



UNIVERSIDADE DE UBERABA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL

PAULO LÍMIRIO DA SILVA

MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA AO ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE
CALOR NA SECAGEM DE BATATA (*SOLANUM TUBEROSUM*)

UBERABA-MG

FEVEREIRO DE 2019



UNIVERSIDADE DE UBERABA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL

PAULO LÍMIRO DA SILVA

MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA AO ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE
CALOR NA SECAGEM DE BATATA (*SOLANUM TUBEROSUM*)

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).
Orientador: Prof. Dr. Leonardo Campos de Assis
Co-orientador: Prof. Dr. Adriano Dawison de Lima

UBERABA-MG

FEVEREIRO DE 2019

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

S38m Silva, Paulo Limírio da.
Modelagem matemática aplicada ao estudo da transferência de calor na secagem de batata (*solanum tuberosum*) / Paulo Limírio da Silva. – Uberaba, 2019.
41 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química, concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Campos de Assis.

Coorientador: Prof. Dr. Adriano Dawison de Lima.

1. Batata – Cultivo. 2. Transferência de calor – Batata – Secagem. 3. Batata – Modelos matemáticos. I. Assis, Leonardo Campos de. II. Lima, Adriano Dawison de. III. Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química. IV. Título.

CDD 635.218

PAULO LIMÍRIO DA SILVA

MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA AO ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SECAGEM DE BATATA (*SOLANUM TUBEROSUM*)

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química – Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 26/02/2019

BANCA EXAMINADORA:



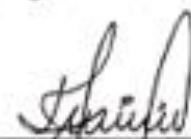
Prof. Dr. Leonardo Campos de Assis -
Orientador
Universidade de Uberaba



Prof. Dr. Adriano Dawson de Lima –
Co-Orientador
Universidade de Uberaba



Prof. Dr. Felipe Santinato
Instituto Agronômico de Campinas - IAC



Prof. Dr. Daivo Maikel Fernandes
Universidade de Uberaba

“Nossa capacidade só deixa de existir quando morremos!”

Sebastião da Silva “*In memoriam*”

A minha esposa, Paula Márcia

Aos meus filhos, Clara e Gael

Aos meus pais, Sebastião e Shirley

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Leonardo Campos de Assis, pela orientação dedicada, segura e organização pertinente as ideias durante todas as etapas deste trabalho.

Aos professores: Dr. Adriano Dawson de Lima, Dr. José Roberto Delalibera Finzer, pelas valiosas contribuições referentes aos cálculos.

Ao Prof. Dr. David Maikel Fernandes pelas valiosas orientações no manuseio dos equipamentos do laboratório de operações unitárias da Universidade de Uberaba.

À Universidade de Uberaba.

À FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais pelo suporte.

Aos colegas Professores: Fernando Montandon, Klerverton Rodrigues, Marcelo Costa e. Florisvaldo Cardozo Bomfim, pelo incentivo nas horas mais oportunas.

Aos colaboradores Lucimar Paiva Gonçalves e Antônio Carlos de Faria responsáveis pelo suporte no laboratório de operações unitárias da Uniube, que foram sempre prestativos quando solicitados

SUMÁRIO

<u>LISTA DE FIGURAS</u>	ix
<u>LISTA DE TABELAS</u>	x
<u>1. INTRODUÇÃO</u>	1
<u>2. OBJETIVOS</u>	3
<u>2.1. Objetivos Específicos</u>	3
<u>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	4
<u>3.1. Produção de Batatas no Brasil</u>	4
<u>3.2. Transferência de Calor</u>	6
<u>3.2.1. Convecção</u>	7
<u>3.2.2. Condução</u>	7
<u>3.2.3. Radiação</u>	8
<u>3.3. Condutividade Térmica</u>	8
<u>3.4. Regimes de Transmissão de Calor</u>	9
<u>3.5. Mecanismos e etapas de secagem</u>	9
<u>3.6. Transferência de calor</u>	12
<u>3.7. Modelagem Matemática</u>	13
<u>3.7.1. Modelos Matemáticos no estudo de Secagem</u>	14
<u>3.8. Escurecimento enzimático</u>	16
<u>3.9. Densidade dos Sólidos pelo Princípio de Arquimedes</u>	17
<u>4. MATERIAIS E MÉTODOS</u>	18
<u>4.1. Materiais</u>	18
<u>4.2. Métodos</u>	20
<u>4.2.1. Determinação do teor de umidade da amostra</u>	20
<u>4.2.1.1. Secagem em Estufa</u>	21
<u>4.2.1.2. Secagem em Analisador de Umidade</u>	21

4.2.2.	<u>Desidratação das amostras</u>	22
4.2.3.	<u>Curva de Secagem</u>	22
4.2.4.	<u>Modelos matemáticos</u>	23
4.2.4.1.	<u>Método para obtenção dos coeficientes dos modelos</u>	24
4.2.5.	<u>Produção de farinha de batata desidratada</u>	24
4.2.5.1.	<u>Desidratação</u>	25
4.2.5.2.	<u>Moagem</u>	26
4.2.5.3.	<u>Análise Granulométrica – Distribuição das partículas</u>	27
4.2.6.	<u>O encolhimento volumétrico (Densidade das amostras)</u>	28
4.3.	<u>Avaliação do desempenho dos modelos</u>	29
4.4.	<u>Taxa de transferência de calor</u>	29
5.	<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	31
5.1.	<u>Percentual de umidade das amostras</u>	31
5.2.	<u>Curvas de secagem</u>	33
5.3.	<u>Análise granulométrica das partículas</u>	35
5.4.	<u>Densidade dos sólidos pelo princípio de Arquimedes</u>	37
5.5.	<u>Taxa de transferência de calor</u>	38
6.	<u>CONCLUSÕES</u>	39
7.	<u>REFERÊNCIAS</u>	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases de secagem	11
Figura 2 – Cultivares de Batata Monalisa (BRS Eliza) em (A); e Asterix (BRS Ana) em (B).	18
Figura 3 – Fatiador de 3mm em A; cortador de batata palito de 5mm em B; e Balança de precisão analítica em C.	19
Figura 4 – Estufa de desidratação com circulação mecânica modelo ORION – 520 – fabricante FANEM, em (A); Analisador de umidade Mettler Toledo – modelo HE53 em (B).	19
Figura 5 - Desidratador Pardal New Hobby.	20
Figura 6 – Amostra seca com vidro de relógio.	21
Figura 7 – Analisador de Umidade, (A) amostra com umidade e (B) amostra seca.	22
Figura 8 – Interior do desidratador Pardal evidenciando a triplicata das amostras em bandejas – (A) Axterix e (B) Monalisa.	23
Figura 9 – Amostra imersa na solução de bissulfito em A; cultivares no desidratador pardal em B.	25
Figura 10 – Amostras desidratadas.	26
Figura 11 - Liquidificador Oster Deligher, 6 Velocidades, 1,75 Litros.	26
Figura 12 – Farinha de batata Monalisa em A e Asterix em B com sem o escurecimento enzimático.	27
Figura 13 – Analisador de Granulometria.	27
Figura 14 – (A) Bequer com hidrocarboneto tolueno (C₇H₈), (B) – Amostra cultivar Asterix e (C) cultivar Monalisa ambos, durante a análise volumétrica.	28
Figura 15 – Lei de Fourier	30
Figura 16 – Curvas de secagem	33
Figura 17 – Farinha de batata desidratada dos cultivares Monalisa em A e Asterix em B.	35
Figura 18 – Análise Granulométrica.	36
Figura 19 – Curvas do encolhimento volumétrico da desidratação da batata Asterix em A e Monalisa em B. Fonte: Do autor, 2018	37

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 1: Estatística de produção da Batata Safra das Secas</u>	4
<u>Tabela 2 – Estatística de produção de Batata Safra das Águas</u>	5
<u>Tabela 3 – Percentual de umidade e tempo de secagem por método de radiação e convecção</u>	31
<u>Tabela 4 – Valores dos coeficientes dos modelos ajustados</u>	34
<u>Tabela 5 – Valores indicadores da qualidade dos modelos ajustados</u>	34

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo realizar um estudo sobre transferência de calor na secagem da batata (*Solanum Tuberosum*). Para os experimentos selecionou-se duas cultivares mais comercializadas: Monalisa e Asterix e utilizou-se modelagem matemática para o estudo de desidratação. O estudo da transferência de calor nos cultivares visa ajustes para redução de perdas de massa e energia e um produto com qualidade. Amostras em triplicata de ambas as cultivares foram secas a uma temperatura constante em estufa ventilada e em analisador de umidade. Após secagem, as amostras de ambas as cultivares foram trituradas e então submetidas à análise granulométrica. As curvas de secagem foram obtidas por regressão não linear e os coeficientes dos modelos determinados pelo método dos mínimos quadrados, utilizando os softwares R-Project e Matlab. Foram selecionadas quatro equações: Page, Herderson – Pabis, Lewis - Newton e Midilli Kucuk, conforme indicação da literatura. O modelo Midilli-Kucuk não apresentou ajuste. Já os demais modelos foram significativos e apresentaram um ajuste satisfatório. Entretanto, o modelo de Page foi o que apresentou o melhor ajuste para o erro residual padrão, para ambas as cultivares, portanto, é que representa melhor o processo. A análise granulométrica detectou diferença no tamanho das partículas, a cultivar Monalisa obteve tamanho menor do que a Asterix. Outro detalhe observado, foi a eficácia do bissulfito de sódio (NaHSO_3), o que evitou o escurecimento enzimático das amostras.

Palavras-chave: modelagem, transferência de calor, modelos empíricos, batata, secagem.

Abstract

The present work aimed to conduct a study on heat transfer in potato (*Solanum Tuberosum*) drying. We selected two cultivars most commercialized for the experiments: Monalisa and Asterix and used mathematical modeling for the study of dehydration. The study of heat transfer in cultivars aims reduces losses of mass and energy through process adjustments, and consequently a product of quality. Triplicate samples from both cultivars were dried at a constant temperature in a ventilated oven and in a moisture analyzer. After drying, samples from both cultivars were ground and then subjected to particle size analysis. Drying curves were obtained by nonlinear regression and the coefficients of the models determined by the least squares method, using R-Project and Matlab softwares. Four equations were selected: Page, Herderson - Pabis, Lewis - Newton and Midilli Kucuk, as indicated in the literature. The Midilli-Kucuk model showed no adjustment. The other models were significant and presented a satisfactory fit. However, the Page model presented the best adjustment for the standard residual error for both cultivars, therefore it represents the process better. The particle size analysis detected a difference in particle size, the cultivar Monalisa obtained smaller size than Asterix. Another detail observed was the effectiveness of sodium bisulfite (NaHSO_3), which prevented enzymatic browning of the samples.

Keywords: modeling, heat transfer, empirical models, potato, drying.

