

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO TELLI CECCATO

**MODELAGEM DA CINÉTICA DE SECAGEM E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-
QUÍMICA DO BAGAÇO DE MALTE DA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL**

**FRANCISCO BELTRÃO
2019**

BRUNO TELLI CECCATO

**MODELAGEM DA CINÉTICA DE SECAGEM E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-
QUÍMICA DO BAGAÇO DE MALTE DA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Química do Departamento Acadêmico de Engenharia Química - DAENQ - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Químico.

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Junior Nicolin

Coorientador(a): Prof^a. Dr^a. Silvane Morés

FRANCISCO BELTRÃO
2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

BRUNO TELLI CECCATO

MODELAGEM DA CINÉTICA DE SECAGEM E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BAGAÇO DE MALTE DA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL

Trabalho de Conclusão de Curso
Obtenção do título de Engenheiro Químico
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Francisco Beltrão
Engenharia Química

Data de aprovação: 01 de julho de 2019.

Prof. Dr. Douglas Junior Nicolin
Professor Orientador

Prof^ª. Dr^ª. Silvane Morés
Professora Coorientadora

Prof^ª. Dr^ª. Naimara Vieira do Prado
Membro da Banca

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

" Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado ".

Roberto Shinyashiki

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, por todo suporte, amor e apoio a mim fornecidos.

Agradeço a todos os meus amigos que sempre estiveram me apoiando. Em especial, a Eduardo Pivatto, Fabio Bastiani e Gustavo Petrolí, os quais acompanharam minha trajetória ao longo de todo o curso, me ajudando em meus momentos mais difíceis.

Agradeço muito ao meu orientador dr. Douglas Junior Nicolin, o qual me serve de inspiração, não somente a como ser um ótimo profissional e que ama o que faz, mas também como pessoa, com ótimos valores e atitudes.

Agradecimentos a minha coorientadora dra. Silvane Morés, a qual me proporcionou um aprendizado que complementou muito a minha formação.

Meu muito obrigado a todos que de alguma forma me ajudaram e me apoiaram durante a realização deste trabalho.

Agradeço também aos servidores da UTFPR-FB por me disponibilizarem o ambiente e equipamentos necessários para elaboração dos meus experimentos.

RESUMO

A cerveja é uma das bebidas mais consumidas no mundo. Em seu processo de fabricação, diversos resíduos são gerados. Dentre eles, destaca-se o bagaço de malte. Este resíduo é gerado abundantemente e é intrínseco ao processo. Dessa maneira, faz-se necessário reaproveitá-lo de alguma forma. Porém, este resíduo contém alto valor de umidade, o que inviabiliza sua armazenagem por longos períodos. Com isso, a secagem deste material se torna uma opção viável não só para evitar sua degradação por microrganismos, mas também para reduzir o volume ocupado por ele. Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivo estudar e propor um modelo que descreve o fenômeno de secagem do bagaço de malte. Partindo-se da equação de Lewis, a cinética de secagem foi analisada para três temperaturas diferentes. Para isso, utilizou-se o software MATLAB[®] para as rotinas computacionais, já que a obtenção da solução analítica normalmente se torna inviável ou trabalhosa e, portanto, a utilização de métodos numéricos permitiu sua validação. Com a fabricação da cerveja artesanal, separou-se o bagaço de malte e os dados experimentais de sua secagem foram obtidos. Com isso, foi ajustado um modelo matemático com base na equação de Lewis, em que se considerou um coeficiente de transferência de massa (k) variando exponencialmente com a umidade, e ele foi comparado com um modelo de k constante (modelo de Newton). Além disso, validou-se os parâmetros e o modelo utilizado por meio de histogramas e qqplots (quantil vs quantil) dos resíduos, bem como o erro quadrático médio. Erros muito baixos foram atingidos com o modelo com k variável, comprovando que a secagem do bagaço de malte pode ser representada pelo modelo proposto. Além disso, com o intuito de estudar as melhores destinações para este material seco, caracterizou-se físico-quimicamente o bagaço de malte, analisou-se suas propriedades e foram estabelecidos os melhores destinos para este produto com grande potencial econômico.

Palavras-chave: Cerveja. Bagaço de malte. Secagem. Modelagem. Caracterização físico-química.

