

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**MARIA CLARA DE MORAIS**

**SECAGEM DO BAGAÇO DE MALTE: ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM  
MATEMÁTICA**

**FRANCISCO BELTRÃO**

**2022**

**MARIA CLARA DE MORAIS**

**SECAGEM DO BAGAÇO DE MALTE: ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM  
MATEMÁTICA**

**Drying of malt bagasse: experimental study and mathematical modeling**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Camila Nicola Boeri Di Domenico.

Coorientador: Prof. Dr. Douglas Junior Nicolin.

**FRANCISCO BELTRÃO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**MARIA CLARA DE MORAIS**

**SECAGEM DO BAGAÇO DE MALTE: ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM  
MATEMÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07/dezembro/2022

---

Camila Nicola Boeri Di Domenico  
Doutorado em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Douglas Junior Nicolin  
Doutorado em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Maiquiel Schmidt de Oliveira  
Mestre em Engenharia Oceânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

“A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

**FRANCISCO BELTRÃO**

**2022**

## RESUMO

A cerveja é uma das bebidas mais conhecidas do mundo e sua comercialização tem uma participação de 2% no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. Entretanto, uma cervejaria pode gerar até 3% de resíduos em comparação à produção de cerveja. O bagaço de malte é um resíduo sólido das cervejarias e tem uma aplicabilidade muito grande, sendo a sua principal a alimentação animal. Contudo, o uso inadequado desse subproduto pode gerar algumas doenças ao animal que consumi-lo, como intoxicação e botulismo. Uma maneira de evitar essas doenças é a secagem, pois ela auxilia na conservação dos alimentos. Há vários tipos de secagem, como a de ar quente, congelamento, secagem por micro-ondas, por infravermelho, entre outras. Uma das formas de economizar em amostras e prever tempo de secagem é fazendo uso da simulação matemática. Os modelos matemáticos dimensionam e otimizam a cinética da secagem, evitando assim o desperdício de matéria-prima dos estudos experimentais. Baseado nas problemáticas e nas propriedades desse tipo de bagaço, nesta pesquisa foi realizada a secagem do bagaço de malte de duas formas distintas: por meio da secagem convectiva, nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C e por meio de secagem por micro-ondas, nas potências de 160, 480 e 640 W, com o intuito de aumentar a qualidade e tempo de vida útil do produto. Além dos ensaios experimentais, foram realizadas as modelagens matemáticas de todos os experimentos, por meio de cinco modelos e os dados simulados foram comparados aos experimentais por meio de cinco análises estatísticas: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio médio absoluto ( $dma$ ), erro médio relativo ( $P$ ), teste de Qui-quadrado ( $X^2$ ) e o erro médio estimado ( $SE$ ). Com base na metodologia empregada, é possível afirmar que a secagem realizada a 80°C obteve uma eficiência maior quando comparada aos demais experimentos, entretanto, as temperaturas acima de 60°C podem provocar sabores desagradáveis. Deste modo, é indicado a temperatura de 60°C, pois ela teve um desempenho superior a temperatura de 50 e não ocorre o risco de queimar ou torrar o bagaço de malte. E em relação à secagem por micro-ondas, verificou-se um desempenho melhor para a realizada com potência de 640 W. Por meio da modelagem matemática realizada, observou-se que o modelo Parabólico teve o melhor desempenho para ambas as formas de secagem, o que é corroborado pelos valores de  $R^2$ ,  $dma$ ,  $P$ ,  $X^2$  e  $SE$  encontrados. Neste sentido, é possível afirmar que a secagem é uma alternativa eficaz para melhorar o tempo de conservação do bagaço de malte e que a sua cinética pode ser descrita por meio de modelos matemáticos que simulem o tempo necessário para este processo.

Palavras-chave: bagaço de malte; estufa; micro-ondas; modelagem matemática.

## ABSTRACT

Beer is one of the best-known drinks in the world and its reception has a 2% share of the Brazilian Gross Domestic Product (PIB). However, a brewery can generate up to 3% of waste compared to the production of the beer. Malt bagasse is a solid residue from breweries and has a wide applicability, the main one being animal feed. However, the inappropriate use of this by-product can cause some diseases to the animal that consumes it, such as poisoning and botulism. One way to avoid these diseases is drying, as it helps in food conservation. There are several types of drying, such as hot air, freezing, microwave drying, infrared drying, among others. One of the ways to save on Sample and predict drying time is to make use of mathematical simulation. Mathematical models dimension and optimize the drying kinetics, thus avoiding the waste of raw material in experimental studies. Related to problems and properties of this type of bagasse, this work carried out the drying of malt bagasse in two different ways: through convective drying, at temperatures of 50, 60, 70 and 80 °C and through microwave drying, in the powers of 160, 480 and 640 W, in order to increase the quality and lifetime of the product. In addition to the experimental tests, mathematical modeling of all experiments was performed using 5 models and the simulated data were compared to the experimental data using 5 statistical analyses: authority coordinator ( $R^2$ ), mean absolute deviation ( $dma$ ), mean relative error ( $P$ ), Chi-square test ( $X^2$ ) and estimated mean error ( $SE$ ). Based on the methodology employed, it is possible to state that drying performed at 80 °C obtained greater efficiency when compared to the others, however, temperatures above 60 °C can cause unpleasant flavors. In this way, a temperature of 60 °C is indicated, as it performed better than a temperature of 50 and there is no risk of burning or toasting the malt bagasse. When too much observed, and in relation to microwave drying, a better performance was obtained for the one carried out with a power of 640 W. Through the mathematical modeling, it was observed that the Parabolic model had the best performance for both forms of drying, which is confirmed by the values of  $R^2$ ,  $dma$ ,  $P$ ,  $X^2$  and  $SE$  found. In this sense, it is possible to state that drying is an effective alternative to improve the storage time of malt bagasse and that its kinetics can be described by means of mathematical models that simulate the time required for this process.

Keywords: malt bagasse; stove; microwave; mathematical modeling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Amostras da umidade inicial após 24 horas na estufa.....	18
Gráfico 1- Razão do teor de umidade do bagaço de malte em função do tempo da secagem convectiva.....	25
Gráfico 2- Razão do teor de umidade do bagaço de malte em função do tempo da secagem em micro-ondas.....	26
Gráfico 3- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem temperatura de 50 °C do bagaço de malte.....	28
Gráfico 4- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem temperatura de 60 °C do bagaço de malte.....	29
Gráfico 5- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem temperatura de 70 °C do bagaço de malte.....	30
Gráfico 6- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem temperatura de 80 °C do bagaço de malte.....	31
Gráfico 7- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem potência de 640W do bagaço de malte.....	32
Gráfico 8- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem potência de 480W do bagaço de malte.....	33
Gráfico 9- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem potência de 160W do bagaço de malte.....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Modelos matemáticos utilizados para produtos agrícolas.....	16
Tabela 2- Modelos matemáticos de secagem.....	21
Tabela 3- Umidade inicial ( $U_o$ ) média do bagaço de malte para a secagem convectiva em quatro temperaturas.....	24
Tabela 4- Umidade final ( $U_f$ ) médias do bagaço de malte após a secagem convectiva em quatro temperaturas.....	26
Tabela 5- Umidade final ( $U_f$ ) médias do bagaço de malte após a secagem em micro-ondas em três potências.....	26
Tabela 6- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 50 °C do bagaço de malte.....	27
Tabela 7- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 60 °C do bagaço de malte.....	28
Tabela 8- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 70 °C do bagaço de malte.....	29
Tabela 9- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 80 °C do bagaço de malte.....	30
Tabela 10- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na potência de 640W do bagaço de malte.....	31
Tabela 11- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na potência de 480W do bagaço de malte.....	32
Tabela 12- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na potência de 160W do bagaço de malte.....	33
Tabela 13- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 50 °C do bagaço de malte.....	34
Tabela 14- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 60 °C do bagaço de malte.....	35
Tabela 15- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 70 °C do bagaço de malte.....	35
Tabela 16- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 80 °C do bagaço de malte.....	35
Tabela 17- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem em micro-ondas na potência de 640 W do bagaço de malte.....	37
Tabela 18- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem em micro-ondas na potência de 480 W do bagaço de malte.....	37

<b>Tabela 19- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem em micro-ondas na potência de 160 W do bagaço de malte.....</b>	<b>37</b>
<b>Tabela 20- Desvio médio absoluto.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabela 21- Dados experimentais da secagem em estufa do bagaço de malte.....</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 22- Dados experimentais da secagem em micro-ondas do bagaço de malte.....</b>	<b>44</b>



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>Bagaço de malte.....</b>	<b>12</b>
3.1.1	Bagaço de malte na alimentação animal.....	12
3.1.2	Doenças gerados pela utilização incorreta do bagaço de malte na alimentação animal.....	13
<b>3.2</b>	<b>Secagem.....</b>	<b>14</b>
3.2.1	Tipos de secagem.....	14
3.2.1.1	Secagem em estufa.....	15
3.2.1.2	Secagem em micro-ondas.....	15
3.2.2	Modelos matemáticos da secagem.....	15
3.2.2.1	Modelos matemáticos de secagem utilizados para produtos similares ao bagaço de malte.....	16
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>16</b>
<b>4.1</b>	<b>Matéria prima.....</b>	<b>18</b>
<b>4.2</b>	<b>Procedimento experimental.....</b>	<b>18</b>
4.2.1	Determinação da umidade inicial e final.....	18
4.2.2	Secagem em estufa.....	19
4.2.3	Secagem em micro-ondas.....	20
4.2.4	Adimensionalização do teor de umidade.....	20
<b>4.3</b>	<b>Modelagem matemática.....</b>	<b>21</b>
<b>4.4</b>	<b>Análises estáticas.....</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>24</b>
<b>5.1</b>	<b>Teor de umidade inicial.....</b>	<b>24</b>
<b>5.2</b>	<b>Avaliação da perda de massa durante o processo de secagem.....</b>	<b>24</b>
<b>5.3</b>	<b>Teor de umidade final.....</b>	<b>26</b>
<b>5.4</b>	<b>Modelagem Matemática para a secagem realizada em estufa.....</b>	<b>27</b>
<b>5.5</b>	<b>Modelagem Matemática para a secagem realizada em micro-ondas.....</b>	<b>31</b>
<b>5.6</b>	<b>Análise estatísticas.....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>40</b>
	<b>APÊNDICIE A- Dados experimentais da secagem do bagaço de malte.....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cerveja é a bebida alcoólica mais famosa do mundo (STATISTA, 2021). O Brasil é destaque no setor cervejeiro mundial, sendo o terceiro maior produtor desta bebida, com 13,3 bilhões de litros produzidos anualmente e com um faturamento R\$ 77 bilhões, o que equivale a 2% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (SINDICERV, 2021). Segundo Mathias et al. (2014), por consequência da grande demanda, há uma grande geração de resíduos sólidos e efluentes.