1. INTRODUÇÃO

A batata é originária do Peru, e fazia parte da alimentação da civilização Inca, sendo introduzida em outros países pelos conquistadores espanhóis no século XVI. A quantidade de variedades comestíveis soma um total de aproximadamente 4.000 e são encontradas principalmente na América do Sul, sendo que sua maior concentração é nos Andes. A batata é a terceira cultura alimentar mais importante do mundo, depois do arroz e do trigo, em termos de consumo humano. Mais de um bilhão de pessoas em todo o mundo comem batata, e a produção total mundial de culturas excede 300 milhões de toneladas. A batata é uma cultura crítica em termos de segurança alimentar em face do crescimento da população. Por exemplo, a China - maior consumidora de batatas do mundo, espera que 50% do aumento na produção de alimentos necessários para atender sua demanda nos próximos 20 anos, venha das batatas (CIP, 2018)

Como terceiro alimento básico do mundo, a batata desempenha um papel especial para a dieta da humanidade. A maior parte da produção da batata brasileira é comercializada *in natura* no mercado, sendo apenas 10% destinada ao processamento industrial, nas formas de pré-frita congelada, “chips” e batata palha. Entretanto, as mudanças de hábitos da população, que cada vez mais faz as suas refeições fora de casa, e a necessidade de produtos de maior praticidade e preparo mais rápido, tem afetado a forma de utilização da batata, resultando na redução do consumo doméstico e aumento do produto processado. Tanto no setor produtivo quanto o industrial se ressentem do alto custo de produção da batata no país, onde as cultivares estrangeiras, devido à falta de adaptação às condições do solo e do clima brasileiro têm um papel muito importante (BORTOLETTO, 2015).

As condições de vulnerabilidade de armazenamento da batata decorrem de quantidade de água no cultivar, fato que pode prejudicar o uso industrial. A secagem se apresenta como alternativa ao problema, permitindo qualidade para armazenagem por períodos mais prolongados e adequada ao processamento industrial. Desse modo, a secagem de produtos agrícolas é utilizada para diminuir o teor de água do produto, de forma a dificultar o crescimento microbiano e a ocorrência de reações químicas e bioquímicas, permitir o armazenamento por longos períodos (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001) e reduzir o volume e a massa para transporte (OLIVEIRA et al., 2015).

Por se tratar de um processo industrial, os custos envolvidos na secagem devem ser conhecidos e otimizados de modo a se obter maior eficiência. Com esse intuito, a utilização de modelos matemáticos para o estudo de secagem possibilita simular a interferência de variáveis relevantes no processo, tais como umidade do ar e temperatura do ar. A avaliação do tempo na estufa de secagem contribui para redução de custos, como também permite a otimização de todo o processo de transformação (PACHECO, 2003).

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi estudar a transferência de calor na secagem da batata para obtenção de farinha para fins agroindustriais

2.1. Objetivos Específicos

Analisar a transferência de calor no processo de secagem da batata.

Selecionar o modelo matemático que melhor se ajusta as curvas de secagem.

Produzir a farinha de batata e caracterizar a sua granulometria

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Produção de Batatas no Brasil

Segundo estudos do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA-Esalq/USP, a batata é produzida em todas as regiões do Brasil, com predominância na região do Paraná. Segundo recente pesquisa do mesmo, houve um aumento de 26% do cultivo de batatas na região do Triângulo Mineiro, passando de 8.200 área plantada para 10.300 hectares dos anos de 2016 para 2017. Simultaneamente a essa tendência, constatou-se também um decréscimo do cultivo da mesma na ordem de 40% nas regiões baianas de Mucugê e Chapada Diamantina.

Embora a pesquisa não se aprofunde nos fatores responsáveis pela redução do cultivo do tubérculo nas regiões citadas anteriormente, deve-se pressupor que fatores ambientais são as principais razões para a redução brusca de seu cultivo na região norte. É importante salientar que a pesquisa revela que o Triângulo Mineiro, mais precisamente as cidades de Araxá, Ibiá, Perdizes, Pedrinópolis, Sacramento, Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (MG) Tapira, Santa Juliana, Patrocínio, Iraí de Minas, Uberaba, Uberlândia, Rio Paranaíba e São Gotardo produziram 14.400 hectares de área plantada do tubérculo em 2016, enquanto que em 2017 cultivou 14.600, um aumento de 1% da área cultivada. Por isso, esta região se destaca na pesquisa representando a maior região de produção de batatas no Brasil.

Ainda na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, encontram-se as áreas com maior evolução do cultivo de batatas de 2016 para 2017. São as cidades de Araxá, Ibiá, Perdizes, Pedrinópolis, Sacramento, Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (MG) Tapira, Santa Juliana, Patrocínio, Iraí de Minas, Uberaba, Uberlândia, Rio Paranaíba e São Gotardo. Isso demonstra um domínio do cultivo da batata em Minas Gerais (Hortifruti, 2017), – apresentado na Tabela 1 para a época de estiagem e na Tabela 2 para o período chuvoso.

Tabela 1: Estatística de produção da Batata Safra das Secas

Safra das secas e safra de inverno (junho a novembro)		Área Plantada (ha)		
Região	Praças de Coleta	2016	2017	Variação (%)
Vargem Grande do Sul (SP) - inverno	Vargem Grande dos Sul, São João da Boa Vista, Mogi Guaçu, Aguaiá, Casa Branca, Santa Cruz das Palmeiras, Mococa, Itobi, São José do Rio Pardo e Porto Ferreira	10.300	12.040	17%

Sudoeste Paulista - seca	Capão Bonito, São Miguel Arcanjo, Pilar do Sul, Itapetinga, Tatuí e Paranapanema	2.350	2.350	0%
Sudoeste Paulista - inverno	Capão Bonito, São Miguel Arcanjo, Pilar do Sul, Itapetinga, Tatuí e Paranapanema	2.830	2.830	0%
Curitiba (PR)	Almirante Tamandaré, Araucária, Balsa Nova, Campo Tenente, Campo Largo, Campo Magro, Contenda, Fazenda Rio Grande, Lapa, Mandirituba, Paraquara, Quitandinha, Rio Negro e Ventania	2.700	2.700	0%
Ponta Grossa (PR)	Arapoti, Castro, Imbaú, Ipiranga, Iraí, Jaguariaiva, Ortigueira, Palmeira, Piraí do Sul, Ponta Grossa, Porto Amazonas, Reserva, São João do Triunfo, Telemaco Borba, Tabagi e Ventania	2.000	2.000	0%
São Mateus do Sul (PR)	União da Vitória, São Mateus do Sul, Antônio Olímpio, Paulo de Freitas e Paulo Frontin	1.300	1.000	-23%
Irati(PR)	Mallet, Rio Azul, Rebouças, Irati, Fernandes Pinheiro, Teixeira Soares, Imbituva, Guarimiranga e Inácio Martins	1.200	1.200	0%
Brasília (DF) e Cristalina (GO)	Brasília e Cristalina	6.300	6.900	10%
Mucugê (BA) e Chapada Diamantina (BA)	Mucugê e Chapada Diamantina	5.230	2.675	-49%
Sul de Minas Gerais (seca + inverno)	Sul de Minas Gerais	8.000	7.500	-6%
Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (MG)	Araxá, Ibiá, Perdizes, Pedrinópolis, Sacramento, Tapira, Santa Juliana, Patrocínio, Iraí de Minas, Uberaba, Uberlândia, Rio Paranaíba e São Gotardo	8.200	10.300	26%
Ibiraíaras (RS)	Ibiraíaras e Santa Maria	1.300	1.300	0%

Fonte: Hortifruti (2017)

Tabela 2 – Estatística de produção de Batata Safra das Águas

Safra das águas (dezembro a maio)		Área Plantada (ha)		
Região	Praças de Coleta	2016/17	2017/18	Variação (%)
Sul de Minas Gerais	Sul de Minas Gerais	9.500	8.500	-11%
Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (MG)	Araxá, Ibiá, Perdizes, Pedrinópolis, Sacramento, Tapira, Santa Juliana, Patrocínio, Iraí de Minas, Uberaba, Uberlândia, Rio Paranaíba e São Gotardo	14.400	14.600	1%
Guarapuava (PR) 1ª e 2ª safra	Guarapuava, Campina do Simão, Cândoi, Foz do Jordão, Pinhão, Prudentópolis e Reserva do Iguazu	5.000	5.000	0%
Curitiba (PR)	Agudos do Sul, Almirante Tamandaré, Araucária, Balsa Nova, Campo Tenente, Campo Largo, Campo Magro, Contenda, Fazenda Rio Grande, Lapa, Mandirituba, Piên, Piraquara, Quitandinha, Rio Negro e Tijucas	5.590	4.750	-15%
Ponta Grossa (PR)	Arapoti, Castro, Imbaú, Ipiranga, Iraí, Jaguariaiva, Ortigueira, Palmeira, Piraí do Sul, Ponta Grossa, Porto Amazonas, Reserva, São João do Triunfo, Telemaco Borba, Tabagi e Ventania	2.000	2.000	0%
Irati(PR)	Mallet, Rio Azul, Rebouças, Irati, Fernandes Pinheiro, Teixeira Soares, Imbituva, Guarimiranga e Inácio Martins	1.500	1.200	-20%
São Mateus do Sul (PR)	União da Vitória, São Mateus do Sul, Antônio Olímpio, Paulo de Freitas e Paulo Frontin	2.000	1.700	-15%
Santa Catarina	Água Doce (SC) e Palmas (PR)	5.450	5.450	0%
Rio Grande do Sul	Bom Jesus, São José dos Ausentes, Ibiraíaras, Santa Maria e São Francisco de Paula	7.800	7.000	-10%

Fonte: Hortifruti (2017)

3.2. Transferência de Calor

O fenômeno da transferência de calor ocorre quando dois ou mais corpos se encontram em temperaturas diferentes e são colocados em contato, ou em um mesmo local, fazendo com que a energia térmica de um corpo seja transferida para outro (CUSSLER, 2009)

Segundo Incropera (2008), transferência de calor é uma energia térmica em trânsito devido uma diferença de temperaturas no espaço. Ainda, quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido, usa-se o termo condução para referir-se à transferência de calor que ocorrerá através do meio. Em contraste, o termo convecção se refere à transferência de calor que ocorrerá entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles estiverem a diferentes temperaturas. O terceiro modo de transferência de calor é a radiação térmica. Todas as superfícies com temperatura não nula emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Desta forma, na ausência de um meio interposto participante, há transferência de calor líquida, por radiação, entre duas superfícies de diferentes temperaturas.

A Lei de Fourier, afirma que o calor trocado por condução em uma certa direção é proporcional a área normal à direção e ao gradiente de temperaturas na tal direção, conforme Equação 1:

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta t}{L} \quad (1)$$

Em que A é área da superfície (m^2); ΔT é a variação de temperatura ($^{\circ}C$) e dx é a espessura do material (m).