ABSTRACT

The beer is one of the most consumed drinks in the world. In its fabrication process, various residues are generated. Among them, stand out the brewer's spent grain. This residue is generated abundantly, and it is intrinsic to the process. In this way, it is necessary to reuse it. However, this residue contains a high value of moisture, which makes it impossible to store it for long periods of time. With this, the drying of this material becomes a viable option, not only to avoid its degradation by microorganisms, but also to reduce the volume occupied by it. In this way of sense, the present work had the objective of studying and proposing a model that describes the drying kinetics of brewer's spent grain. From the Lewis equation, the drying kinetic was analyzed for three different temperatures. For this, the software MATLAB[®] was used for the computational routines, since obtaining analytical solutions usually becomes impractical or arduous, and therefore, the use of numerical methods provides its validation. With the production of the craft beer, the brewer's spent grain was separated and the experimental data of its drying were obtained. Thus, a mathematical model was fitted based on the Lewis equation, by considering that the mass transfer coefficient (k) varied exponentially with moisture, and it was compared with a model of constant k (Newton's model). In addition, the parameters and the model used were validated using histograms and qqplots (quantil vs quantil) of the residues, as well as the Mean Squared Errors. Very low errors were reached with the model with a variable k , showing that the drying of brewer's spent grain can be represented by the proposed model. In addition, in order to study the best destinations for this dry material, brewer's spent grain was physical-chemically characterized, its properties were analyzed and the best destinations for this product with great economic potential were established.

Keywords: Beer. Brewer's spent grain. Drying. Modeling. Physical-chemical characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo cervejeiro	15
Figura 2 - Curvas de secagem	21
Figura 3 - Taxa de secagem do BSG ao longo do tempo em condições isotérmicas	21
Figura 4 - Representação esquemática da obtenção do bagaço de malte	26
Figura 5 - Aquecimento da água na panela de mostura	28
Figura 6 - Adição do malte na tina de mostura	29
Figura 7 - Recirculação do mosto cervejeiro	29
Figura 8 - Lavagem do mosto	29
Figura 9 - Bagaço de malte úmido	30
Figura 10 - Separação do bagaço de malte	30
Figura 11 - Etapas experimentais	31
Figura 12 - Amostras prontas para secagem	32
Figura 13 - Parâmetro a_1 ajustado para as três temperaturas analisadas	38
Figura 14 - Parâmetro b_1 ajustado para as três temperaturas analisadas	38
Figura 15 - Comportamento do parâmetro k_{ad} em função da umidade X_{ad}	39
Figura 16 - Comparação entre o modelo de Lewis modificado e dados experimentais	40
Figura 17 - Comparação do modelo de Lewis e de Newton com os dados experimentais	41
Figura 18 - Histograma dos resíduos para 50°C	43
Figura 19 - Histograma dos resíduos para 60°C	43
Figura 20 - Histograma dos resíduos para 70°C	44
Figura 21 - Qqplot dos resíduos para 50°C	44
Figura 22 - Qqplot dos resíduos para 60°C	45
Figura 23 - Qqplot dos resíduos para 70°C	45
Figura 24 - Distribuição dos resíduos em torno de zero para 50°C	46
Figura 25 - Distribuição dos resíduos em torno de zero para 60°C	46
Figura 26 - Distribuição dos resíduos em torno de zero para 70°C	46
Figura 27 - Amostra antes (A) e após (B) a secagem	48
Figura 28 - Amostra após análise de cinzas	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da secagem do resíduo	32
Tabela 2 - Características do processo de secagem do bagaço de malte	37
Tabela 3 - Valores de a_1 e b_1 do modelo	40
Tabela 4 - Valores de MSE dos modelos em estudo	42
Tabela 5 - Resultado da análise físico-química do bagaço de malte	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Modelos empíricos de secagem