Em média, uma cervejaria gera de 1,5 a 3% de resíduos em comparação com a quantidade de cerveja produzida (FILLAUDEAU et al., 2006). Com o decorrer dos últimos anos a indústria cervejeira procurou reduzir a geração de resíduos, contudo alguns desses subprodutos têm uma diminuição complexa durante a produção da cerveja, como o bagaço de malte, o *trub* e a levedura residual cervejeira (MATHIAS et al., 2014).

O bagaço de malte é um resíduo sólido das cervejarias, esse tipo de sedimento é constituído pelos restos de casca e polpa do malte e representam 85% da geração de resíduos em todo o processo de produção (LIMA et al., 2014). Segundo Mathias et al. (2014), esse resíduo sólido tem uma alta composição de matéria orgânica, portanto o tratamento prévio é essencial antes do descarte ao meio ambiente para evitar o desequilíbrio ecológico. Como consequência deste alto teor de matéria, existe um grande incentivo para redução da geração e para o reaproveitamento de resíduos na produção de cerveja e em todo setor industrial (PANDEY et al., 2000).

O bagaço de malte é um resíduo com uma grande variedade de aplicabilidade, sendo as principais a alimentação animal, a produção de biogás por meio da fermentação anaeróbica, material adsorvente em tratamentos químicos e produção de carvão vegetal (MASSARDI et al., 2020; LIMA, 2010). A utilização desse resíduo sólido para alimentação de animais é a mais utilizada, por conta de suas características nutricionais e pelo baixo custo. Contudo, essa prática pode gerar algumas doenças aos animais sem os devidos cuidados, como intoxicação, botulismo, entre outras (BRUST et al., 2015). A fim de reduzir essa problemática e facilitar o armazenamento usualmente utiliza-se a secagem (CECCATO, 2019).

Uma maneira de preservar os alimentos é a secagem. Esse método consiste na redução da água dos materiais, o que evita o crescimento e reprodução de

microrganismos prejudiciais e minimiza a umidade (KOHLI et al., 2018; NETTO et al., 2019). Os tipos de secagem mais tradicionais são a de ar quente, congelamento e secagem por micro-ondas, contudo outros tipos estão ganhando cada vez mais espaço, como a secagem infravermelho (HUANG et al., 2021).

Os principais fatores que influenciam na cinética de secagem são as condições do processo e a natureza do produto a ser seco. As condições do processo são a umidade relativa, pressão, temperatura do ar, velocidade do ar, entre outros. Já a natureza do produto são a área superficial, espessura do material, tipo e concentração de solutos, orientações dos constituintes, entre outros (GUIMARÃES, 2010; KOHLI et al., 2018).

Os modelos matemáticos que descrevem a secagem são muito utilizados para a sua otimização e dimensionamento deste tipo de processo, evitando o desperdício de matéria-prima que ocorre em abordagens experimentais (CHEN; PAN, 2020; ARAUJO et al., 2017). Esses modelos podem ser ajustados por softwares, e a eficiência desse ajuste é aferida pelos valores de coeficiente de correlação, desvio médio, entre outros parâmetros. Os modelos que representam bem a cinética de secagem devem ter um coeficiente de correlação próximo a um e menor valor de desvio médio possível (VELASCO, 2019).

Baseado nessas problemáticas e nas propriedades desse resíduo sólido apresentadas anteriormente, o objetivo desse trabalho foi realizar a secagem do bagaço de malte e modelar matematicamente os dados experimentais deste processo, utilizando-se duas formas distintas: por meio da secagem convectiva, nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C e por meio de secagem por micro-ondas, nas potências de 160, 480 e 640 W, com o intuito de aumentar a qualidade e tempo de vida útil do produto.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Determinar a temperatura e potência ideais e ajustar um modelo de cinética de secagem do bagaço de malte visando o aumento da vida útil do produto final.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Estudar experimentos de secagem do bagaço de malte para diferentes temperaturas e potências;
- Identificar as melhores condições para secagem do bagaço de malte;
- Ajustar diferentes modelos matemáticos para a secagem do bagaço de malte;
- Definir o melhor modelo matemático para descrição do processo de secagem.

## 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 Bagaço de malte

A malteação é a primeira etapa da produção da cerveja, consistindo na transformação da cevada ou outro grão em malte. Esse cereal maltado tem um efeito inebriante e influência na coloração, sabor, aroma, espuma e corpo da cerveja. Em geral, cervejarias artesanais não costumam produzir sua cevada maltada, pois a variedade de maltes é extensa. Por essa razão, existem grandes companhias profissionais na malteação desses grãos (NACHEL; ETTLINGER, 2014).

Diversos resíduos são gerados no processo de produção da cerveja, sendo o principal, em termos de quantidade, o bagaço de malte, que corresponde a 85% dos resíduos gerados nesse processo. Esse resíduo sólido é constituído por restos de cascas e polpas dos grãos e é produzido após a filtração, anteriormente à etapa de fervura. A média de geração desse resíduo no Canadá, em 1997, era de 20 *kg* de bagaço de malte por *hl* de cerveja produzida (SANTOS; RIBEIRO, 2005; LIMA et al., 2014).

Como todo resíduo, o bagaço de malte não deve ser descartado no meio ambiente sem um tratamento prévio, pois o descarte inadequado afeta o solo e mananciais. Alguns resíduos têm um grande potencial de reaproveitamento em outros setores industriais (ISO 140140). Os resíduos sólidos de uma cervejaria podem ser utilizados como matéria-prima de uma série de aplicações como alimentação animal, produção de biogás por meio da fermentação anaeróbica, material adsorvente em tratamentos químicos e produção de carvão vegetal (MASSARDI et al., 2020; LIMA, 2010).

#### 3.1.1 Bagaço de malte na alimentação animal

A alimentação balanceada animal é de extrema importância, pois quando os nutrientes necessários são atendidos, o animal expressa seu máximo potencial produtivo (DELMASCHIO, 2018). A deficiência de nutrientes em vacas leiteiras é grande exemplo disso, uma alimentação inadequada pode provocar uma queda extrema na produtividade do leite. As principais exigências alimentares para manter

um alto rendimento animal são a energia, proteínas, minerais, vitaminas, fibra e água, além de fatores externos (1988 apud PETRY; PAGLIARINI, 2009).

A alimentação de bovinos representa a maior parte das despesas fixas na criação de ruminantes, girando em torno de 50 a 75% de todos os custos dos produtores agropecuários (SANTOS; RODRIGUES; LISBOA FILHO, 2006). Por consequência, os pecuaristas buscam alimentos alternativos de baixo valor comercial, fácil digestão para o animal e alto valor nutricional como resíduos orgânicos industriais e subprodutos agrícolas (CÂNDIDO et al., 2008; CARVALHO et al., 2021).

O bagaço do malte é muito utilizado na alimentação de ruminantes, pois esse resíduo é um alimento volumoso e tem um alto teor proteico não degradável no rúmen dos animais (proteína de passagem) com mais de 25% matéria seca. A comercialização desse bagaço normalmente é feita por empresas terceirizadas (GOMES, 2010).

### 3.1.2 Doenças geradas pela utilização incorreta do bagaço de malte na alimentação animal

O bagaço de malte é um resíduo sólido que tem um alto teor de umidade e, conseqüentemente, uma vida útil pequena (NETTO et al., 2019). Essa elevada umidade e a falta de cuidados básicos podem causar algumas doenças como intoxicação, neurotoxicoses, acidose ruminal, botulismo e doenças neurológicas (BRUST et al., 2015; JÚNIOR, 2008). Em suma, a maioria dessas doenças são causadas pelo fungo *Aspergillus clavatus*, esse fungo saprófito cosmopolita geralmente é isolado do solo e fezes. Entretanto, é muito comum ocorrer contaminação principalmente em cereais estocados com alto teor de umidade em temperatura superior a 13 °C, nessas condições o fungo se predomina perante aos outros fungos (JÚNIOR, 2008).

Segundo Júnior (2008), as doenças com maior perigosidade são doenças neurológicas, sendo os principais sinais a hiperestesia, tremores musculares, ataxia, andar sobre os boletos dos membros pélvicos, paresia e paralisia progressiva principalmente nos membros pélvicos que pode evoluir para morte. A taxa de mortalidade dessa doença é variável, podendo estar entre 17 e 100%. Além disso, os animais sobreviventes geralmente têm sequelas locomotoras.