Com uma nova dedução, da Equação 1, temos k que é uma constante positiva denominada Condutividade Térmica, que é uma propriedade termodinâmica do material, conforme Equação 2:

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Em que k é condutividade térmica do meio em $W/m^{\circ}C$

Utilizando o conceito de Fluxo de Calor, que é a taxa de troca de calor por unidade de área (W/m^2), tem-se que (Equação 3):

$$\frac{q}{A} = q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

O sinal negativo é posto para garantir que o fluxo de calor seja positivo no sinal positivo de x .

3.2.1. Convecção

A convecção é o modo mais comum de secagem de sólidos particulados ou em forma de folha ou pastosos. O calor é alimentado por ar ou gás aquecido que flui sobre a superfície do sólido. O calor para evaporação é fornecido por convecção para a superfície exposta do material e humidade evaporada levada pelo meio de secagem (MUJUMDAR, 2015).

Incropera (2008), afirma que o modo de transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos. Além da transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão), a energia também é transferida através do movimento global, ou macroscópico, do fluido. Esse movimento do fluido está associado ao fato de que, em um instante qualquer, um grande número de moléculas está se movendo coletivamente ou como agregado. Este movimento contribui para transferência de calor.

3.2.2. Condução

Segundo Incropera (2008), a condução é o processo de transferência de energia de um meio material, sem que ocorra o transporte de matéria ou seja, a energia ser propaga das partículas mais energéticas para as menos energéticas do 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. Ocorre principalmente nos materiais sólidos.

Secadores de condução ou indiretos são mais apropriados para produtos finos ou para sólidos muito molhados. O calor para evaporação é fornecido através de superfícies

aquecidas (estacionárias ou em movimento) colocado dentro do secador para apoiar, transportar ou confinar os sólidos. A umidade evaporada é transportada afastada por operação a vácuo ou por um fluxo de gás que é principalmente um transportador de umidade. Operação a vácuo é recomendada para sólidos sensíveis ao calor. Porque a entalpia¹ perdida com o ar de secagem em secadores convectivos é grande, sua eficiência térmica tende a ser baixa. Para secadores de condução a eficiência térmica é maior (MUJUMDAR, 2015).

3.2.3. *Radiação*

A radiação pode ser usada para aquecer o sólido volumetricamente, reduzindo assim resistência à transferência de calor. A radiação térmica, também conhecida como irradiação, é uma forma de transferência de calor que ocorre por meio de ondas eletromagnéticas. Como essas ondas podem propagar-se no vácuo, não é necessário que haja contato entre os corpos para haver transferência de calor. Todos os corpos emitem radiações térmicas que são proporcionais à sua temperatura. Quanto maior a temperatura, maior a quantidade de calor que o objeto irradia. Devido ao alto custo no investimento e no operacional, essa técnica é útil para secar produtos de alto valor unitário ou para correção final do perfil de umidade em pequenas quantidades de umidade (MUJUMDAR, 2015).

A radiação térmica é conhecida com a energia emitida pela matéria que se encontra em uma temperatura não-nula. Independente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria (INCROPERA, 2008).

3.3. **Condutividade Térmica**

Segundo Berk (2009), a condutividade térmica é uma propriedade física do material. Ela indica a quantidade de calor que fluirá através de uma área unitária se o gradiente de temperatura for unitário. Assim a condutividade térmica k é numericamente

¹ Medida da variação de calor quando a pressão de um sistema é considerada constante.

igual a quantidade de calor em Joules que passa num segundo através de uma área unitária (1m^2) do corpo, numa queda de temperatura de 1K , sobre o trajeto de um metro (1m) do fluxo de calor.

3.4. Regimes de Transmissão de Calor

A transmissão de calor pode ser classificada como sendo de regime transiente ou permanente. Isto significa que o termo permanente aplica-se quando não haverá variações no tempo, enquanto no regime transiente, considera-se a problemas que tenham variação no tempo ou que sejam dependentes do tempo (INCROPERA, 2008)

3.5. Mecanismos e etapas de secagem

Na maioria dos processos de desidratação de alimentos, o ar é o meio de secagem. Embora o ar seco seja, em si, uma mistura de gases (nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, entre outros.), considera-se o ar úmido como constituído apenas por dois componentes: ar seco e vapor de água. (BERK, 2009)

Secagem é a operação por meio da qual a água ou qualquer outro líquido é removido de um material. O conteúdo de água de um alimento é o principal fator causador da deterioração por microrganismos e alterações por reações químicas e enzimáticas. A diminuição de água é um modo de conservação do alimento, no entanto quanto maior a umidade final, mais macia a consistência do produto – qualidade apreciada em um produto desidratado. Deve-se ponderar os dois fatores na secagem do alimento, para obter um produto de qualidade e com uma vida útil elevada. Em um processo de secagem, define-se a variação do conteúdo de umidade a ser alcançada (CELESTINO, 2010).

Não existe uma maneira simples de classificar o equipamento de secagem. Alguns secadores são contínuos e alguns operam em lotes; alguns agitam os sólidos, e alguns são essencialmente não agitados. A operação sob vácuo pode ser usada para reduzir a temperatura de secagem. Alguns secadores podem ter quase todo tipo de material. Enquanto outros estão severamente limitados no tipo de alimentação que podem aceitar. Uma divisão principal pode ser feita entre (1) secadores nos quais o sólido é diretamente exposto ao gás quente (geralmente ar) e (2) secadores nos quais o calor é

transferido para a solução sólida de um meio externo como vapor condensado, geralmente através de uma superfície de metal com o sólido está em contato. Os secadores que expõem os sólidos a um gás quente são chamados secadores adiabáticos ou diretos; aqueles em que o calor é transferido de um meio externo são conhecidos como secadores não adiabáticos ou indiretos. Os secadores aquecidos por energia elétrica, radiante ou por micro-ondas também são não-adiabáticos. Algumas unidades combinam secagem adiabática e não adiabática; eles são conhecidos como secadores direto-indiretos. A maioria dos secadores industriais manipula sólidos particulados durante parte ou todo o ciclo de secagem, embora alguns, sequem grandes peças individuais, como cerâmica ou folhas de polímero. Os secadores podem ser classificados em: (1) Secador de leito estático; (2) Secador onde o ar percola o leito; (3) Secador rotativo (4) Secador de leito fluidizado; e (5) Secador de flash (MCCABE, 1993).

Existem diversos tipos de secadores, cada um com aplicabilidades específicas. No processamento de alimentos, a retenção de qualidade do produto constitui o principal critério de seleção. Menos ênfase é dada à otimização energética, sobretudo quando o objetivo é obter produtos homogêneos que apresentam conteúdo de umidade uniforme (FINZER, 1989).

A qualidade de produtos desidratados depende muito das condições de secagem. Um dos efeitos da secagem rápida é a ocorrência de tensões localizadas nos corpos durante a secagem, devido às contrações anisotrópicas (dureza, resistência mecânica, refração da luz) que ocorrem durante a eliminação de umidade. Como resultado, surgem nos corpos regiões tensionadas ou outras comprimidas, o que geralmente conduz à formação de fissuras ou fraturas (FINZER, 1989).

Existem dois métodos de remoção de umidade não ligada: evaporação e vaporização. Evaporação ocorre quando a pressão de vapor da umidade na superfície sólida é igual a pressão atmosférica. Isso é feito elevando a temperatura da umidade até o ponto de ebulição. Esse tipo de fenômeno ocorre em secadores de rolos. Se o material seco é sensível ao calor, então a temperatura de evaporação, isto é, ponto de ebulição, pode ser reduzido diminuindo a pressão (evaporação a vácuo). Se a pressão reduzir abaixo do ponto triplo, então nenhuma fase líquida pode existir e a umidade no produto é congelada. A adição de calor faz com que a sublimação do gelo seja transformada em vapor de água, como no caso da liofilização (todo conteúdo de água do produto é

congelado. A vaporização, é a secagem realizada por convecção, isto é, passando o ar quente sobre o produto. O ar é resfriado pelo produto e umidade é transferida para o ar pelo produto e arrebatado. Neste caso, a pressão de vapor de saturação da umidade sobre o sólido é menor do que o pressão atmosférica (MUJUMDAR, 2015).

O comportamento de secagem de sólidos pode ser caracterizado medindo-se a perda de umidade em função de tempo. Produtos higroscópicos podem se comportar de maneira diferente na secagem de acordo ao seu teor de umidade. Em geral, as fases de secagem ocorrem como a ilustração apresentada na Figura 1.



Figura 1 – Fases de secagem

Fonte: Mujumdar (2015)

Segundo Mujumdar (2015), quando as curvas da taxa de secagem são determinadas, surgem uma série de condições para um determinado sólido, o que faz com que estas curvas pareçam semelhantes geometricamente, isto devido a uma função do grau de ocorrência da secagem. Então, surge a necessidade da normalização em relação a taxa de secagem inicial e ao teor médio de umidade. Daí, pode-se transformar todas as curvas em uma curva única, determinando assim, a característica de uma determinada substância. Essa é a curva de secagem característica. As variáveis normalizadas, a taxa de secagem característica f (Equação 4) e o teor característico de umidade Φ (Equação 5) são definidos por:

$$f = \frac{N_v}{N_w} \quad (4)$$

e

$$\phi = \frac{\bar{X} - X^*}{X_g - X^*} \quad (5)$$

Onde:

N_v : é a taxa de secagem para uma superfície unitária;

N_w : é a taxa de secagem inicial;

\bar{X} : umidade média do corpo, corresponde ao valor de ponto crítico X_{cr} ;

X^* : umidade de equilíbrio.

Se o comportamento de secagem de um sólido deve ser descrito por uma curva característica, suas propriedades devem satisfazer os dois critérios seguintes:

- O teor crítico de umidade X_{cr} é constante e independente do teor de umidade inicial e condições externas;
- Todas as curvas de secagem para uma substância específica são geometricamente semelhantes para que forme uma curva única e independente das condições externas.

3.6. Transferência de calor

Transferência de calor por condução é a transferência de energia através de uma substância, sólido ou fluido, como resultado da presença de um gradiente de temperatura dentro da substância. Para obter a taxa de transferência de calor por condução será aplicada a lei de Fourier, dada pela Equação 6:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Considerando-se o fluxo de calor nas três direções de um corpo isotrópico tipo paralelepípedo retangular, tem-se (Equação 7):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

Onde $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ é a difusividade térmica².

Tillmann, Guimarães e Silva (2005) descrevem que a difusividade térmica mede a capacidade do material de conduzir a energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la. Já a condutividade térmica fornece uma indicação da taxa segundo a qual a energia é transferida pelo processo de difusão.