24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	15
3.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CERVEJA	15
3.1.1	Etapas do Processo Cervejeiro	15
3.1.2	Resíduos do Processo Cervejeiro	18
3.2	SECAGEM	19
3.2.1	Cinética de Secagem	20
3.3	MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM	22
3.3.1	Modelos Empíricos e Fenomenológicos	23
3.3.2	Modelos Semi-empíricos	25
3.4	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BAGAÇO DE MALTE	26
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	28
4.1	OBTENÇÃO DO BAGAÇO DE MALTE	28
4.1.1	Etapas Para Obtenção do Resíduo	28
4.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	30
4.2.1	Secagem do Bagaço de Malte	37
4.2.2	Modelagem Matemática	37
4.2.3	Ajuste de Parâmetros	37
4.2.4	Análise Físico-Química dos Grãos	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1	RESULTADOS DA SECAGEM DO BAGAÇO DE MALTE	37
5.1.1	Ajuste dos Parâmetros do Modelo	37
5.1.2	Aplicação do Modelo Matemático	40
5.1.3	Validação do Modelo Matemático	41
5.2	RESULTADOS DA ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO BSG	47
6	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A - Rotina computacional do modelo	62
	APÊNDICE B - Resultados das análises realizadas pelo laboratório LGQ	65

1 INTRODUÇÃO

“A cerveja é uma bebida alcoólica obtida a partir da fermentação alcoólica do mosto cervejeiro oriundo do malte de cevada e água potável, por ação da levedura, com adição de lúpulo.” (BRASIL, 1997, p. 11).

O setor cervejeiro tem sido muito relevante para a economia do Brasil, o qual se tornou o terceiro maior produtor de cerveja do mundo em 2016 (GOVERNO DO BRASIL, 2017). A cerveja é uma das bebidas mais consumidas no mundo, e de origem muito antiga (OLAJIRE, 2012; SIQUEIRA, P. B.; BOLINI; MACEDO, 2008; UGHELINI, 2016). Junto com o aumento da produção de cerveja nas últimas duas décadas a nível global, estimado em 1,95 bilhão de hectolitros em 2017, o número de cervejarias artesanais vem aumentando e acompanhando a expansão desse setor (STATISTA, 2017). Só no Brasil, o número de cervejarias artesanais registradas no país cresceu 37,7% em 2017 (ABRACERVA, 2018).

Um dos principais subprodutos do processo cervejeiro é o bagaço de malte, ou *brewer's spent grain* (BSG), representando cerca de 85% de todos os resíduos gerados pelas indústrias cervejeiras. Esse subproduto contabiliza, em média, 20 kg de BSG gerados a cada 100 L de cerveja produzida (BUFFINGTON, 2014; MAHMOOD et al., 2012; MUSSATTO, 2014; OHRA-AHO et al., 2016).

Anualmente, mais de 30 milhões de toneladas de bagaço de malte são produzidos no mundo (NIEMI et al., 2012; XIROS; CHRISTAKOPOULOS, 2012). Esse resíduo caracteriza-se por ser um material lignocelulósico rico em fibras e proteínas, e estima-se que este resíduo seja capaz de disponibilizar níveis de nutrientes acima de 60% (BATISTA, 2016; MELLO; VERGÍLIO; MALI, 2013; SOUSA et al., 2016). Devido a sua grande capacidade nutricional, e da necessidade de reaproveitar esse resíduo tão amplamente gerado, vários são os trabalhos que se dedicam a fornecer aplicações para o bagaço de malte. Dentre eles, destacam-se a utilização do bagaço de malte como fonte de proteína para vacas leiteiras (POLAN et al., 1985), como matéria-prima para a produção de butanol (PLAZA et al., 2017), hidrogênio (ZHANG; ZANG, 2016) e ácido carboxílico (LIANG; WAN, 2015), transformação do amido residual do bagaço de malte em açúcares fermentáveis usando tecnologia supercrítica (LUFT et al., 2018b), e também na produção de tijolos de construção e xilitol (ALIYU; BALA, 2011; BOREL et al., 2018).

Para o manuseio adequado do bagaço de malte, transporte, armazenamento, conservação das propriedades químicas e proteção desse resíduo contra degradação enzimática oxidativa (PARK; YADO; BROD, 2001), a operação de secagem é indicada. A secagem

resume-se a reduzir a umidade contida no material por meio do contato íntimo com ar aquecido (DA MOTTA et al., 2017).