## 3.2 Secagem

A secagem é uma maneira simples de preservar os alimentos, através da remoção das substâncias voláteis (vapor de água) por meio do aumento da temperatura. De maneira geral, o processo de secagem termina quando a pressão de vapor d'água no produto é igual à do ar que o envolve, ou seja, atinge-se a umidade de equilíbrio. Temperaturas muito altas de secagem e a remoção da água podem trazer danos ao produto, sendo que a sensibilidade ao calor é uma característica que depende do tipo de alimento (NAKAGANA et al., 2021). Entretanto, esse processo de transferência de massa e calor impossibilita o crescimento e reprodução de microrganismo, minimizando dessa forma os problemas gerados pela umidade excessiva (KOHLI et al., 2018).

A transferência de calor depende das condições de externas como temperatura do ar, umidade relativa, pressão, velocidade do ar, espessura do material e área de exposição de secagem. O estudo da transferência calor também é essencial na escolha do tipo de secador. Já a transferência de massa depende das condições internas como natureza física do sólido, temperatura do sólido, tipo e concentração dos solutos, orientações dos constituintes e teor de umidade (GONÇALVES, 2011; GUIMARÃES, 2010; KOHLI et al., 2018).

### 3.2.1 Tipos de secagem

Segundo Silva et al. (2008), os métodos de secagem são divididos em dois grupos principais, a natural e a artificial. A secagem natural é amplamente conhecida e acontece sem a interferência do homem, esse método decorre-se no campo de maneira lenta. Esse tipo de secagem contribui para conservação da qualidade originais dos produtos, além de ser um método de baixo custo. Contudo, a secagem natural pode facilitar o ataque de pragas, portanto essa técnica é pouca utilizada nas grandes produções comerciais.

Já a secagem artificial é um processo mais acelerado, que tem a interferência do ser humano por meio de equipamentos. Esse método pode ser feito por ventilação natural, ventilação forçada e convecção natural (SILVA et al., 2008). Dentre os tipos

de secagem artificial os mais usuais são a de ar quente, congelamento e secagem por micro-ondas, entretanto outros métodos estão ganhando cada vez mais espaço, como a secagem por infravermelho (HUANG et al., 2021).

#### 3.2.1.1 Secagem em estufas

A secagem em estufa essencialmente consiste em colocar o produto que deseja secar em recipientes resistentes à altas temperaturas, em uma câmara de isolamento térmico com um sistema de ar quente circulante para a exposição da amostra (DIAS, 2013; FELLOWS, 2006). Esse processo de transferência de calor artificial do sólido e o ar ocorre pela convecção e condução. O deslocamento da superfície da amostra e o ar se dá por meio da convecção, já a condução entre o centro e a superfície (TIZZIANI, 2021).

Estudos experimentais utilizando a secagem em estufa são amplamente encontrados na literatura da área, conforme elencado a seguir: Tizziani em 2021 estudou a secagem de bagaço de malte em estufa a 50, 80, 110 °C; Soares em 2021 estudou a secagem da folha de batata-doce em estufa a 40, 50, 60 e 70 °C, Gumz em 2021 estudou a secagem da folha de malva em estufa a 30, 40, 50 e 60 °C, entre outros.

#### 3.2.1.2 Secagem por micro-ondas

O aquecimento da secagem por micro-ondas ocorre por meio da radiação eletromagnética e do mecanismo da rotação das moléculas polares (ROSA, 2010). Esse método de retirada de água é conhecido pela redução de tempo para o tratamento da amostra em comparação aos métodos de secagem convencionais, e consequente por uma redução de energia elétrica (DIAS, 2013).

Na literatura, diversas pesquisas são relatadas com a utilização de micro-ondas para analisar o processo de secagem de diferentes produtos: Tizziani em 2021 estudou a secagem de bagaço de malte em micro-ondas a 320, 800 e 1600W; Souza et al. em (2020) estudou a secagem do resíduo da acerola em micro-ondas a 2450 MHz e 700W; Canabarro et al. em 2022 estudou a secagem de folhas de pitangueira em micro-ondas a 1350W e 2450MHz, entre outros.



### 3.2.2 Modelos matemáticos de secagem

Estudos sobre o dimensionamento, otimização e viabilidade da aplicação comercial de sistemas de secagem são realizados por modelos matemáticos. Esses modelos devem representar a perda de água durante a secagem para as camadas delgadas do produto. Existem três tipos de modelos matemáticos, os teóricos, semiteóricos e os empíricos (CHEN; PAN, 2020; ARAUJO et al., 2017).

Os modelos teóricos descrevem a o perfil de distribuição de água no interior da amostra, consideram a resistência interna na transferência de calor entre o ar da secagem e o produto e as condições externas (GONELI et al., 2014. ALVES, 2014). Segundo Alves (2014), essa metodologia estabelece uma relação entre o coeficiente de difusão, o teor de umidade e a temperatura, entretanto esses modelos fazem algumas considerações como desconsiderar o efeito encolhimento e o efeito capilaridade.

Já os modelos semiteóricos descrevem o perfil de distribuição no exterior do produto. Além disso, os semiteóricos são derivados da segunda lei de Fick ou de modificações de modelos simplificados (ALVES, 2014; ARAÚJO, 2017). Segundo Araújo et al. (2017), os modelos semiteóricos e empíricos consideram a resistência externa à temperatura e umidade relativa do ar.

#### 3.2.2.1 Modelos matemáticos de secagem utilizados para produtos similares ao bagaço de malte

O ajuste da modelagem matemática utilizada no processo de secagem é essencial. Segundo Machado et al. (2017), os principais modelos utilizados na cinética de secagem de produtos agrícolas são mostrados na tabela 1.

**Tabela 1- Modelos matemáticos utilizados para produtos agrícolas**

<b>Modelo</b>	<b>Equação</b>
Wang e Singh	$Ru = 1 + at + bt^2$
Verna	$Ru = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-gt)$
Thompson	$Ru = \exp \frac{[-a - (a^2 + 4b * t)^{0,5}]}{2b}$
Page	$Ru = \exp (-kt^n)$

---

Newton	$Ru = \exp(-kt)$
Midilli	$Ru = a * \exp(-kt^n) + bt$
Logarítmico	$Ru = a * \exp(-kt) + c$
Henderson e Pabis	$Ru = a * \exp(-kt)$
Henderson e Pabis modificado	$Ru = a * \exp(-kt) + b * \exp(-gt) + c$ $* \exp(-ht)$
Exponencial de dois termos	$Ru = a * \exp(-kt) + (1 - a) * \exp(k_a t)$
Dois termos	$Ru = a * \exp(-kt) + b * \exp(qt)$
Aproximação da Difusão	$Ru = a * \exp(-kt) + (1 - a) * \exp(-k_b t)$

---

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Na literatura, encontram-se diversos trabalhos sobre modelagem matemática da secagem de produtos similares ao bagaço de malte, conforme elencado a seguir: Silva et al. em 2019 estudou a secagem de resíduos de tomate, laranja e do mamão e utilizou o modelo de Page para ajuste dos dados experimentais; Feitosa et al. em 2019 estudaram a secagem de resíduos de manga, abacaxi, acerola, goiaba e graviola e utilizaram o modelo matemático Polinomial para a simulação; Barreiro et al. em 2016 estudaram a secagem de cascas de abacaxi e utilizaram o modelo de Pabis e Henderson e Pabis para a modelagem matemática; Baptistini et al. (2015) estudaram a secagem de espuma de graviola e ajustaram o modelo de Midilli aos seus dados experimentais, entre outros.

## 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 4.1 Matéria-prima

O bagaço de malte utilizado nos experimentos de secagem foi fornecido pela microcervejaria Formosa Craft Beer, localizada em Francisco Beltrão- PR. Para a conservação do bagaço de malte antes dos experimentos, os grãos foram estocados em baldes vedados fechados mantidos sob refrigeração, para que não ocorresse a degradação microbiana.

### 4.2 Procedimento experimental

#### 4.2.1. Determinação da umidade inicial e final

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Pesquisa vinculado à Diretoria de Pesquisa e Pós-graduação da Universidade Tecnológico Federal do Paraná (UTFPR) do *campus* Francisco Beltrão/PR.

A metodologia dessa etapa foi baseada nos procedimentos descritos em Bourscheidt et al. (2011) com adaptações.

Para a determinação da umidade inicial do bagaço de malte, foi utilizado o método padrão em estufa. Esse método consiste em colocar o produto que será analisado em uma estufa à uma temperatura de 105 °C por 24 horas. Em seguida, as amostras foram colocadas em dessecador por cerca de 60 minutos.

Esse ensaio foi realizado em triplicata, em placas de petri com 15 gramas de bagaço de malte. A Figura 1 apresenta as amostras da umidade inicial após 24 horas na estufa:

**Figura 1- Amostras da umidade inicial após 24 horas na estufa**



Fonte: Autoria própria (2022)

Para o cálculo da umidade inicial, em base úmida (b.u.) foi utilizada a equação (1):

$$X_{b.u.} = \frac{M_{úmida} - M_{seca}}{M_{úmida}} \quad (1)$$

Sendo:

$X_{b.u.}$  : teor de umidade em base úmida;

$M_{úmida}$  : massa da amostra úmida;

$M_{seca}$  : massa da amostra após a secagem.

A umidade final do produto foi determinada da mesma forma que a umidade inicial, contudo, utilizando-se as amostras obtidas nos experimentos de secagem.

#### 4.2.2 Secagem em estufa

Para o processo de secagem em estufa do bagaço de malte, foram utilizados os procedimentos metodológicos de Ceccato (2019) com adaptações, em duplicata, com 120 gramas para cada amostra.

Os equipamentos utilizados para a etapa de secagem foram uma balança semi analítica, uma estufa de secagem e esterilização, com circulação de natural de ar, da marca SOLAB, modelo SL-100.