3.7. Modelagem Matemática

Modelo matemático é um conjunto de símbolos e relações matemáticas que representam de alguma forma um objeto estudado (BASSANEZI, 2014). A importância do modelo matemático consiste em se ter uma linguagem concisa que expressa ideias de maneira clara e sem ambiguidades, além de proporcionar uma quantidade elevada de resultados teoremas que propiciam o uso de métodos computacionais para calcular suas soluções numéricas. Os modelos matemáticos tem sido objeto de vários estudos e tem o propósito de representar os processos por meio de equações que solucionem e otimizem problemas (GOLDBARG; LUNA, 2005).

Os modelos matemáticos podem ser formulados de acordo com a natureza dos fenômenos ou situações analisadas e classificados conforme o tipo de matemática utilizada: 1. Linear ou não linear, conforme suas equações básicas tenham estas características; 2. Estático, quando representa a forma do objeto; 3 Educacional, quando é baseado em um número pequeno ou simples suposições tendo, quase sempre, soluções analíticas (BASSANEZI, 2014).

A modelagem matemática é um aspecto muito importante da tecnologia de secagem, que permite ao pesquisador escolher condições operacionais adequadas para o

² Propriedade específica do material, que o caracteriza quanto a condução instável de calor, ou seja, é o valor que irá descrever o quão rapidamente o material irá reagir às mudanças de temperatura. (MUJUMDAR, 2015)

método escolhido de secagem e, se necessário, aplicar procedimentos de ampliação (MUJUMDAR, 2015).

3.7.1. Modelos Matemáticos no estudo de Secagem

Vários pesquisadores aplicaram a modelagem matemática para analisar as curvas de secagem.

A partir da modelagem matemática pode-se determinar as propriedades termodinâmicas de um produto. Corrêa et al. (2010) utilizaram a determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica L.*) durante o processo de secagem. Naderinezhad et al. (2015) trabalharam com modelagem matemática de secagem de fatias de batata em um secador convectivo forçado baseado em parâmetros importantes como: a) Experimentos com diferentes velocidades médias (1,6 e 1,81 m s⁻¹); b) Diferentes temperaturas (45, 50, 55, 60, 65 e 70 ° C) e c) Diferentes formas de amostras (quadrado e círculo com a mesma área da seção transversal)

A modelagem pode ser utilizada para verificação do desempenho de transferência de massa utilizando o ar quente. Zhu e Jiang (2014) trabalharam com modelagem do desempenho de transferência de massa de secagem ao ar quente de fatias de batata-doce (*Ipomoea Batatas L.*). Em processos de secagem convectivos a modelagem matemática pode ser trabalhada com base em parâmetros,

Oliveira et al. (2015) utilizaram modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morango, sendo utilizado como parâmetros, a temperatura do ar seco, a modelagem matemática baseada em parâmetros estatísticos, os valores de entalpia e entropia decrescendo com o aumento da temperatura e a energia de Gibbs³.

Prakash, Kumar e Tekasakul (2017) utilizaram análise ambiental e modelagem matemática de secadores de batatas em secador de estufa solar modificada com base em parâmetros estatísticos.

Diversos modelos matemáticos têm sido usados para estudar a modelagem matemática da cinética de secagem. Ainda, o formato da amostra interfere no processo de desidratação, pode afetar no tempo de secagem. Sendo que a forma da amostra quadrada

³ Quando um sistema recebe calor e aumenta sua energia interna, o mesmo se aquece, isto é, aumenta sua entalpia, sem a necessidade da realização do trabalho ou tornando o trabalho realizado desprezível (ORNELLAS, 2006)

desidratará mais rapidamente do que a forma em círculo. Também constata-se que a regressão não linear é o método de análise mais comum para determinação dos valores dos coeficientes (NADERINEZHAD et al., 2015; ZHU; JIANG, 2014)

Para os experimentos, foram selecionados quatro modelos matemáticos para ajuste de curvas de secagem Quadro 1.

O primeiro foi o modelo de **Page** devido a sua simplicidade e amplo uso, principalmente no estudo de secagem de produtos agrícolas (SANCHEZ, 2014).

O modelo de **Page** foi utilizado por Santos (2009) para secagem de sementes de girassol via convecção forçada de ar aquecido e via radiação infravermelho. Com base nos critérios estatísticos, este modelo mostrou-se ser o mais adequado na representação de ambos os processos.

Quadro 1- Modelos matemáticos adotados

Modelo	Equação
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$
Midili - Kucuk	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot (t^n)) + bt$
Henderson - Pabis	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
Newton e Lewis	$RU = \exp(-k \cdot t)$

Fonte: (DA SILVA MORAIS et al., 2013)

Carlesso, (2007) aplicou o modelo de **Page** para secagem da camada fina de semente de maracujá amarelo. Concluindo que este modelo representou melhor a curva de secagem comparado ao modelo exponencial.

Reis et al. (2011) utilizaram para secagem da pimenta Cumari do Pará e o modelo de **Midili** foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, onde os valores do coeficiente de difusão aumentaram de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem.

Martinazzo et al. (2007) fizeram uma análise e descrição da cinética de secagem das folhas de capim-limão e constatou que o modelo de **Midili**, que melhor descreveu as curvas de secagem.

Mota; Moreira; Cunha, (2016) fizeram uma análise trabalhando com os mesmos modelos deste estudo na inserção de etanol no processo de secagem da casca de batata e o modelo cinético Midili mostrou-se ser o mais favorável a temperatura de 60°C sem a aplicação de etanol.

(Filho et al., 2016) trabalharam modelagem matemática para descrição da cinética de secagem da polpa da manga *cv.* Espada. O modelo de Henderson foi o que respondeu de forma mais satisfatória com relação ao coeficiente de determinação e o desvio quadrático de três temperaturas.

Souza et al. (2015) realizaram estudos no processo de secagem e de cinética de secagem de folhas de *Ziziphus joazeiro*, e o modelo de Henderson foi o que melhor se ajustou aos processos experimentais.

Cardoso et al. (2017) fizeram uma análise da cinética e modelagem matemática da secagem da polpa de buriti (*Mauritia flexuosa L.*) e o modelo de Newton sob temperatura de aproximadamente 60°C apresentou o maior valor para o erro médio relativo.

3.8. Escurecimento enzimático

O escurecimento é iniciado pela oxidação de compostos fenólicos pela polifenoloxidase PPO. O produto inicial da oxidação é a quinona, que rapidamente se condensa, formando pigmentos escuros insolúveis, denominados melaninas, ou reage não enzimaticamente com outros compostos fenólicos, aminoácidos e proteínas, também formando melanina (ARAÚJO, 2014)

Segundo Tomás Barberán e Spín (2001) duas enzimas são relevantes na degradação oxidativa dos compostos fenólicos por causarem a produção de polímeros de coloração marrom (melaninas): a polifenoloxidase (PPO) e a peroxidase (POD). Estas provocam o escurecimento dos produtos minimamente processados.

3.9. Densidade dos Sólidos pelo Princípio de Arquimedes

Segundo Montanheiro (1990) o princípio de Arquimedes determina que, todo corpo, parcial ou totalmente submerso em um líquido, fica sujeito a uma força de empuxo do líquido, de direção vertical, de baixo para cima, e com intensidade igual ao peso do líquido deslocado. Para a determinação da densidade das amostras durante o processo de desidratação, utilizaremos este princípio.

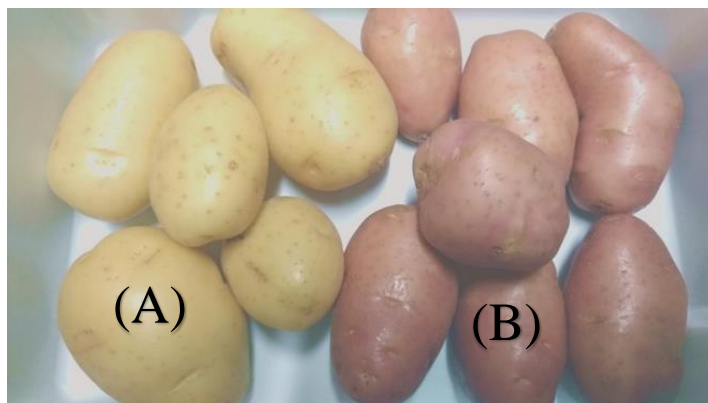
4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para os experimentos o programa de Mestrado Profissional em Engenharia Química, ofertado pela Universidade Uberaba, disponibilizou toda a infraestrutura do seu laboratório de operações unitárias.

4.1. Materiais

Selecionou-se os cultivares para o experimento segundo Bortoletto et al. (2015), de batata Monalisa (BRS Camila) e Asterix (BRS Ana) que foram adquiridas no varejo local, na cidade de Uberaba-MG, como representado na Figura 2. A seleção dos cultivares se baseou nas variedades mais comercializadas para o consumo.

Figura 2 - Cultivares de Batata Monalisa (BRS Eliza) em (A); e Asterix (BRS Ana) em (B).



Fonte: Autor, 2018.

Utilizou-se equipamentos para preparo das amostras, apresentados na Figura 3 em que se ilustra o fatiador de 3mm (A), o cortador de 5mm (B) e a balança analítica (C); e, em seguida os dispositivos de secagem das amostras, notadamente apresentados na Figura 4, onde se destacam a estufa em (A) e o analisador de umidade em (B).

Utilizou-se dois métodos de secagem para determinação do teor de umidade presente em cada cultivar.

Figura 3 - Fatiador de 3mm em A; cortador de batata palito de 5mm em B; e Balança de precisão analítica em C.



A



B



C

Fonte: Autor, 2018.

Figura 4 - Estufa de desidratção com circulação mecânica modelo ORION – 520 – fabricante FANEM, em (A); Analisador de umidade Mettler Toledo – modelo HE53em (B)



A



B

Fonte: Autor, 2018.

Ambas as amostras foram colocadas em dessecadores por mais 20 minutos.

Após a determinação da umidade das substâncias analisadas, iniciou-se os procedimentos de desidratação monitorada para coleta de dados utilizados no ajuste dos modelos selecionados para o estudo da etapa de secagem. Os dados coletados foram a massa da amostra e o intervalo de tempo da medida (de 1 em 1 hora). A temperatura foi fixada em regime permanente, a 60° C. Na Figura 5 está ilustrado o desidratador Pardal utilizado.

Figura 5 - Desidratador Pardal New Hobby.



Fonte: Autor, 2018

4.2. Métodos

Esta seção está organizada de forma a apresentar os métodos empregados em experimentação para ajuste dos modelos aplicados ao processo de secagem de alimentos, bem como sua avaliação.

4.2.1. Determinação do teor de umidade da amostra

A secagem foi utilizada para determinação do teor de umidade da amostra. Utilizou-se o Analisador de umidade, fundamentado no princípio da radiação e a estufa, fundamentado no princípio da convecção.

4.2.1.1. *Secagem em Estufa*

Os vidros de relógio foram identificados como V1, V2 e V3 para o cultivares BRS-Camila e V4, V5 e V6 para o cultivares BRS-Ana. Os pesos das amostras seca e úmida são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Amostra seca com vidro de relógio.