Para a análise e representação do fenômeno de secagem, modelos matemáticos têm sido estudados para simular com boa precisão esse processo. Os modelos existentes podem ser classificados como empíricos, semi-empíricos ou fenomenológicos, sendo que os modelos fenomenológicos consideram pressupostos teóricos e etapas elementares de transferência de massa, logo são mais vantajosos que os modelos empíricos quando se busca um melhor entendimento do processo a ser analisado (BEQUETTE, 1998; NICOLIN; JORGE; JORGE, 2015). Além de representarem o comportamento dos dados experimentais analisados, os modelos podem, também, prover informações importantes para o dimensionamento de equipamentos, otimização e viabilidade econômica do processo (GOMES et al., 2018).

Além da importância do processo de secagem para o aproveitamento do resíduo cervejeiro, faz-se relevante o estudo das propriedades físico-químicas dos grãos envolvidos na geração deste resíduo. Dentre as várias caracterizações possíveis de serem realizadas, destacam-se a análise de umidade, que afeta diretamente a estocagem, embalagem e o processamento dos grãos (CECCHI, 2003), quantificação de fibras, que exercem efeitos metabólicos e fisiológicos no organismo humano (MAYER et al., 2007), quantificação de carboidratos, proteínas e cinzas, que são componentes de grande relevância na composição do bagaço de malte (LUFT et al., 2018a), análise de acidez, pH, e também de lipídio, que é um componente minoritário (REINOLD, 1997). Estas são algumas das caracterizações que serão abordadas neste trabalho.

O presente trabalho tem como principal problemática modelar a secagem do bagaço de malte proveniente de um processo de fabricação de cerveja artesanal utilizando um modelo matemático, com o intuito de representar a cinética de secagem de maneira mais precisa possível.

Para a criação de rotinas computacionais que resolvam o modelo proposto, faz-se necessário encontrar uma solução numérica adequada que resolva com boa precisão a equação do modelo.

Por fim, o último problema a ser superado é a caracterização do bagaço de malte seco e sua posterior destinação. Algumas propriedades possuem metodologias conhecidas e bastante reportadas na literatura, outras, no entanto, necessitam de um estudo mais aprofundado para encontrar métodos eficazes e passíveis de realização no âmbito acadêmico. Por meio destas análises de caracterização, é possível verificar qual a melhor destinação que pode ser dada ao bagaço de malte.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Modelar o processo de secagem do bagaço de malte, validar os resultados e caracterizar o bagaço físico-quimicamente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar matematicamente o processo da cinética de secagem do bagaço de malte;
- Utilizar o software MATLAB[®] para realizar as rotinas de programação;
- Realizar a comparação do modelo utilizado com o modelo exponencial tradicional de Newton;
- Validar o modelo obtido frente aos dados experimentais, assim como obter os principais parâmetros;
- Caracterizar físico-quimicamente o bagaço de malte por meio das análises de pH, cinzas, acidez, fibra bruta, proteínas, lipídios, carboidratos e umidade;
- Analisar os melhores destinos para o reaproveitamento do bagaço de malte.

3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

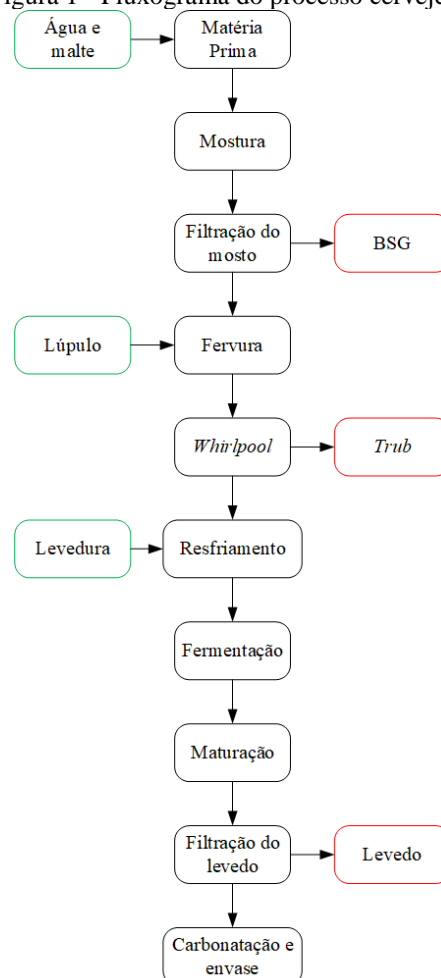
3.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CERVEJA