As amostras foram retiradas e tiveram suas massas medidas periodicamente, para cada temperatura. As temperaturas de secagem escolhidas foram 50, 60, 70 e 80 °C, as temperaturas acima de 60 °C podem torrar ou queimar e até mesmo provocar sabores desagradáveis (CECCATO, 2019). Sendo assim, as temperaturas de 70 e 80°C foram usadas apenas para auxiliar o ajuste da cinética de secagem.

Assim, a partir dos dados experimentais obtidos, a umidade instantânea foi determinada por meio da equação (2):

$$X = \frac{(X_f - X_o) * (m - m_o)}{(m_f - m_o)} + X_o \quad (2)$$

Sendo:

$X$ : teor de umidade instantânea;  
 $X_f$ : teor de umidade final;  
 $X_o$ : teor de umidade inicial;  
 $m$ : massa instantânea da amostra;  
 $m_o$ : massa inicial da amostra;  
 $m_f$ : massa final da amostra

#### 4.2.3 Secagem em micro-ondas

Para o processo de secagem em micro-ondas do bagaço de malte, foram utilizados os procedimentos metodológicos de Tizziani (2021) com adaptações, em duplicata, com 30 gramas para cada amostra.

Os equipamentos utilizados para esta etapa de secagem foram uma balança semi analítica e um micro-ondas, da marca Electrolux, modelo MEF41. As potências escolhidas para essa etapa foram 160, 480 e 640  $W$ . As amostras foram retiradas e tiveram suas massas medidas periodicamente a cada um minuto, para cada potências. Assim, a partir dos dados experimentais obtidos, a umidade instantânea foi determinada por meio da equação (2) como na metodologia da secagem em estufa.

#### 4.2.4 Adimensionalização do teor de umidade

Após o processo de secagem, para a modelagem das curvas de secagem do bagaço de malte foi determinada a razão de teor de água adimensional ( $RU$ ), conforme a equação (3):

$$RU = \frac{U_i - U_f}{U_o - U_f} \quad (3)$$

Sendo:

$RU$ : razão de teor de água adimensional;  
 $U_i$ : umidade instantânea;  
 $U_f$ : umidade final;  
 $U_o$ : umidade inicial;

### 4.3 Modelagem Matemática

Após a obtenção dos dados experimentais, foram ajustados aos mesmos modelos matemáticos de secagem. Os modelos escolhidos foram alguns dos mais utilizados para descrever a secagem de produtos agroindustriais, conforme descrito na tabela 2:

**Tabela 2- Modelos matemáticos de secagem**

<b>Modelo</b>	<b>Equação</b>
Wang e Singh	$Ru = 1 + at + bt^2$
Parabólico	$Ru = a + bt + ct^2$
Newton	$Ru = \exp(-kt)$
Logarítmico	$Ru = a \exp(-kt) + c$
Aproximação da Difusão	$Ru = a * \exp(-kt) + (1 - a) * \exp(-k_b t)$

Fonte: Autoria própria (2022)

Sendo:

$Ru$ : razão de umidade do produto;

$t$ : tempo de secagem;

$k, k_b$ : constantes de secagem;

$a, b, c$ : coeficientes dos modelos.

### 4.4 Análises estatísticas

Os parâmetros dos modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais com o uso do software SciDAVis. Para analisar a precisão de cada modelo, foram determinados os valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio médio absoluto ( $dma$ ), erro médio relativo ( $P$ ), e o teste de Qui-quadrado ( $X^2$ ) e o erro médio estimado ( $SE$ ).

As equações dessa etapa foram retiradas de Gumz (2021) e Puatti et al. (2013) e estão descritas a seguir;

O coeficiente de determinação foi calculado por meio da equação (4):

$$R^2 = \frac{\Sigma(\hat{y}_i - \bar{y}_i)}{\Sigma(y_i - \bar{y}_i)} \quad (4)$$

Sendo:

$R^2$ : coeficiente de determinação;

$\Sigma(\hat{y}_i - \bar{y}_i)$ : variação descrita pelo modelo;

$\Sigma(y_i - \bar{y}_i)$ : variação total.

O desvio médio absoluto é obtido por meio da equação (5):

$$dma = \Sigma \frac{|X_i - \bar{X}|}{n} \quad (5)$$

Sendo:

$dma$ : desvio médio absoluto.

$X_i - \bar{X}$ : desvio simples;

$X_i$ : dado experimental;

$\bar{X}$ : média;

$n$ : número de amostras.

Já o erro médio relativo é calculado pela equação (6):

$$P = \frac{100}{n} \Sigma \frac{|Y - \bar{Y}|}{Y} \quad (6)$$

Sendo:

$P$ : erro médio relativo;

$n$ : número de amostras;

$Y$ : dado experimental;

$\bar{Y}$ : valor calculado pelo modelo.

O teste de Qui-quadrado é obtido por meio da equação (7):

$$X^2 = \Sigma \frac{(Y - \hat{Y})^2}{GLR} \quad (7)$$

Sendo:

$X^2$ : teste de Qui-quadrado;

$Y$ : dado experimental;

$\hat{Y}$ : valor calculado pelo modelo;

$GLR$ : graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros dos modelos).

O erro médio estimado é calculado pela equação (8):

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y-\hat{Y})^2}{GLR}} \quad (8)$$

Sendo:

$SE$ : erro médio estimado;

$Y$ : dado experimental;

$\hat{Y}$ : valor calculado pelo modelo;

$GLR$ : graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros dos modelos).

A avaliação da precisão dos modelos matemáticos deve levar em consideração que os valores calculados já têm um valor preestabelecido em relação ao bom ajuste aos dados experimentais. Para o  $R^2$  é esperado um valor próximo de 1, já para os demais é esperado o menor valor possível (SILVA et al, 2019).



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Teor de umidade inicial das amostras

Os ensaios de umidade inicial ( $U_o$ ) foram feitos em triplicata. Na tabela 3, apresentam-se os teores de umidade inicial médios da secagem convectiva para o bagaço de malte:

**Tabela 3- Umidade inicial ( $U_o$ ) média do bagaço de malte para a secagem convectiva em quatro temperaturas**

Temperatura (°C)	$U_o$ (%)
50	72,94
60	72,94
70	75,80
80	75,80

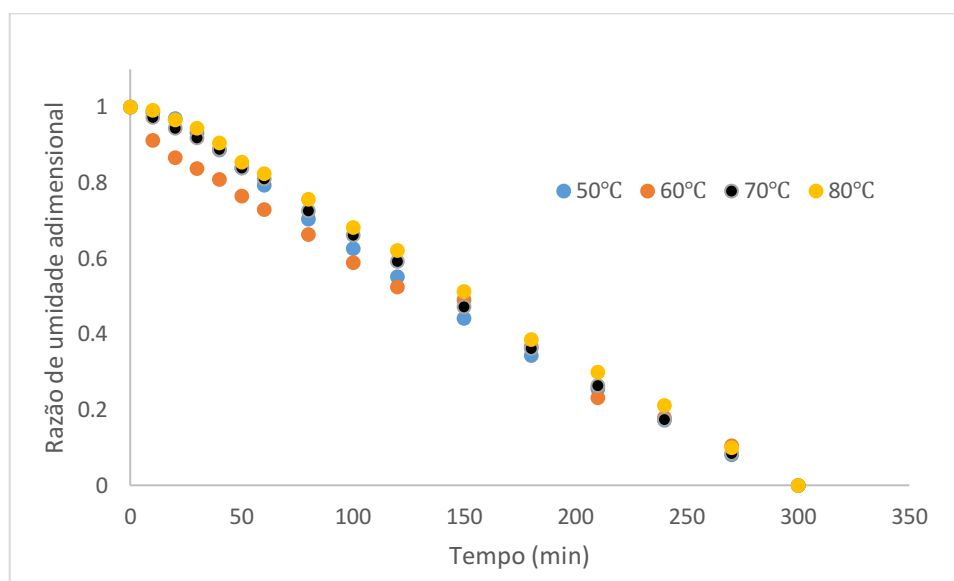
Fonte: Autoria própria (2022)

Para a secagem em micro-ondas do bagaço de malte a umidade inicial determinada para as quatro potências foi de 74,02%.

### 5.2 Avaliação da perda de massa durante o processo de secagem

Nota-se, através da análise do gráfico 1, que com o aumento da temperatura durante a exposição desse resíduo sólido, há o aumento da taxa de secagem, consequentemente resultando, assim, em um menor tempo de secagem. Esse fenômeno é observado em estudos semelhantes com outros produtos secados em estufa, como em Silva et al., em 2019 que estudou a secagem de resíduos de tomate, laranja e do mamão e Feitosa et al., que em 2019 estudaram a secagem de resíduos de manga, abacaxi, acerola, goiaba.