Fonte: Autor, 2018

Para esta etapa, utilizamos o método de Vinicius (2012) que consiste em utilizar estufa de ventilação de ar forçada (105°C) por 24 horas. Após este período, retirou-se as amostras e efetuou-se nova pesagem e em seguida, ambas as amostras foram reinseridas na estufa por mais uma 1 hora e 40 minutos. Após este período, as amostras foram novamente pesadas, onde constatou-se a massa se tornou constante, isto é, não houve mais perda de água.

4.2.1.2. *Secagem em Analisador de Umidade*

Ligou-se o aparelho, ajustou-se a temperatura para 105°C. Em seguida, pegou-se o prato de alumínio, inseriu-o no suporte e fez-se a pesagem do mesmo, tarou-se e imediatamente, descascou-se o cultivares de batata Monalisa RBS Camila, utilizando o método de Barbosa (2011) levou-se ao cortador manual para corte tipo palito e em cubo e logo após, separou-se uma amostra em cubo e a inseriu no prato. Registrado o peso da amostra juntamente com o prato, iniciou-se o processo de aferição da primeira amostra da triplicata dos cultivares em questão. Para facilitar a identificação das amostras da triplicata, utilizamos P1, P2 e P3. O mesmo procedimento foi feito para a triplicata das

amostras do cultivares Asterix RBS Ana, sendo utilizada as identificações P4, P5 e P6. Na Figura 7 verifica-se a aparência da amostra antes (A) e após (B) a etapa de secagem no analisador de umidade.

Figura 7 – Analisador de Umidade, (A) amostra com umidade e (B) amostra seca.



Fonte: Autor, 2018

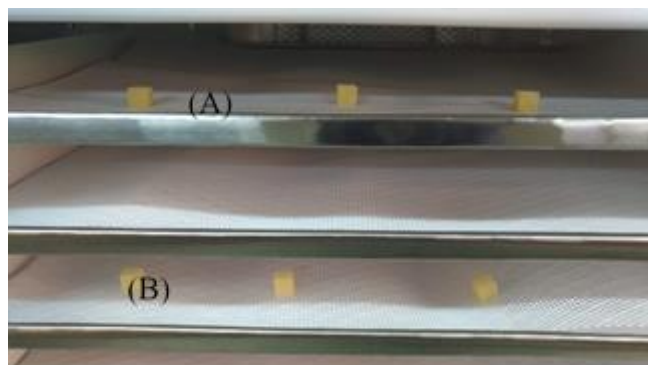
4.2.2. Desidratação das amostras

As amostras das cultivares Asterix e Monalisa foram desidratadas em desidratador Pardal, por 10 horas, à temperatura de 60°C. As amostras foram pesadas a cada 1 hora, até massa constante.

4.2.3. Curva de Secagem

Para a determinação das curvas de secagem as duas cultivares foram cortadas em cubo com a medida de 1cm² depois, foram dispostas em bandejas do desidratador Pardal, modelo New Hobby, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Interior do desidratador Pardal evidenciando a triplicata das amostras em bandejas – (A) Axterix e (B) Monalisa.



Fonte: Autor, 2018

A desidratação foi realizada à 60° C, por um período de 10 horas. Para verificação da perda de massa, foi utilizada a balança semi-analítica Bel Engineering – Modelo Mark Classe II, capacidade máxima de 500 g e sensibilidade de 0,001 g. O monitoramento e a pesagem, foram feitos de uma em uma hora até atingir o equilíbrio higroscópico. Inicialmente, o desidratador foi colocado em funcionamento, configurado para a temperatura de 60°C, seguindo as orientações no visor sobre as temperaturas de desidratação para os tipos de alimentos.

O equilíbrio higroscópico foi alcançado partir da nona e décima pesagem, sendo que as perdas de massa foram registradas em planilhas de controle, e conseqüentemente utilizadas na determinação das curvas de secagem e ajuste dos modelos.

4.2.4. Modelos matemáticos

O Quadro 1 apresenta os modelos estudados, selecionados a partir de consulta em literatura técnica especializada sobre modelagem matemática aplicada à desidratação de alimentos.

Quadro 1- Modelos matemáticos adotados

Modelo	Equação
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$

Midili - Kucuk	$RU = a. \exp(-k. (t^n)) + bt$
Henderson - Pabis	$RU = a. \exp(-k. t)$
Newton e Lewis	$RU = \exp(-k. t)$

Fonte: (DA SILVA MORAIS et al., 2013)

Em que: RU: razão de umidade do produto, adimensional; k , n : constantes de secagem; a e b : coeficiente dos modelos; t : tempo de secagem.

Para o cálculo da razão de umidade (RU) no processo de secagem em diferentes temperaturas, utiliza-se a expressão:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (8)$$

U: teor de água do produto, decimal b.s.

U_i : teor de água inicial do produto, decimal b.s.

U_e : teor de água de equilíbrio do produto, b.s.

b.s.: base seca

4.2.4.1. Método para obtenção dos coeficientes dos modelos

Diversos modelos matemáticos têm sido usados para estudar a modelagem matemática de a cinética de secagem. Ainda, a regressão não linear é o método de análise mais comum para determinação dos valores dos coeficientes. Também detectou-se que a forma da amostra o tempo de secagem de cubos é inferior ao de fatias de batata quando avaliados sob as mesmas condições por causa da maior área de superfície lateral (NADERINEZHAD et al., 2015; ZHU; JIANG, 2014)

4.2.5. Produção de farinha de batata desidratada

A batata sofre um processo que degrada seu aspecto por oxidação causada pelo escurecimento enzimático. Este processo deve ser evitado para não comprometer a qualidade final do produto em relação à sua aparência para fins comerciais.

4.2.5.1. Desidratação

Antes da desidratação, para evitar o escurecimento enzimático, as amostras foram imersas em solução antioxidante, conforme o método descrito por (PEREIRA, 2009) onde, os tubérculos foram imersos em bissulfito de sódio (NaHSO_3) a 200 ppm por 6 minutos (Figura 13), inibindo o escurecimento enzimático.

Em seguida, ambas amostras das cultivares foram submetidas ao processo de desidratação a temperatura de 60 °C por um período de 10 horas, em desidratador de circulação de ar forçada, modelo New Hobby Digital. Em seguida, ambos cultivares foram acondicionados em embalagem do tipo zip, Figura 10, posteriormente, passarem pelo processo de trituração e granulometria.

Figura 9 - Amostra imersa na solução de bissulfito em A; cultivares no desidratador pardal em B



. Fonte: Autor, 2018

Figura 10 – Amostras desidratadas.



Fonte: Autor, 2018

Após a secagem as amostras foram trituradas e submetidas ao teste de granulometria, especificamente, para determinar o diâmetro da partícula.

4.2.5.2. Moagem

Para o processo de trituração dos cultivares foi utilizado o método de Freitas e Silva (2007), liquidificador Oster Delighter, 6 Velocidades, 1,75 Litros, por um período de 10 minutos para cada cultivar, como mostra a Figura 11

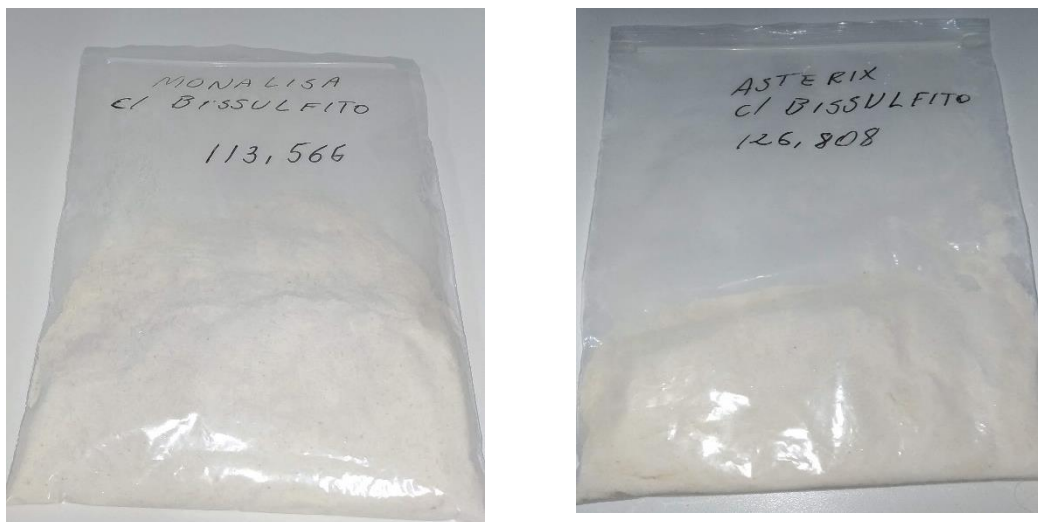
Figura 11 - Liquidificador Oster Delighter, 6 Velocidades, 1,75 Litros.



Fonte: Autor, 2018

Em seguida, as farinhas foram acondicionadas em embalagem do tipo zip, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Farinha de batata Monalisa em A e Asterix em B com sem o escurecimento enzimático.



A

B

Fonte: Autor, 2018

4.2.5.3. Análise Granulométrica – Distribuição das partículas

Para a determinação do tamanho das partículas das farinhas foi utilizado analisador de partículas (Ber Tel) composto por 7 peneiras, cujas aberturas variaram de 0,425 mm a 4,75 mm (Figura 13).

Figura 13 – Analisador de Granulometria.



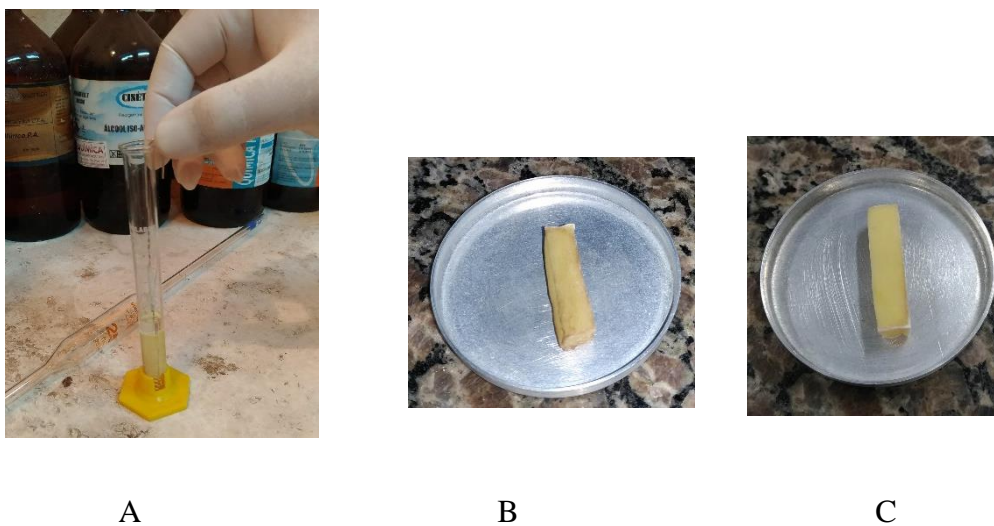
Fonte: Autor, 2018

Para cada cultivar de farinha foram utilizados respectivamente: cultivar Asterix foi de 126,803g de e para o cultivar Monalisa foi de 113,561g, em agitação por 15 minutos na velocidade máxima, anotando-se a quantidade de amostra retida em cada peneira (CEREDA.; CATÂNEO, 1986).