O processo cervejeiro pode ser diferenciado pelo tipo de fermentação, que pode ser do tipo contínua ou descontínua. A fermentação descontínua é a mais utilizada por cervejeiros artesanais, na qual a maior parte dos nutrientes são adicionados ao tanque fermentador antes do início do processo de fermentação. Já no processo contínuo, o meio de cultura é alimentado continuamente de forma a manter o volume de reação constante (TSCHOPE, 2001).

3.1.1 Etapas do Processo Cervejeiro

Independente do estilo de fermentação escolhido, o processo cervejeiro consiste em diversas etapas, as quais podem ser melhor observadas de acordo com a Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do processo cervejeiro



Fonte: Autoria própria (2018).

O processo cervejeiro inicia-se com o preparo das matérias-primas água e malte. É importante que a água possua uma boa qualidade antes de ser inserida no processo. O controle de características como pH, turbidez, quantidade de minerais e padrões microbiológicos aceitáveis são de suma importância para a obtenção de cervejas de qualidade (ALMEIDA, 2014; HUGHES, 2014; ROSA; AFONSO, 2015).

Em relação aos grãos de malte, para uma melhor eficiência do processo, estes devem passar por um processo de moagem antes de adentrarem na fase de mosturação. A moagem tem por objetivo reduzir o tamanho dos grãos através de sua quebra, a fim de facilitar a extração do endosperma e o rompimento da casca. Isso permite obter uma boa eficiência da ação enzimática na fase de mosturação. Outro aspecto importante a ser levado em conta é a granulometria dos grãos obtida neste processo. Uma granulometria fina demais pode prejudicar o posterior processo de filtragem do mosto, assim como liberar substâncias indesejadas. Em contrapartida, uma granulometria muito grossa ocasiona uma perda de rendimento do processo de mosturação (DRAGONE; SILVA; SILVA, 2010; VIEIRA, 2009).

A fase da mostura caracteriza-se pela mistura dos grãos de malte moídos e a água. Essa mistura deve ser feita a temperaturas específicas, que dependem do tipo de cerveja escolhida. Independente disso, o objetivo principal desta etapa está na fabricação do mosto cervejeiro, em que enzimas, como alfa e beta amilases, são ativadas para promover a hidrólise do amido em açúcar fermentável, como maltose e glicose (DRAGONE; SILVA; SILVA, 2010; KUNZE, 2004; ROSA; AFONSO, 2015; SIQUEIRA, P. B.; BOLINI; MACEDO, 2008).

Feita a extração dos compostos solúveis de interesse, o mosto se encaminha para a etapa de filtração. Primeiro eleva-se a temperatura entre 74 e 78°C para inativar as enzimas. Em seguida, o mosto é filtrado, com a cama de grãos formada exercendo a função de camada filtrante. Isso é feito através da recirculação do mosto cervejeiro, o que implica na sua clarificação, pela decantação do material insolúvel, bem como numa maior retirada de extrato, garantindo uma maior eficiência do processo. Ao término desse passo, há a retirada do bagaço de malte do processo e o mosto segue para a etapa de fervura (KUNZE, 2004; ORTIZ, 2014; ROSA; AFONSO, 2015; VIEIRA, 2009).

Com todo o mosto presente na panela de fervura, este então é aquecido até sua fervura. Nesta etapa é onde acontece a adição do lúpulo, responsável tanto por conferir sabor e aroma, quanto amargor. A dosagem e o tempo de fervura do lúpulo são fundamentais para buscar o equilíbrio entre amargor, sabor e aroma desejados. O principal fator determinante do amargor é a quantidade de alfa-ácido presente nas resinas do lúpulo. A mudança na estrutura dos alfa-ácidos devido à fervura é chamada de isomerização. A isomerização do lúpulo é a responsável

pelo amargor fornecido ao mosto. Quanto maior o tempo de fervura do lúpulo, mais o amargor é pronunciado. Em contrapartida, em pouco tempo de fervura, o aroma do lúpulo é destacado. Além disso, a fervura é importante para esterilizar o mosto, inativar as enzimas presentes, bem como evaporar substâncias indesejadas (HUGHES, 2014; KUNZE, 2004; ROSA; AFONSO, 2015; SIQUEIRA, P. B.; BOLINI; MACEDO, 2008; VIEIRA, 2009).