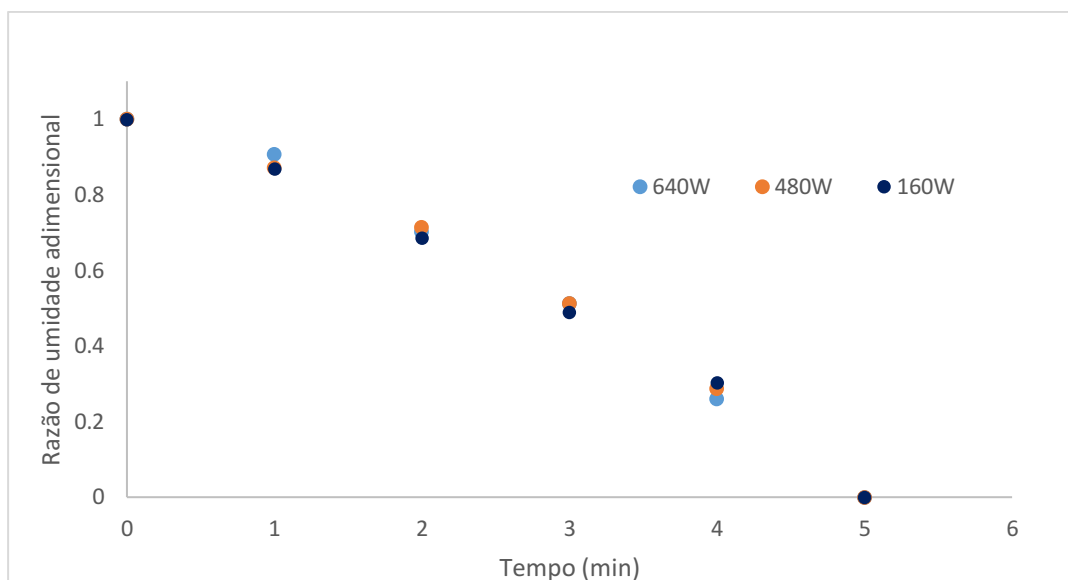
**Gráfico 1- Razão do teor de umidade do bagaço de malte em função do tempo da secagem convectiva**



Fonte: Autoria Própria (2022)

Na secagem em micro-ondas verificou-se um comportamento semelhante à secagem em estufa em relação a taxa de secagem, entretanto com uma perda de água muito mais acelerada, conforme mostrado no gráfico 2. Esse ocorrido também foi observado por Pastorini et al. (2002) com a secagem do material vegetal e por Silva et al, (2013) com a secagem da batata yacon. Desta forma, constatou-se que a potência de 640W teve a perda de água mais acelerada em comparação as demais potências.

**Gráfico 2- Razão do teor de umidade do bagaço de malte em função do tempo da secagem em micro-ondas**



Fonte: Autoria Própria (2022)

### 5.3 Teor de umidade final

Os ensaios de umidade final foram feitos em duplicata. Na tabela 4, apresentam-se os teores de umidade final médios da secagem convectiva para o bagaço de malte:

**Tabela 4- Umidade final ( $U_f$ ) médias do bagaço de malte após a secagem convectiva em quatro temperaturas**

Temperatura (°C)	$U_f$ (%)
50	8,39
60	8,54
70	8,29
80	6,62

Fonte: Autoria própria (2022)

Na tabela 5, apresentam-se os teores de final médios da secagem em micro-ondas para o bagaço de malte:

**Tabela 5- Umidade final ( $U_f$ ) médias do bagaço de malte após a secagem em micro-ondas em três potências**

Potências (W)	$U_f$ (%)
160	8,66
480	6,57
640	5,56

Fonte: Autoria própria (2022)

Os teores de umidade do bagaço de malte que foram obtidos após o processo de secagem para todas as temperaturas e potências atingiram os valores desejáveis para este tipo de processo. Para o armazenamento de ração animal é indicado uma umidade inferior a 13%, deste modo, as umidades finais chegaram em valores satisfatórios (CUSTÓDIO, 2005). As amostras da temperatura de 80°C foram as primeiras a atingir uma umidade inferior a 13%, no tempo de 270 minutos, já o restante atingiu essa umidade depois de 270 minutos, ou seja, a temperatura de 80°C teve a melhor performance. Entretanto, as temperaturas acima de 60 °C podem provocar sabores desagradáveis (CECCATO, 2019). Deste modo, é indicado a temperatura de 60 °C, pois ela teve um desempenho superior a temperatura de 50 e não ocorre o risco de queimar ou torrar o bagaço de malte. As amostras de micro-ondas também atingiram umidades finais inferiores a 13 %, sendo assim, também estavam aptas ao armazenamento.

#### 5.4 Modelagem Matemática para a secagem realizada em estufa

As constantes dos modelos ajustados foram estimadas por regressão não-linear para cada temperatura avaliada, e são apresentadas nas tabelas 6, 7, 8 e 9:

**Tabela 6- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 50 °C do bagaço de malte**

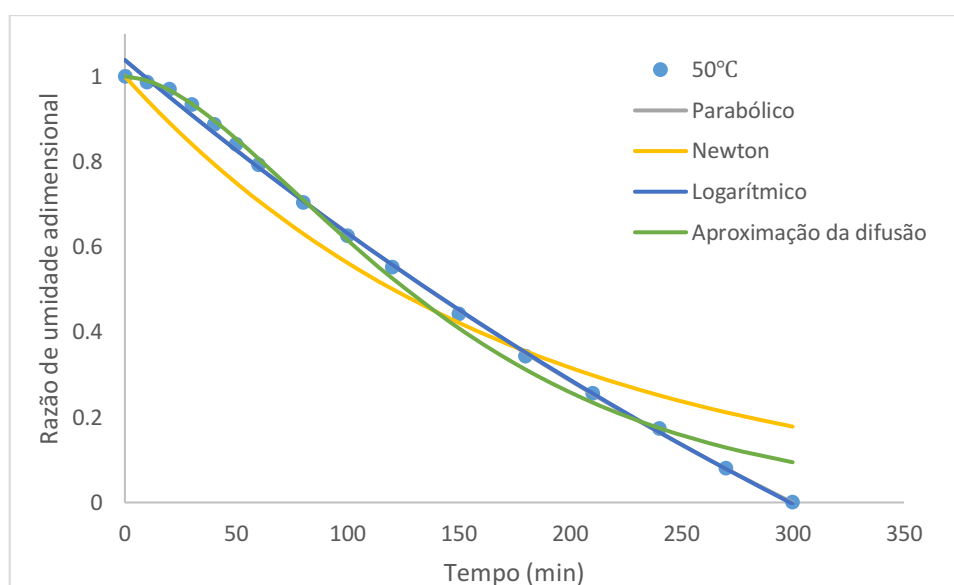
Modelos	a	b	c	k	kb
Parabólico	1,038	-0,004	3E-06	-	-
Newton	-	-	-	0,006	-

Logarítmico	2,647	-	-1,609	0,002	-
Aproximação da difusão	-19,881	-	-	0,013	0,953

Fonte: Autoria própria (2022)

No gráfico 3, são apresentadas as curvas estimadas pelos modelos em comparação aos dados experimentais obtidos para a temperatura de 50°C.

**Gráfico 3- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem temperatura de 50 °C do bagaço de malte**



Fonte: Autoria própria (2022)

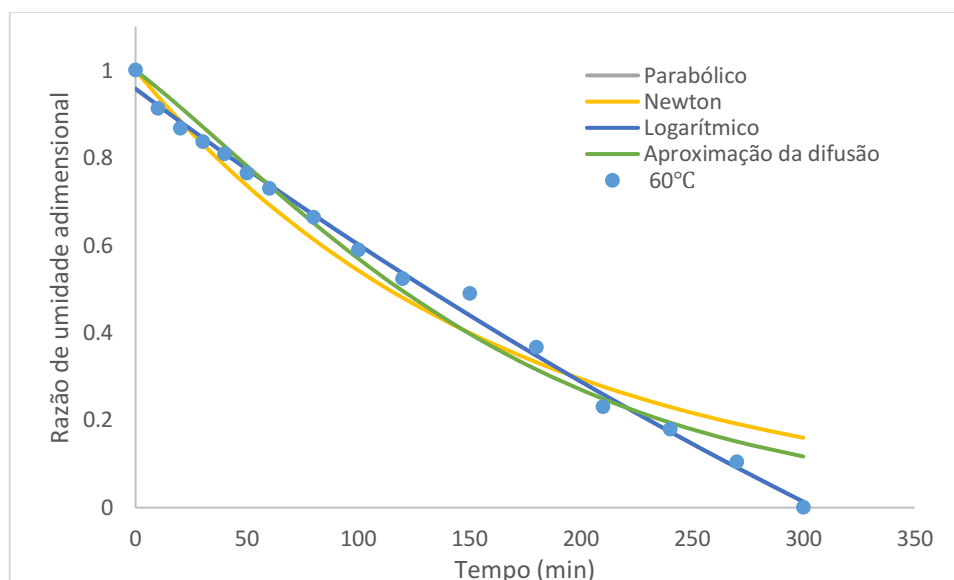
**Tabela 7- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 60 °C do bagaço de malte**

Modelos	a	b	c	k	kb
Parabólico	0,956	-0,004	0	-	-
Newton	-	-	-	0,006	-
Logarítmico	2,921	-	-1,963	0,001	-
Aproximação da difusão	-9,018	-	-	0,935	0,011

Fonte: Autoria própria (2022)

No gráfico 4, são apresentadas as curvas estimadas pelos modelos em comparação aos dados experimentais obtidos para a temperatura de 60°C.

**Gráfico 4- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem temperatura de 60 °C do bagaço de malte**



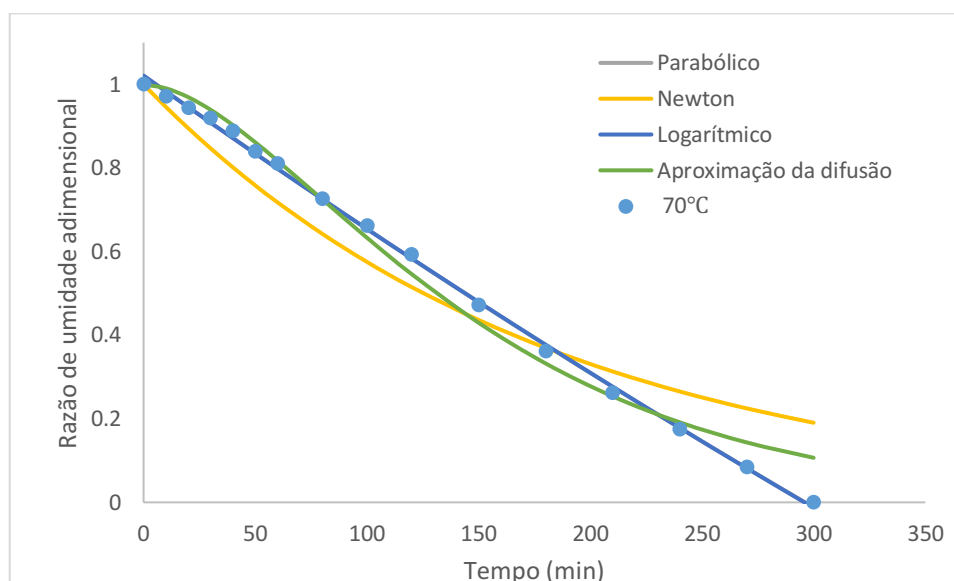
**Tabela 8- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 70 °C do bagaço de malte**

<b>Modelos</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>K</b>	<b>kb</b>
Parabólico	1,021	-0,003	1e-06	-	-
Newton	-	-	-	0,005	-
Logarítmico	5,970	-	-4,948	0,001	-
Aproximação da difusão	-15,404	-	-	0,940	0,013

Fonte: Autoria própria (2022)

No gráfico 5, são apresentadas as curvas estimadas pelos modelos em comparação aos dados experimentais obtidos para a temperatura de 70°C.