4.2.6. O encolhimento volumétrico (*Densidade das amostras*)

Para este procedimento utilizamos o método de Nazareth e Montanheiro (1990), que trabalhou com o princípio de Arquimedes. Neste experimento para determinação da densidade de sólidos, a água foi substituída pela solução de hidrocarboneto tolueno (C_7H_8), método utilizado por Bergold e Schirmer (1997) pois, as amostras não poderiam absorver a solução quando imersas. Foram separadas quatro amostras de cada cultivar. Depois, ambas foram inseridas no desidratador Pardal por 4 horas como mostra a Figura 14. Sendo que, a cada 1 hora, cada amostra era submetida ao processo, anotados os dados e posteriormente, descartada.

Figura 14 - (A) Bequer com hidrocarboneto tolueno (C_7H_8), (B) – Amostra cultivar Asterix e (C) cultivar Monalisa ambos, durante a análise volumétrica.



Fonte: Autor, 2018

Para realização da modelagem, foi calculado o logaritmo neperiano do volume encontrado de forma que o sistema se tornasse linear conforme equação 9:

$$v(t) = b \cdot e^{k \cdot t} \quad (9)$$

Onde: v é volume; b é amplitude; k é uma constante

4.3. Avaliação do desempenho dos modelos

Adotou-se como critério para avaliação dos modelos o coeficiente de relação (3) e o erro-padrão (4).

O coeficiente de correlação (R) é uma medida do grau de associação linear entre duas variáveis. O R varia de -1,0 a 1,0. Quando zero significa correlação nula e quando 1,0 ou -1,0, correlação perfeita entre as variáveis. Para uma dada amostra com n pares de valores das variáveis X e Y, para medir o grau de correlação entre elas, determina-se o coeficiente de Pearson numericamente representado pela equação 3.

$$R = \frac{\sum X.Y - \frac{\sum X \sum Y}{n}}{\sqrt{\left[\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}\right] \cdot \left[\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}\right]}} \quad (10)$$

O erro residual (RSE) padrão é a medida de erro da estimativa do modelo de regressão representado pela equação 4.

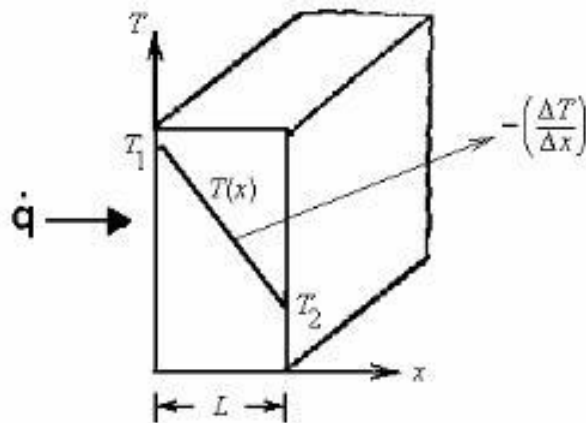
$$RSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad (11)$$

4.4. Taxa de transferência de calor

A transferência de calor é energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios ocorrerá transferência de calor. Um corpo nunca contém calor, mas calor é identificado com tal quando cruza a fronteira de um sistema. O calor é, portanto, um fenômeno transitório, que cessa quando não existe mais uma diferença de temperatura. (Incropera, 2008)

Baseado na Lei de Fourier temos figura 15.

Figura 15 – Lei de Fourier



Fonte: Incropera (2008)

Com isto, temos a equação: $q(x) = -kA \frac{dt}{dx}$ onde:

$$dt = t1 - t2$$

$t1$: temperatura final de 60°C (temperatura no desidratador);

$t2$: temperatura inicial 27°C (temperatura ambiente)

A : área corresponde a 1cm^2 ou $0,0001\text{m}$;

dx : comprimento 1cm ou $0,01\text{ m}$;

k : condutividade térmica da parede é de $0,69\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$

Temos que:

$$q_x = (0,69\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}) \times (0,0001\text{m}) \times ((60^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}) / 0,01\text{m}) = 0,2277\text{W}$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Percentual de umidade das amostras

As amostras foram pesadas e, após o período de secagem, foram retiradas do dissecador e novamente pesadas em balança de precisão analítica dupla escala. Posteriormente determinados a média de umidade da amostra e o desvio padrão, conforme Tabela 3, que também apresenta os valores percentuais das amostras determinado pelo analisador de umidade.

Os percentuais de umidade das amostras determinado pelo analisador de umidade estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Percentual de umidade e tempo de secagem por método de radiação e convecção

Cultivar	Método de convecção - Estufa		Método de radiação - Analisador de Umidade	
	% de umidade: $\mu \pm \sigma$	Tempo de secagem (s)	% de umidade: $\mu \pm \sigma$	Tempo de secagem (s)
Monalisa	84,25% \pm 0,648	92460,0	82% \pm 0,015	275,833
Asterix	80,71% \pm 0,588	92460,0	77% \pm 0,019	300,000

Fonte: Autor, 2019

Percebe-se que houve diferença entre os métodos de secagem, porém não foi possível determinar se estatisticamente significativa. A amostra da mesma substância seca pelos diferentes dispositivos apresentou também distintos valores de umidade. Para a cultivar Monalisa a diferença de umidade foi de 2,25% entre o método de secagem por convecção (estufa) e o método de secagem por radiação (analisador de umidade), com maior teor de umidade percentual detectada pelo primeiro, com 84,25%. Para a cultivar Asterix, a umidade percentual determinada pelo método de secagem por convecção também foi superior àquela registrada pelo método de radiação, com diferença de 3,71% para mais no caso da estufa. Em relação ao desvio padrão, percebe-se valores muito menores para o método de secagem por radiação. Deve-se considerar que este resultado

era esperado pois é próprio da termogravimetria, em que as medições de massa são efetuadas constantemente durante o funcionamento do aparelho, ou seja, o n é expressivamente elevado.

Convém destacar o tempo necessário para determinação da umidade por cada método é muito diferente. O método de secagem por convecção consome mais tempo do que o método de secagem por radiação (Tabela 3). Nascimento (2014), trabalhou com os métodos de convecção e radiação, ao conduzir sua pesquisa no processo de secagem de grãos de *moringa oleífera lam*, e concluiu que a temperatura do ar e o tempo de aplicação da radiação infravermelha interferiram de forma significativa na elevação da temperatura do ar no interior do secador e na temperatura dos grãos de *Moringa oleífera Lam*. Para secagem de sementes de girassol via radiação infravermelho e convecção forçada de ar aquecido, em termos de eficiência energética, o secador infravermelho mostrou-se mais eficiente do que a estufa de convecção forçada, o que resultou em uma economia de energia de 50 a 62% para as temperaturas de 30 e 70°C (NASCIMENTO, 2014).

Riadh et al. (2015), em seus experimentos com secagem de alimentos utilizaram a radiação infravermelha e observaram vários aspectos e características relacionadas a este método de secagem. Constataram que a radiação infravermelha como nova tecnologia de secagem é mais relevante quando comparada com outras técnicas de secagem, pois, na secagem industrial de alimentos, o tempo tem sido um dos principais fatores para melhorar o sistema, e isso pode ser diminuído usando radiação infravermelha em opção ao ar quente. Não podendo deixar de lado a qualidade do produto seco e que a quantidade de energia utilizada são fatores importantes que devem ser considerados pelos projetistas de secadores.

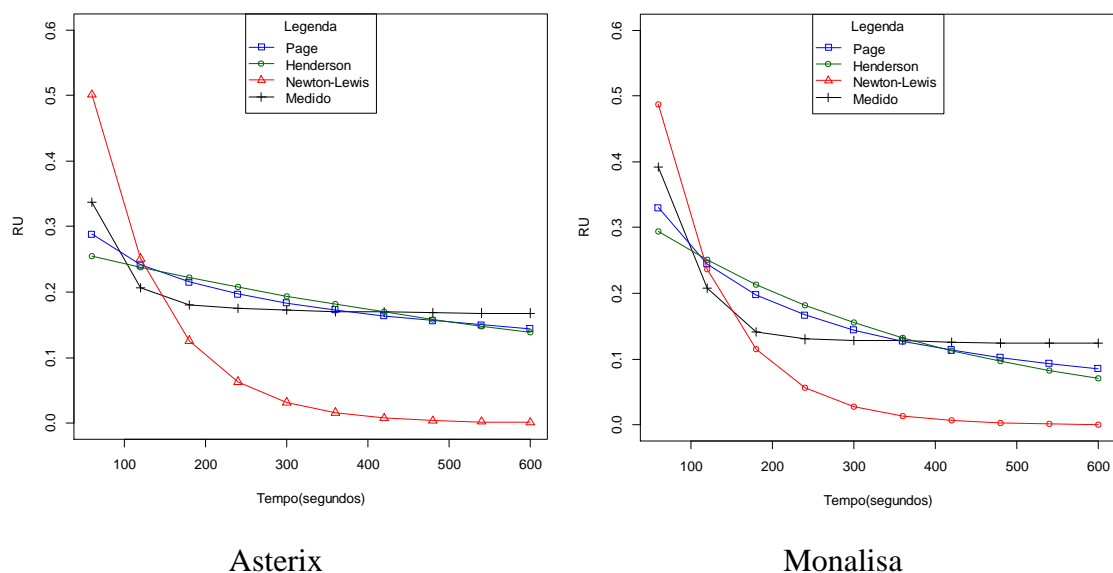
Alves (2005), em sua pesquisa, fez uma comparação no processo de secagem da noz de macadâmia utilizando o método de convecção e de irradiação e nos resultados obtidos, constatou que a secagem por micro-ondas foi eficiente na preservação das qualidades da noz de macadâmia em comparação ao processo de secagem convencional utilizando o ar quente, isto é, a transferência de calor por condução. Ainda, os tempos de secagem obtidos em todos os ensaios foram menores que o tempo requerido na secagem convencional. Assim, pôde-se confirmar que é tecnicamente possível a secagem da noz macadâmia com aplicação de energia de micro-ondas e ar quente.

Para capacidades industriais, há de se verificar a viabilidade do projeto de um secador mais eficiente energeticamente, economicamente, volumetricamente e em termos de consumo de tempo de modo a conferir sustentabilidade à etapa de secagem da batata.