Ao término da fervura, é comum os cervejeiros realizarem a etapa do *whirlpool*. Este processo consiste basicamente em realizar movimentos circulares no mosto, que serve tanto pra diminuir um pouco sua temperatura, como para decantar proteínas coaguladas e bagaço de lúpulo, sendo esta mistura conhecida como *trub*. Com isso, há a separação do *trub* do mosto (KUNZE, 2004; ORTIZ, 2014).

Após esta etapa, é necessário resfriar o mosto até que se atinja uma temperatura que forneça uma boa condição para a levedura, para só então dar início à fermentação. O resfriamento normalmente é feito com um *chiller* de imersão, e é importante que o resfriamento ocorra de forma rápida, para evitar possíveis contaminações (HUGHES, 2014; ROSA; AFONSO, 2015).

Ao inserir a levedura no mosto, é importante que o meio esteja aerado, livre de contaminantes e a uma temperatura segura para a levedura. A aeração é basicamente a inserção de mais oxigênio ao mosto, para que a levedura possa se reproduzir rapidamente antes de iniciar a fermentação anaeróbica. Isso normalmente é feito pela agitação do balde fermentador, ou mesmo durante a passagem do mosto da panela de fervura ao balde fermentador, sendo possível obter a oxigenação necessária. O processo de fermentação é uma etapa fundamental, senão a mais importante do processo cervejeiro. É nesta etapa que há a o consumo dos carboidratos fermentáveis por parte da levedura, e a transformação em etanol e CO₂. A principal espécie de levedura cervejeira é a *Saccharomyces cerevisiae*, porém existem inúmeras cepas diferentes. Muitos são os parâmetros que devem ser levados em conta nesta etapa para se obter a cerveja desejada, como um nível de sanitização adequado, a escolha da cepa, nível de atenuação desejado, quantidade de células, temperatura controlada e o tipo de fermentação escolhida. Devido à complexibilidade deste processo, a forma mais simples de controle para verificar se o processo está acontecendo conforme o planejado é a medida da densidade do meio. Com isto, é possível obter uma estimativa da quantidade de açúcar que há no meio, bem como a quantidade de álcool presente (CARVALHO; BENTO; SILVA, 2006; EVANGELISTA, 2001; ROSA; AFONSO, 2015; SIQUEIRA, P. B.; BOLINI; MACEDO, 2008; VIEIRA, 2009).

Ao término da fermentação, a temperatura é diminuída para próximo de 0°C para que ocorra o processo de maturação. Nesta etapa, há a decantação da maior parte das leveduras e de

algumas substâncias no fundo do balde fermentador, bem como algumas mudanças que ocasionam o aprimoramento do sabor e clarificação da cerveja. Nesse período, há o consumo dos carboidratos residuais por parte das leveduras, bem como a metabolização de algumas substâncias indesejáveis oriundas da fermentação. Além disso, ocorrem algumas reações de esterificação que proporcionam um aroma e sabor a cerveja. O tempo de maturação depende da finalidade e do estilo de cerveja escolhido pelo cervejeiro (FERREIRA; BENKA, 2014; ROSA; AFONSO, 2015; SIQUEIRA, P. B.; BOLINI; MACEDO, 2008).

Antes de iniciar o processo de carbonatação e envase, é necessário retirar o levedo depositado no fundo do tanque, isso é normalmente feito trocando a cerveja de recipiente antes do envase, isolando o levedo para que possa ser reaproveitado para novas bateladas. Feita esta separação, a cerveja está pronta para ser carbonatada e envazada (FERREIRA et al., 2010; FILLAUDEAU; BLANPAIN-AVET; DAUFIN, 2006; OLAJIRE, 2012; ORTIZ, 2014).

