0,0155
Wang Singh	0,9858	30,09	0,1402	0,0197