**Gráfico 5- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem temperatura de 70 °C do bagaço de malte**



Fonte: Autoria própria (2022)

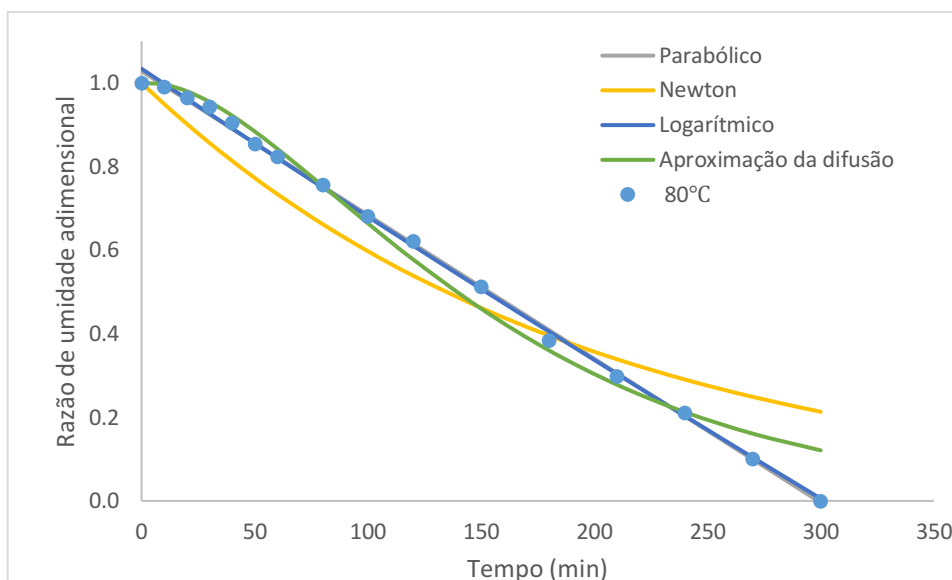
**Tabela 9- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 80 °C do bagaço de malte**

Modelos	a	b	c	k	kb
Parabólico	1,028	-0,003	6E-09	-	-
Newton	-	-	-	0,005	-
Logarítmico	11,122	-	-10,087	0,001	-
Aproximação da difusão	-15,317	-	-	0,937	0,013

Fonte: Autoria própria (2022)

No gráfico 6, são apresentadas as curvas estimadas pelos modelos em comparação aos dados experimentais obtidos para a temperatura de 80°C.

**Gráfico 6- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem temperatura de 80 °C do bagaço de malte**



### 5.5 Modelagem Matemática para a secagem realizada em micro-ondas

As tabelas 10, 11 e 12 mostram os parâmetros dos modelos ajustados, para cada potência avaliada. São também apresentados os gráficos (7, 8 e 9) comparativos entre os dados experimentais e os simulados por cada modelo, para cada potência avaliada, nas

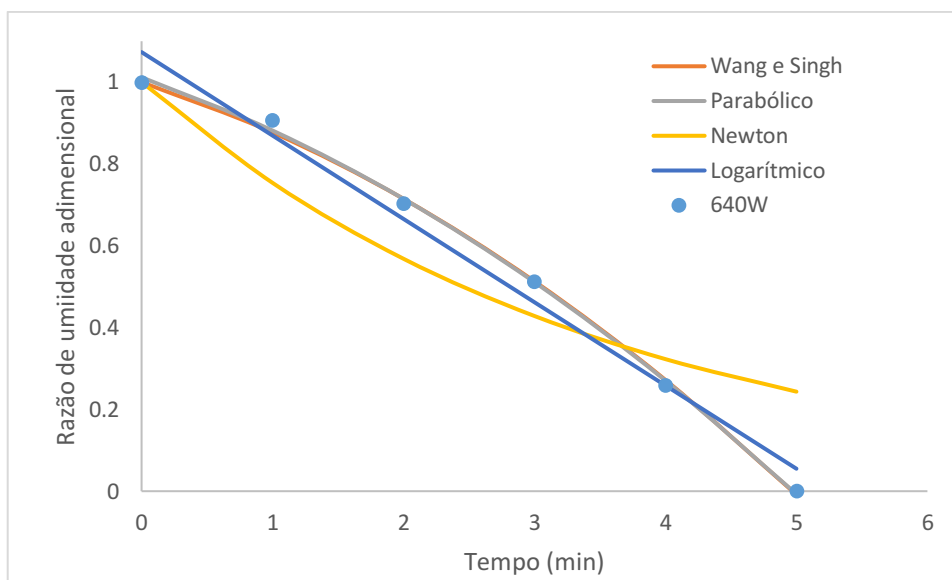
**Tabela 10- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na potência de 640W do bagaço de malte**

Modelos	a	b	c	k
Wang e Singh	-0,103	-0,020	-	-
Parabólico	1,012	-0,112	-0,018	-
Newton	-	-	-	0,283
Logarítmico	266,774	-	-265,700	0,001

Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 7- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem potência de 640W do bagaço de malte**





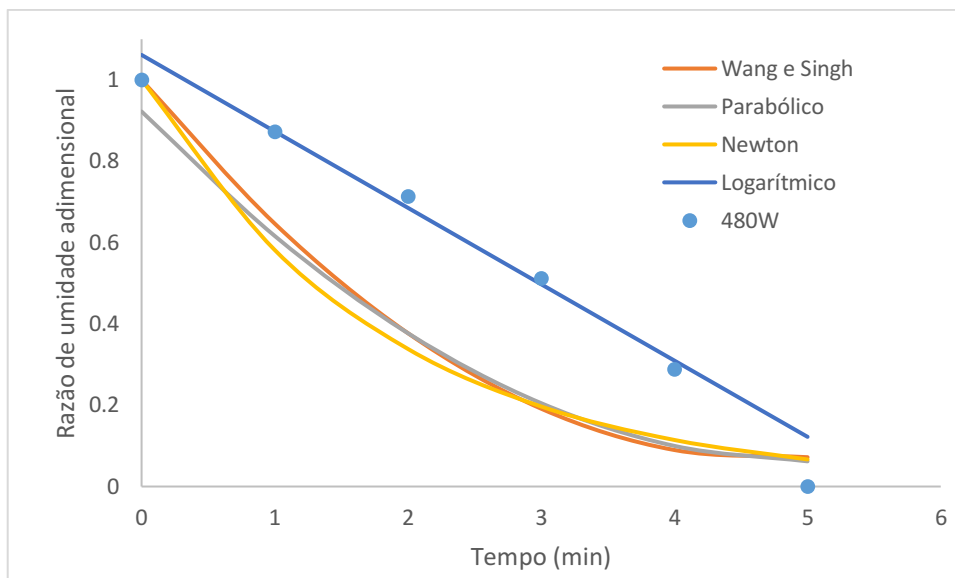
Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 11- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na potência de 480W do bagaço de malte**

Modelos	a	b	c	k
Wang e Singh	-0,105	-0,019	-	-
Parabólico	0,998	-0,104	-0,019	-
Newton	-	-	-	0,280
Logarítmico	246,023	-	-244,961	0,001

Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 8- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem potência de 480W do bagaço de malte**



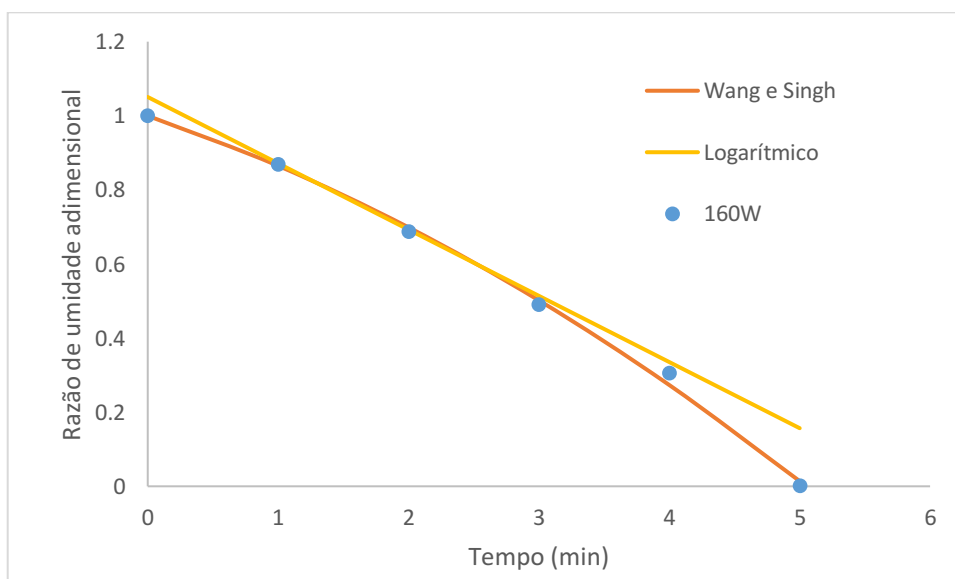
Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 12- Parâmetros para os modelos ajustados às curvas de secagem na potência de 160W do bagaço de malte**