A carbonatação consiste em acrescentar CO₂ no líquido para formar o gás da cerveja. Para tanto, há dois métodos muito utilizados por cervejeiros caseiros: o *priming* e a carbonatação forçada. O *priming* consiste em refermentar a cerveja para formar CO₂, com a adição de açúcar fermentável na garrafa, utilizando-se das leveduras residuais presentes na cerveja. A carbonatação forçada consiste em utilizar cilindro de gás carbônico para a inserção do CO₂. A cerveja pode ser envasada na garrafa, lata ou mesmo em barris (HUGHES, 2014; ORTIZ, 2014; PALMER, 2006; VIEIRA, 2009).

3.1.2 Resíduos do Processo Cervejeiro

Ao final do processo de fabricação da cerveja, há a geração de três resíduos principais: bagaço de malte, o *trub* (resíduo sólido decantado no fundo da panela de fervura) e a levedura residual. Por mais que a indústria cervejeira tenha passado por grandes avanços tecnológicos, e ainda continua avançando, estes resíduos são intrínsecos ao processo e de difícil diminuição nas suas gerações (BATISTA, 2016; MATHIAS; MELLO; SERVULO, 2014). Com isso, devido ao grande apelo recente pela diminuição da degradação do meio ambiente, as indústrias têm dado grande importância ao reaproveitamento de seus resíduos. Dadas às características dos resíduos cervejeiros, de serem facilmente reciclados e reutilizados, estes têm sido amplamente explorados para o uso alimentício e biotecnológico, servindo de matéria-prima para novos processos (CORDEIRO, 2011; MUSSATTO; DRAGONE; ROBERTO, 2006; XIROS; CHRISTAKOPOULOS, 2012).

Apesar do *trub* ainda não ser muito aplicado na indústria alimentícia, estudos indicam que este resíduo possui componentes fenólicos, de origem no lúpulo, os quais apresentam uma atividade antioxidante, e por conta disso, podem ser empregados no enriquecimento de produtos alimentícios (MUNEKATA et al., 2016; SARAIVA et al., 2018).

A levedura cervejeira *Saccharomyces cerevisiae* residual, por possuir uma composição rica em proteínas, minerais, aminoácidos e outros compostos de interesse, pode ser aplicável em processos biotecnológicos. Além disso, por também apresentar vitaminas, a levedura é comumente utilizada na alimentação animal, como suplemento, após ser secada (CHAE; JOO; IN, 2001; FERREIRA et al., 2010; MUSSATTO, 2009).

O bagaço de malte, por possuir excelentes características nutricionais, relativo baixo custo e ser altamente gerado no processo, se torna um resíduo altamente valoroso, e gera interesses de diversas áreas, incluindo a alimentícia e a biotecnológica (ALIYU; BALA, 2011; LYNCH; STEFFEN; ARENDT, 2016; MUSSATTO, 2014; SANTOS et al., 2003).

Gotthardi et al. (2018) substituíram a farinha de trigo por bagaço de malte na elaboração de um pão de mel, e obtiveram maiores valores de cinzas, fibras e proteínas quando compararam com um pão de mel comercial. Rigo et al. (2017) elaboraram biscoitos do tipo *cookies* com o enriquecimento de farinha de bagaço de malte, e obtiveram ganhos nutricionais de cinzas, proteínas, lipídios e fibras quando comparados com os biscoitos somente de farinha de trigo, bem como uma grande aceitação do produto por parte dos provadores.

3.2 SECAGEM

O processo de secagem consiste na transferência de massa de um líquido presente no interior de um sólido (normalmente a água) para uma fase gasosa não saturada, com o intuito de reduzir a umidade do sólido (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993).

Este processo se faz de extrema importância quando relacionado à qualidade do produto final (SIQUEIRA, V. C.; RESENDE; CHAVES, 2012). Jangam (2011) afirma que diversos produtos alimentícios necessitam de alguma forma de preservação para minimizar, ou impedir, a deterioração microbiana. De acordo com Resende et al. (2010), a conservação do produto através da secagem é baseada no fato de que os microrganismos dependem da água para suas atividades. Além disso, o manuseio e o transporte do produto são facilitados com esta operação unitária (DA MOTTA et al., 2017).