5.2. Curvas de secagem

Os modelos selecionados foram significativos e apresentaram um ajuste satisfatório. Entretanto, o modelo de Page foi o que apresentou o melhor ajuste para o erro residual padrão, para ambas as cultivares. O importante no processo é atribuir os valores iniciais nos coeficientes que satisfaçam o processo. Na Figura 16 são apresentados os valores de umidade obtidos pelo experimento de secagem, bem como são apresentadas as curvas de secagem determinadas a partir do ajuste dos coeficientes dos modelos de Page, Henderson e Newton. Entre os resultados obtidos pelos modelos e o experimento, nota-se que a curva mais distinta foi observada no modelo de Page.

Figura 16 – Curvas de secagem



Fonte: Autor, 2018

De maneira diferente dos demais modelos, o modelo de Midilli, apesar de ter sido mencionado na metodologia, não obteve os valores para seus coeficientes obtidos.

Os valores dos coeficientes dos modelos estudados encontram-se na Tabela 4, à exceção do modelo de Midili.

Tabela 4 – Valores dos coeficientes dos modelos ajustados

Equação	Asterix			Monalisa		
	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>N</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>n</i>
Page	-	0.5665	0.1921		0.267	0.346
Henderson- Pabis	0.273	0.0011	-	0.3444	0.0026	-
Newton – Lewis	-	0.0115	-	0.0119	-	-
Midili - Kucuck	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor, 2019

Já os demais modelos foram significativos e apresentaram um ajuste satisfatório. Entre eles, o modelo de Page foi o que apresentou o melhor ajuste, indicado pelo menor o erro residual padrão e o maior valor de R^2 , para ambas as cultivares, como mostra a Tabela 5

Tabela 5 – Valores indicadores da qualidade dos modelos ajustados

Equação	Asterix		Monalisa	
	(R^2)	(RSE)	(R^2)	(RSE)
Page	0.92	0.0284	0.80	0.0404
Henderson- Pabis	0.49	0.0395	0.61	0.0569
Newton – Lewis	0.92	0.1480	0.95	0.1048
Midili – Kucuck	-	-	-	-

Fonte: Autor, 2019

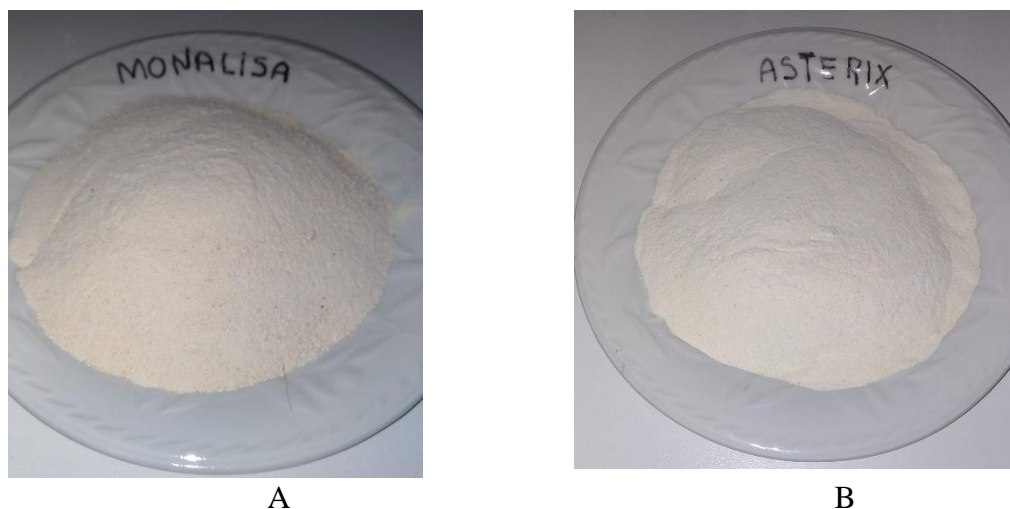
Na Tabela 5 pode-se observar que para ambas as cultivares, Asterix e Monalisa, em termos de indicadores de qualidade R^2 , os modelos de Page e Newton - Lewis representam uma forma satisfatória da cinética de secagem enquanto o modelo de Henderson – Pabis não apresentou boa performance.

5.3. Análise granulométrica das partículas

As amostras das batatas Monalisa e Asterix, após secas foram trituradas para obtenção das respectivas amostras de farinha que foram submetidas à análise granulométrica. A granulometria das amostras foi realizada utilizando-se jogo de 7 peneiras com 4, 5, 8, 9, 24, 35 e 60 mesh, ABNT, sendo respectivamente: 113,566 g de farinha para batata Monalisa e 126,880 g para farinha de batata Asterix. Com o processo individualizado, cada farinha foi inserida no agitador de peneiras previamente taradas por 10 minutos em velocidade de 60 rpm. Após esse período, as massas retidas em cada peneira foram pesadas, fornecendo as porcentagens retidas do produto em cada faixa granulométrica, conforme a AOAC (1990).

Ambas as amostras de farinha dos cultivares Monalisa e Asterix após passarem pelo processo de trituração e análise granulométrica das partículas estão exibidas na Figura 17A e B, respectivamente.

Figura 17 - Farinha de batata desidratada dos cultivares Monalisa em A e Asterix em B.



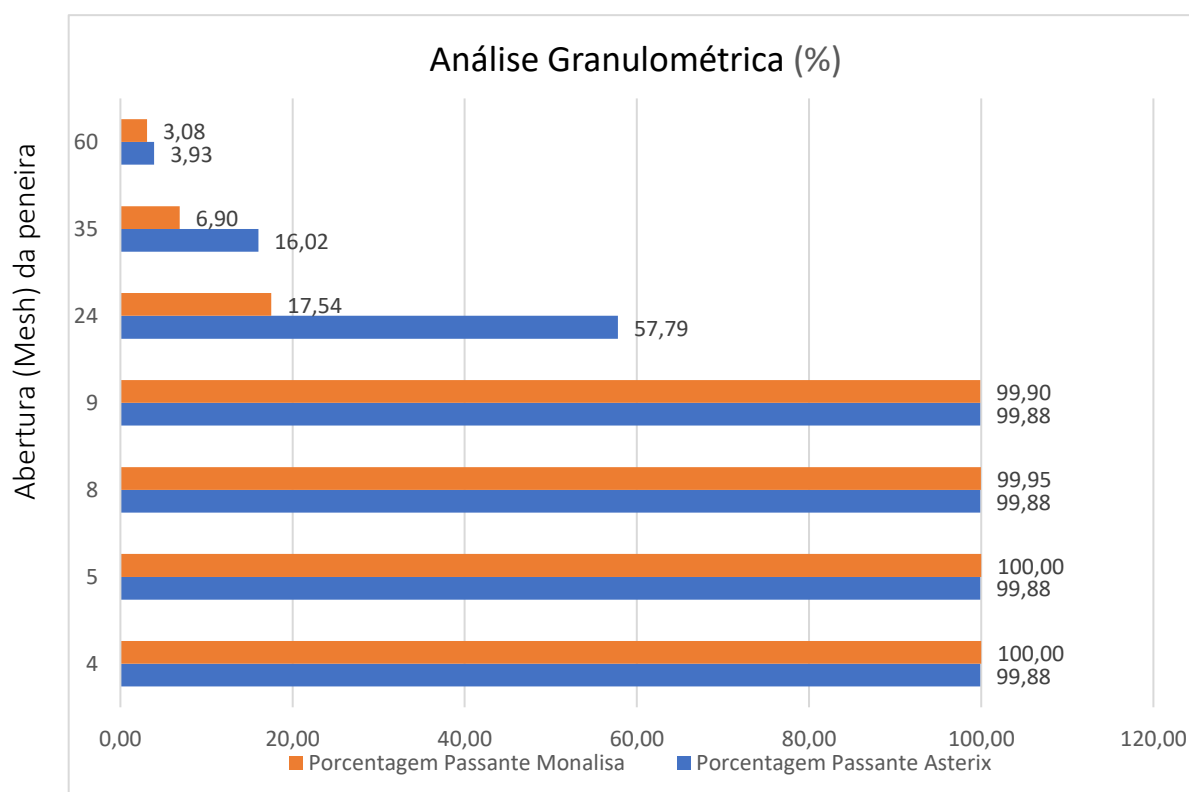
Fonte: Autor, 2018

Analisando as figuras A e B pode-se observar que a associação do uso de bissulfito apresentou bons resultados, tendo em vista que não ocorreu o fenômeno de escurecimento enzimático. Entretanto, houve uma variação de cor entre elas, característica da massa das ambas, *in natura*. A batata Asterix é mais clara pois, contém mais amido. A padronização da aparência do produto minimamente processado é uma necessidade para indústria na qualidade e na eliminação de efeitos externos (GOMES et al., 2005).

Na Figura 17 estão apresentados os dados dos mesh das peneiras utilizadas durante a condução do experimento. A farinha de batata Monalisa foi caracterizada em relação à análise granulométrica da matéria seca. A análise granulométrica da farinha de batata Monalisa foi realizada com agitador de peneiras Tyler de mesh 4, 5, 8, 9, 24, 35 60, com abertura da malha de 4,75, 4,00, 2,38, 2,0 e 0,71, 0,425, 0,25 mm, respectivamente. Repetiu-se o mesmo procedimento de peneiramento feito para a farinha da batata Monalisa, para a farinha da batata Asterix novamente: agitador de peneiras Tyler de mesh 4, 5, 8, 9, 24, 35 60, com abertura da malha de 4,75, 4,00, 2,38, 2,0 e 0,71, 0,425, 0,25 mm, respectivamente. Ao final, constatou-se que o ideal para o consumo da farinha da batata Asterix foi a de mesh 60, a qual obteve 3,9313% granulométrico.

Observou-se por meio da granulometria uma diferença referente as porcentagens em comparação com os mesh, representado no gráfico.

Figura 18 - Análise Granulométrica.



Fonte: Autor, 2018

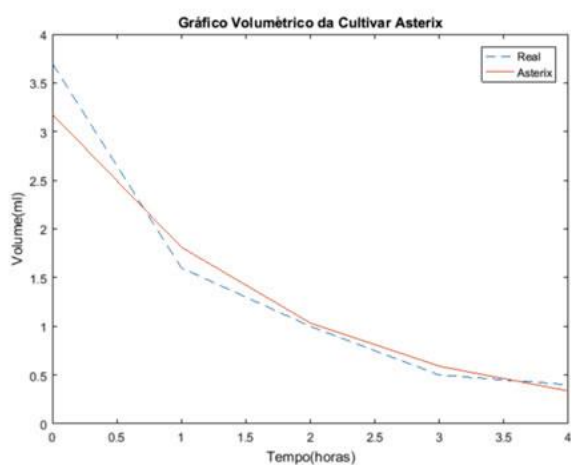
A granulometria é o ato de medir o tamanho das partículas, o que pode influenciar na digestibilidade dos nutrientes, sendo assim, do ponto de vista nutricional, pode-se considerar que quanto menor o tamanho das partículas do alimento maior o contato dessas com os sucos digestivos, favorecendo a digestão e a absorção dos nutrientes (BELLAVAR; NONES, 2000). Diante deste contexto verificou-se que a farinha da batata Monalisa ideal para o consumo foi a de mesh 60, a qual obteve 3,0772% granulométrico.