Modelos	a	b	c	k
Wang e Singh	-0,119	-0,015	-	-
Logarítmico	234,148	-	-233,097	0,001

Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 9- Simulação para os modelos ajustados às curvas de secagem potência de 160W do bagaço de malte**



Fonte: Autoria própria (2022)

## 5.6 Análises estatísticas

A comparação entre os dados experimentais e simulados pelos modelos utilizados foi analisada por meio dos valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio médio absoluto ( $dma$ ), erro médio relativo ( $P$ ), teste de Qui-quadrado ( $X^2$ ) e o erro médio estimado ( $SE$ ) que são mostradas nas tabelas 13 a 20:

**Tabela 13- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 50 °C do bagaço de malte**

<b>Modelos</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b><math>X^2</math></b>	<b>SE</b>	<b>P (%)</b>
Parabólico	0,999	0,001	1E-02	1,546
Newton	0,969	0,008	9E-02	21,146
Logarítmico	0,999	0,001	1E-02	1,637
Aproximação da difusão	0,996	0,001	3E-02	6,570

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 14- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 60 °C do bagaço de malte**

<b>Modelos</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b><math>X^2</math></b>	<b>SE</b>	<b>P (%)</b>
Parabólico	0,998	0,005	2E-02	3,620
Newton	0,980	0,012	6E-02	13,494
Logarítmico	0,998	0,005	7E-02	3,540
Aproximação da difusão	0,988	0,007	8E-02	8,370

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 15- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 70 °C do bagaço de malte**

<b>Modelos</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b><math>X^2</math></b>	<b>SE</b>	<b>P (%)</b>
Parabólico	0,999	0,001	1E-02	1,374
Newton	0,964	0,008	9E-02	22,235
Logarítmico	0,999	0,001	1E-02	1,877
Aproximação da difusão	0,993	0,002	4E-02	5,861

**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Tabela 16- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 80 °C do bagaço de malte**

<b>Modelos</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b><math>X^2</math></b>	<b>SE</b>	<b>P (%)</b>
Parabólico	0,999	0	1E-02	1,376
Newton	0,959	0,010	10E-02	21,787
Logarítmico	0,999	0	1E-02	1,376
Aproximação da difusão	0,992	0,001	5E-02	20,097

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Observou-se na análise estatística da secagem convectiva que os modelos matemáticos Parabólico, Logarítmico e Aproximação da difusão para todas as temperaturas tiveram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superior a 98%, o que segundo Kashaninejad et al. (2007) indica uma boa representação do ajuste dos modelos no estudo da secagem. Quanto mais o coeficiente de determinação se aproxima de 1, melhor o modelo se ajustou.

Segundo Draper e Smith (1998), um erro médio estimado (SE) pequeno representa um bom ajuste do modelo aos dados, pois o valor de SE é inversamente proporcional aos processos físicos. Examinando o SE para o comportamento do ajuste para as temperaturas, foi constatado que o modelo parabólico teve o menor

valor, para as temperaturas 50, 60 e 70 °C. Já para a temperatura de 80°C, o modelo de Aproximação da difusão apresentou menor SE.

Os menores valores de teste de Qui-quadrado ( $X^2$ ) para todas as temperaturas foram do modelo matemático Parabólico, segundo Gunhan et al. (2005), quanto menor o valor de  $X^2$ , melhor o ajuste aos dados experimentais. O modelo Logarítmico também teve bons resultados de  $X^2$ . De acordo com Mohapatra e Rao (2005), os melhores ajustes de acordo com o erro médio relativo ( $P$ ) são os com menores valores, deste modo, para a temperatura de 70 °C o modelo Parabólico teve uma boa representação.

Com base na análise de todos os parâmetros estatísticos, observou-se que o modelo matemático Parabólico apresentou o melhor ajuste para a secagem convectiva, visto que este modelo teve os menores valores de  $X^2$ , SE e P e o maiores valores de  $R^2$ . Na literatura encontra-se estudos semelhantes a este, Batista et al. em 2018 estudou a secagem do bagaço de malte e o modelo matemático de Page teve o melhor ajuste em comparação ao modelo de Midilli, já Boffo et al. em 2014 estudou a secagem de uma mistura de bagaço de malte e levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) e o modelo matemático de Midilli teve o melhor desempenho em comparação ao modelo de Henderson e Pabis, Newton e Lewis e o de Page.

As análises estatísticas para a modelagem matemática realizada para os dados experimentais obtidos na secagem em micro-ondas são descritas nas tabelas de 17 a 20:

**Tabela 17- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem em micro-ondas na potência de 640 W do bagaço de malte**

<b>Modelos</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b><math>X^2</math></b>	<b>SE</b>	<b>P (%)</b>
Wang e Singh	0,999	0,001	0,010	1,939
Parabólico	0,999	0,001	0,010	2,035
Newton	0,958	0,112	0,089	15,373
Logarítmico	0,995	0,014	0,028	5,467

**Fonte: Aatoria própria (2022)**

**Tabela 18- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem em micro-ondas na potência de 480 W do bagaço de malte**

<b>Modelos</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b><math>X^2</math></b>	<b>SE</b>	<b>P (%)</b>
Wang e Singh	0,999	0	0,155	40,900
Parabólico	0,999	0	0,443	41,920
Newton	0,961	0,103	0,160	41,550
Logarítmico	0,995	0,014	0,046	4,130

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 19- Análises estatísticas para os modelos ajustados às curvas de secagem em micro-ondas na potência de 160 W do bagaço de malte**

<b>Modelos</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b><math>X^2</math></b>	<b>SE</b>	<b>P (%)</b>
Wang e Singh	0,999	0,001	0,010	2,900
Logarítmico	0,996	0,011	0,051	4,258

Fonte: Autoria própria (2022)

Para análise estatística para secagem em micro-ondas, todos os valores coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foram superiores a 95%, esse fato indica uma ótima representação dos dados (KASHANINEJAD et al., 2007).

Em relação ao erro médio estimado ( $SE$ ), para a potência de 640W o modelo Parabólico teve o melhor ajuste, já para a potência de 480W o melhor modelo foi o Logarítmico e para a potência de 160W o modelo de Wang e Singh teve o menor valor. O modelo matemático Parabólico representou melhor em todas as potências para o teste de Qui-quadrado ( $X^2$ ). Para análise do erro médio relativo ( $P$ ), o modelo Parabólico se destaca na potência de 640W.

Dentre uma análise de todos os parâmetros estatísticos, observou-se que o modelo matemático Parabólico apresentou o melhor ajuste para a secagem em micro-ondas, tendo em vista que este modelo teve os menores valores de  $X^2$ ,  $SE$  e  $P$  e o maiores valores de  $R^2$ . Souza et al. em 2020 estudou a secagem do resíduo de acerola

e obteve o melhor ajuste com o modelo matemático de Midilli, em comparação ao modelo de Newton, Henderson e Pabis, Page e Logarítimo.

**Tabela 20- Desvio médio absoluto**

<b>Temperatura/ potência</b>	<b>Desvio médio absoluto (<i>dma</i>)</b>
50 °C	0,086
60 °C	0,246
70 °C	0,277
80 °C	0,274
640 W	0,090
480 W	0,086
160 W	0,083

**Fonte: Aatoria Própria (2022)**

Segundo Puiatti et al. (2013), quanto menor o desvio médio absoluto (*dma*), melhor, deste modo, para a secagem convectiva a temperatura de 50 °C teve o melhor desempenho, já para a secagem em micro-ondas foi a potência de 160W.

## 6 CONCLUSÃO

Nos experimentos de secagem convectiva, notou-se que a temperatura de 80°C obteve uma eficiência maior quando comparada aos demais, entretanto, as temperaturas acima de 60 °C podem provocar sabores desagradáveis. Deste modo, é indicado a temperatura de 60 °C, pois ela teve um desempenho superior aos demais temperaturas abaixo.

Para a modelagem matemática realizada, observou-se que o modelo matemático Parabólico se ajustou melhor para os dois tipos de secagem realizadas, o que foi mostrado pelas análises estatísticas feitas.

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo para a avaliação de outros modelos matemáticos e uma análise de proteínas para todas a temperaturas e potências, a fim de entender a influência da secagem no teor de proteínas e melhorar a qualidade do bagaço de malte usado para a alimentação animal.



## REFERÊNCIAS

- ALVES, S. B., **Estudo teórico e experimental do processo de secagem do Abacate (*Persea americana* Mill.)**. 2014. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2014.
- ARAÚJO, W. D. et al., Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Revista Ciência Agronômica**. v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017.
- BAPTESTINI, F. M. et al., Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 19, n. 12, p.1203-1208, 2015.
- BARREIRO, N. et al., Cinética de secagem de cascas de abacaxi. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, Foz do Iguaçu, PR, Set. 2016.
- BATISTA, E. A. et al., Estudo do processo de secagem de resíduo de malte gerado na produção de cerveja. *In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Maceió-AL*, 2018.
- BOFFO, E. V. et al., Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem da mistura de bagaço de malte e levedura (*Saccharomyces cerevisiae*). *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, Florianópolis-SC, 2014.
- BOURSCHEIDT, C. T. et al., Estudo da secagem do bagaço de malte resíduo úmido obtido do processo industrial de cervejaria. **II Internacional Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management**, Foz do Iguaçu, 2011.
- BRUST, L. A. C. et al., Enfermidades em bovinos associadas ao consumo de resíduos de cervejaria. **Pesq. Vet. Bras.** v. 35, p. 956-964, 2015.
- CÂNDIDO, M. J. D. et al., Utilização de coprodutos da mamona na alimentação animal. *In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA; ENERGIA E RICINOQUÍMICA*, 2008, Salvador, BA. **Embrapa**. Ago. 2008.
- CANABARRO, N. I. et al., Secagem de folhas de pitangueira (*Eugenia uniflora*) em micro-ondas à vácuo: influência do processo nos atributos de qualidade das folhas e extratos supercríticos. *In: XL CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS*, 2022, Uberlândia, MG. out. 2022.
- CARVALHO, J. M. et al., Utilização do bagaço de malte como alimentação animal: uma alternativa para o pequeno produtor. **Cadernos UniFOA**, v. 16, n. 46, p. 1-7, 2021.
- CECCATO, B. T., **Modelagem da cinética de secagem e caracterização físico-química do bagaço de malte da produção da cerveja artesanal**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão. 2019.