5.4. Densidade dos sólidos pelo princípio de Arquimedes

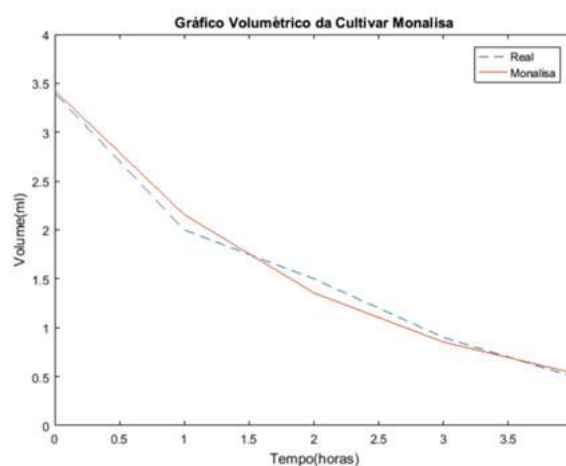
Os cálculos das modelagens foram realizados com o auxílio do aplicativo Matlab. Com isto, obteve-se, para o cultivar Asterix, valores de $k = -0,56124$, $b = 3,17802$ e, finalmente, $tes = 8,928h$ e para o cultivar Monalisa: $k = -0,46327$, $b = 3,1645$ e o $tes = 10,79h$ Apresentados na Figura 19

Onde: k e b : coeficientes e tes : tempo estimado de secagem.

Figura 19 – Curvas do encolhimento volumétrico da desidratação da batata Asterix em A e Monalisa em B.



A



B

Fonte: Do autor, 2018

Para a cultivar Asterix, observa-se que para o instante zero o volume era de 3,4 ml. Depois, no final da primeira hora cai para 2 ml, na segunda aferição após duas horas o volume reduziu para 1,5ml, na terceira aferição reduziu para 0,9ml e na quarta aferição estabilizou-se em 0,5ml. Para a cultivar Monalisa observa-se que para o instante zero o volume era de 3,7 ml. Depois, no final da primeira hora, reduz para 1,6ml, na segunda aferição após duas horas o volume reduziu para 1 ml, na terceira aferição reduziu para 0,5ml e na quarta aferição estabilizou-se em 0,4ml.. A diferença entre o tempo de desidratação entre as cultivares Asterix e Monalisa, é de aproximadamente de 2 horas, adicionais para a última.

5.5. Taxa de transferência de calor

Para o gradiente de temperatura, o calor sairá da maior temperatura para direção da menor temperatura. Por isto temos $q(x) = -kA \frac{dt}{dx}$. Neste experimento a temperatura inicial (ambiente) era de 27°C, e a temperatura no interior do desidratador era de 60°C. Portanto, houve transferência de calor da mais alta (temperatura do desidratador) para temperatura mais baixa (temperatura ambiente).

6. CONCLUSÕES

Foram selecionados quatro modelos: Page, Herderson – Pabis e Lewis - Newton. e Midili – Kucuk e o melhor ajuste ocorreu no modelo de Page, enquanto o modelo de Lewis e Newton não apresentaram bom ajuste. O modelo Midili – Kucuk não apresentou valores para seus coeficientes. Uma dificuldade encontrada durante os ajustes, foi com relação aos valores de partida dos modelos. Finalmente, verificou-se em escala de laboratório, que a cultivar Asterix apresentou maior quantidade de farinha e gasto de energia, devido a menor concentração de umidade e maior quantidade de massa desidratada ao final do processo, ao contrário da cultivar Monalisa. Ambas as cultivares podem ser submetidas ao mesmo processo com intuito de aumentar o período de conservação e armazenamento e ser uma opção na culinária. Com relação a taxa de transferência de calor, verifica-se que quanto maior essa diferença de temperatura, maior será esta transferência de calor pois, estas são diretamente proporcionais. Para a variável espessura e a distância em $x=L$, quanto maior for a espessura da parede menor será a quantidade de calor transferido. Quanto maior for o L , menor será a quantidade de calor transferido. Finalmente, quanto maior a área, maior será a transferência de calor.

7. REFERÊNCIAS

ALVES, F. DA S. **Estudo da Aplicação de Energia de Microondas na Secagem da Noz Macadâmia (*Macadamia integrifolia* Maiden & Betche.** [s.l: s.n.].

AOAC. **Official Methods Analysis.** [s.l: s.n.]. v. 552

ARAÚJO, J. M. A. **Química dos Alimentos: teoria e prática.** 6^a ed. Viçosa: [s.n.].

BARBOSA, E. DOS S. P. **Estudo Comparativo De Características Físico-Químicas E Sensoriais De Batatas Das Cultivares Francesas: Chipie, Colorado, Opaline E Soléia.** Dissertação, p. 116, 2011.

BASSANEZI, R. C. **Ensino aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia.** [s.l: s.n.].

BELLAVER, C.; NONES, K. **A importância da granulometria, da mistura e da peletização da ração avícola.** *Simposio Goiano de Avicultura*, n. IV, p. 1–18, 2000.

BERGOLD, A. M; SCHIRMER, A. S. **Análise químico-farmacêutica do albendazol . Doseamento de ácidos.** p. 173–175, 1997.

BERK, Z. **Food Process Engineering and Technology.** [s.l: s.n.].

CARDOSO, I. R. M. et al. **Análise da cinética e modelagem matemática da secagem da polpa de buriti (*mauritia flexuosa* L).** *Engenvista*, v. 19, n. 5, p. 1188–1197, 2017.

CARLESSO, V. D. O. **Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo 1.** v. 29, p. 28–37, 2007.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de Secagem de Alimentos.** *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*, n. 2176–5081, p. 50, 2010.

CEREDA, M. P.; CATÂNEO, A. **Avaliação de parâmetros de qualidade da fécula fermentada de mandioca.** *Revista Brasileira de Mandioca, Cruz das Almas*, 1986.

CIP, I. C. P. **Potato.** Disponível em: <<https://cipotato.org/crops/potato/>>.

CORRÊA, P. C. et al. **Modelagem matemática e determinação das**

propriedades termodinâmicas do café (Coffea arabica L .) durante o processo de secagem. p. 595–601, 2010.

CUSSLER, E. L. **Diffusion - Mass transfer in fluids systems.** [s.l: s.n.].

DA SILVA MORAIS, S. J. et al. **Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (vigna unguiculata (L.) walp.).** *Revista Ciencia Agronomica*, v. 44, n. 3, p. 455–463, 2013.

FILHO, E. D. S. et al. **Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem da polpa da manga cv . Espada.** p. 9–14, 2016.

FINZER, J. R. . **Desenvolvimento de um secador de leito vibro-jorrado.** [s.l: s.n.].

FREITAS, E.; SILVA, L. **Comunicado 194 Técnico.** p. 1–3, 2007.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos.** [s.l: s.n.].

GOMES, C. A. O. et al. **Hortaliças minimamente processadas.** [s.l: s.n.].

HORTIFRUTI, B. **Anuário 2017 - 2018.** 2017.

INCROPERA, F. P. [ET AL. . **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa,** 2008.

MARTINAZZO, A. P. et al. **Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão** *Analysis and mathematical description of drying kinetic of lemon grass leaves.* *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, n. 24, p. 301–306, 2007.

MCCABE, W. L. **Livro_Unit Operations of Chemical Engineering-** WarrenL. McCabe, 1993.

MONTANHEIRO, M. N. S. **Determinação da densidade de sólidos e líquidos pelo princípio de Arquimedes.** *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 7, n. 2, p. 120–123, 1990.

MOTA, T. L. R.; MOREIRA, E. MARIA DA S.; CUNHA, R. N. DA. **Avaliação da pulverização de etanol na secagem de cascas de batata.** v. 13, n. 1, p. 255–271,

2016.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying Handbook of Industrial Drying**. p. 1301, 2015.

NADERINEZHAD, S. et al. **Mathematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parameters**. 2015.

NASCIMENTO, V. R. G. **Secagem convectiva e com radiação infravermelha de grãos de moringa oleifera lam** . [s.l: s.n.].

NAZARETH, M.; MONTANHEIRO, S. **Líquidos pelo princípio de arquimedes**. p. 120–123, 1990.

OLIVEIRA, G. H. H. DE et al. **Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos**. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 18, n. 4, p. 314–321, 2015.

ORNELLAS, A. **A Energia dos Tempos Antigos aos dias Atuais**. 2006.

PEREIRA, A. DOS S. **FARINHA DE BATATA (Solanum tuberosum L.): obtenção, caracterização físico-química, funcional, elaboração e caracterização de sopas desidratadas**. [s.l: s.n.].

PRAKASH, O.; KUMAR, A.; TEKASAKUL, P. **Environomical analysis and mathematical modeling of potato chips drying in a modified solar greenhouse dryer**. v. 48, n. 16, p. 1497–1514, 2017.

REIS, R. C. et al. **Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 4, p. 347–353, 2011.

RIADH, M. H. et al. **Infrared Heating in Food Drying: An Overview**. *Drying Technology*, v. 33, n. 3, p. 322–335, 2015.

SANCHEZ, C. M. S. **Secagem Contínua de Raízes de Chicória com Aplicação de Radiação Infravermelha em um Secador Agitador/Misturador**. [s.l: s.n.].

SANTOS, C. J. R. DOS. **Secagem de Sementes de Girassol via Radiação de**

Infravermelho e Convecção de Ar Aquecido. [s.l: s.n.].

SOUSA, F. C.; .; MARTINS, J.J.A1 .; ROCHA, A.P.T1 .; GOMES, J.P.1 .; PESSOA, T1 .; MARTINS, J. N. **Predição de modelos sobre a cinética de secagem de folhas de Ziziphus joazeiro** *Mart.* p. 195–200, 2015.

TILLMANN, A. R.; GUIMARÃES, G.; SILVA, S. M. M. DE L. **Determinação simultânea da condutividade térmica e da difusividade térmica variando com a temperatura.** *Posgrad.Mecanica.Ufu.Br*, p. 1–10, 2005.

TOMÁS BARBERÁN, FRANCISCO A. E SPÍN, J. C. **Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables.** *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2001.

VINICIUS, A. et al. **Dry matter obtainment method and chemical composition.** p. 1–8, 2017.

ZHU, A.; JIANG, F. **Modeling of mass transfer performance of hot-air drying of sweet potato (*Ipomoea Batatas L.*) slices.** *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, v. 20, n. 2, p. 171–181, 2014.