CHEN, C.; PAN, Z., Heat and moisture transfer studies on walnuts during hot air drying in a fixed-bed column dryer. **Applied Thermal Engineering**. 2021.

CUSTÓDIO, D. P. et al., Ração: Alimento Animal Perecível. **Revista Eletrônica Faculdade Montes Borges**. v.1, n.2, p.131-147, 2005.

DIAS, L. G., **Estudo do Processo de Secagem em Estufa e por Microondas de Compósitos Cerâmicos de Argila e Resíduos de Esteatito**. 2013. Dissertação de Mestrado (Pósgraduação em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei. 2021.

DRAPER, N. R.; SMITH, H., **Applied regression analysis** 3. ed. New York: Wiley & Sons, 1998.

FEITOSA, B. F. et al., Cinética de secagem dos resíduos da agroindústria processadora de polpas de frutas. **Energia na Agricultura**. v. 34, n. 1, p. 134-141, 2019.

FILLAUDEAU, L. et al., Water, wastewater and waste management in brewing industries. **Journal of Cleaner Production**. v. 14, n. 4, p. 463-471, 2006.

GUIMARÃES, P. V. R., **Secagem do café: uma revisão**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia de Alimentos) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

GUMZ, P. P. S. M. **Modelagem matemática e determinação do coeficiente difusivo do processo de secagem de folhas de Malva Slyvestris L.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão. 2021.

GOMES, R. H. **Utilização de Bagaço de Malte como Ração Animal**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Química Industrial) - Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis, Assis. 2010.

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

GONELI, A. L. D. et al., Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesq. Agropec. Trop.** v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.

GUNHAN, T.; DEMIR, V; HANCIOGLU, E.; HEPBASLI, A., Mathematical modeling of drying of bay leavaes. **Energy Conversion and Management**, v. 46, n.11/12, p.765-777, 2021.

HUANG, D. et al., Application of infrared radiation in the drying of food products. **Trends in Food Science & Technology**. v. 110, p. 765-777, 2021.

JÚNIOR, P. S. B. **Doença Neurológica em Ruminantes associada ao Consumo de Bagaço de Malte Contaminado por *Aspergillus clavatus***. 2008. Tese de doutorado (Doutorado em Ciências Veterinárias) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2008.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A., TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p.98108, 2007.

KOHLI, D. et al., Drying Kinetics and Activation Energy of Asparagus Root (*Asparagus racemosus* Wild.) for Different Methods of Drying. **Curr. Res. Nutr Food Sci Jour.** v. 6, n. 1, p. 191-202, 2018.

LIMA, U. A., **Matérias-primas dos Alimentos**. São Paulo: Ed Blucher, 2010.

MACHADO, A. L. B. et al., Modelagem da Taxa de Secagem de Resíduos Sólidos de Leite de Soja. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande.** v.19, n.1, p.17-24, 2017.

MARTINS, E. A. S. et al., Cinética de secagem de folhas de timbó (*Serjania marginata* Casar). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v. 19, n. 3, p. 238-244, 2015.

MASSARDI, M. M. et al., Caracterização Química do Bagaço de Malte e Avaliação do Seu Potencial para Obtenção de Produtos de Valor Agregado. **The Journal of Engineering and Exact Sciences.** v. 6, n. 1, 2020.

MATHIAS, T. R. S., Caracterização de Resíduos Cervejeiros. *In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA*, 2014, Florianópolis, SC. Centro de Tecnologia SENAI de Alimentos e Bebidas- SENAI, out. 2014.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513518, 2005.

NAKAGAWA, K. et al., Influence of processing conditions of atmospheric freeze-drying/ low-temperature drying on the drying kinetics of sliced fruits and their vitamin C retention. **Journal of Agriculture and Food Research.** v. 6, 2021.

PANDEY, A. et al., Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: sugarcane bagasse. **Bioresource Technology.** v. 74, p. 69-80, 2000.

PUIATTI, G. A. et al., Análise de agrupamento em seleção de modelos de regressão não lineares para descrever o acúmulo de matéria seca em plantas de alho. **Rev. Bras. Biom.** v. 31, n. 3, p. 337-351, 2013.

ROSA, J. G., **Secagem de cenoura (*Daucus carota* L.) em microondas**. 2010. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2010.

SANTOS, M. S.; RIBEIRO, F. M., **Cervejas e refrigerantes**. São Paulo: CETESB, 2005.

SANTOS, F.A.; RODRIGUES M. T.; LISBOA FILHO, J. Modelo computacional para formulação de rações de mínimo custo para pequenos ruminantes utilizando programação linear. *In*: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13, 2006, Bauru. **Anais [...]**. Bauru: UFV, 2006.

SILVA, L. D. et al., Modelagem matemática do processo de secagem de resíduos agroindustriais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, Vassouras- USS, 2019.

SILVA, J. S. et al., **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda fácil, 2008.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA CERVEJA- SINDICERV. **Mercado**. Disponível em: <https://www.sindicerv.com.br/o-setor-em-numeros/>. Acesso em: 05 de out. de 2021.

SOARES, A. H., **Estudo experimental e modelagem matemática do processo de secagem da folha de batata-doce (Ipomoea batatas)**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão. 2021.

SOUZA, A. P. M. et al., Modelagem matemática da secagem de resíduo de acerola em forno micro-ondas. **Braz. J. Anim. Environ. Res.** v. 3, n. 3, p. 1797-1806, 2020.

STATISTA (2021). **Beer production worldwide from 1998 to 2019 (in billion hectoliters)**. Disponível em: <http.s://www.statista.com/statistics/270275/worldwide-beer-production/>. Acesso em: 5 de out. de 2021.

TIZZIANI, I. M., **Avaliação da secagem do bagaço de malte para aplicação como biossorvete**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão. 2021.

LIMA, T. C. et al., Estudo da Produção de Bioetanol a partir do Bagaço de Malte. *In*: X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 1.; INFLUÊNCIA DA PESQUISA EM ENGENHARIA QUÍMICA NO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INDUSTRIAL BRASILEIRO, 1., 2014, Vassouras, RJ. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**. Centro de Ciências Exatas, Tecnológicas e da Natureza – USS, v. 1, n. 1, dez. 2014.

VELASCO, M. F. **Cinética de secagem de folhas de cana-de-açúcar**. Instituto Federal Goiano. Ceres-GO, 2019.

## APÊNDICE A - Dados experimentais da secagem do bagaço de malte

**Tabela 21- Dados experimentais da secagem em estufa do bagaço de malte**

Tempo (min)	80°C		70°C		60°C		50°C	
	M1(g)	M2(g)	M1(g)	M2(g)	M1(g)	M2(g)	M1(g)	M2(g)
0	120,02	120,49	120,48	120,25	120,74	120,87	120,76	120,58
10	119,60	120,22	119,89	118,95	117,71	124,04	120,40	119,88
20	118,42	119,37	119,11	117,83	116,15	121,87	119,62	119,39
30	117,55	118,58	118,11	117,11	115,11	121,30	118,12	118,12
40	116,05	117,11	117,11	116,03	114,14	120,12	116,15	116,55
50	113,84	115,34	115,44	114,37	112,63	118,97	114,42	114,72
60	112,65	114,22	114,54	113,29	111,42	117,72	112,22	113,33
80	109,84	111,79	111,73	110,33	109,12	114,97	109,05	109,70
100	106,74	109,10	109,31	108,39	106,55	112,13	105,85	106,97
120	104,17	106,95	106,99	106,00	104,31	109,83	102,89	104,34
150	99,77	102,97	102,89	101,9	103,15	103,13	99,24	99,70
180	94,51	98,28	98,86	98,39	98,87	99,67	95,05	96,33
210	91,30	94,85	95,84	94,73	94,21	94,63	91,84	92,89
240	87,09	92,24	92,50	92,03	92,40	92,52	88,43	90,03
270	82,58	88,11	89,31	89,08	89,84	89,22	84,63	86,81
300	78,74	84,24	86,6	86,08	86,25	85,85	81,39	83,93

Fonte: Aatoria Própria (2022)

**Tabela 22- Dados experimentais da secagem em micro-ondas do bagaço de malte**

Tempo (min)	640 W		480 W		160 W	
	M1(g)	M2(g)	M1(g)	M2(g)	M1(g)	M2(g)
0	30,08	30,25	30,77	30,25	30,40	30,33
1	29,85	29,85	30,36	30,01	30,17	30,35
2	29,22	29,10	29,94	29,63	30,05	30,20
3	28,55	28,49	29,46	29,1	29,94	30,02
4	27,72	27,61	28,86	28,57	29,79	29,89
5	26,76	26,82	28,1	27,88	29,61	29,62

Fonte: Aatoria Própria (2022)