Os sólidos a serem secos podem estar em diferentes formas e conter várias propriedades diferentes (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993). O tipo de secagem escolhida

depende da quantidade de material a ser secado, bem como da qualidade que é requerida para seu uso (MELLMANN; WEIGLER; SCAAR, 2018). Dependendo do método e das condições de secagem, como temperatura, as propriedades físicas e qualidade do produto podem ser alteradas (MELLMANN; WEIGLER; SCAAR, 2018; RESENDE et al., 2008).

Dentre os vários produtos que podem se beneficiar do processo de secagem, destaca-se o bagaço de malte. A sua secagem tem aberto um vasto nicho de aplicação, fato este comprovado pela grande quantidade de publicações recentes de trabalhos que tem como enfoque o estudo de sua aplicabilidade, principalmente no setor de biotecnologia (XIROS; CHRISTAKOPOULOS, 2012).

Segundo dados levantados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA (2018), o Brasil produziu em 2017 cerca de 14 bilhões de litros de cerveja, consolidando 679 cervejarias. Em 2018, este número já aumentou para mais de 800 unidades produtoras, com base em dados fornecidos pelo MAPA (2019). Como consequência disso, a produção de resíduos também é afetada. Segundo dados da CervBrasil (2018), os maiores fabricantes do país já registram índice de pelo menos 98% na reciclagem de resíduos gerados da produção cervejeira, colaborando, também, para o aumento no interesse relativo a essa área. Desse modo, a operação unitária de secagem se torna uma alternativa para a conservação do produto, necessária para uma estocagem segura a nível baixo de umidade, sendo que o bagaço de malte úmido normalmente contém de 70% a 85% de umidade (ALIYU; BALA, 2011; LYNCH; STEFFEN; ARENDT, 2016; XIROS; CHRISTAKOPOULOS, 2012).

3.2.1 Cinética de Secagem

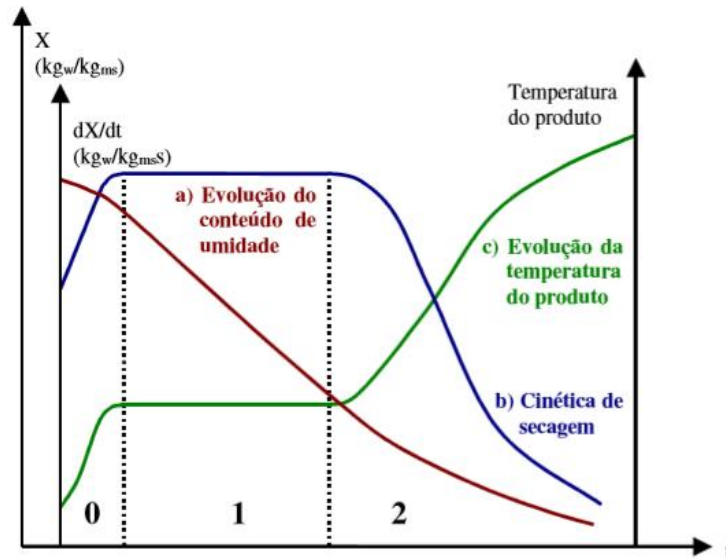
A secagem pode ser realizada com diversos tipos de equipamentos, dentre eles destacam-se o uso de secadores, estufas e infravermelho (LOPES et al., 2015). As condições de secagem são determinadas pelas características específicas do produto, propriedades do ar de secagem e a forma como é realizada (BROD; ALONSO; PARK, 1999; PARK; YADO; BROD, 2001).

A cinética de secagem pode ser representada por três curvas que indicam a variação de umidade ao longo do tempo, a taxa de secagem ao longo do tempo e o teor de umidade do material. Na Figura 2 é mostrado como o processo de secagem, caracterizado por ambas as transferências de calor e massa, se comporta (BATISTA, 2016; BROD; ALONSO; PARK, 1999; DIAS, 2013).

A curva a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, cuja

curva pode ser obtida pesando o material em intervalos regulares. A curva b) representa a taxa de variação do conteúdo de umidade do produto ao longo do tempo, dX/dt , isto é, é a curva obtida diferenciando a curva a). A curva c) representa a variação de temperatura do produto durante a secagem, e pode ser obtida através da medição da temperatura do material ao longo do processo (BATISTA, 2016; DIAS, 2013).

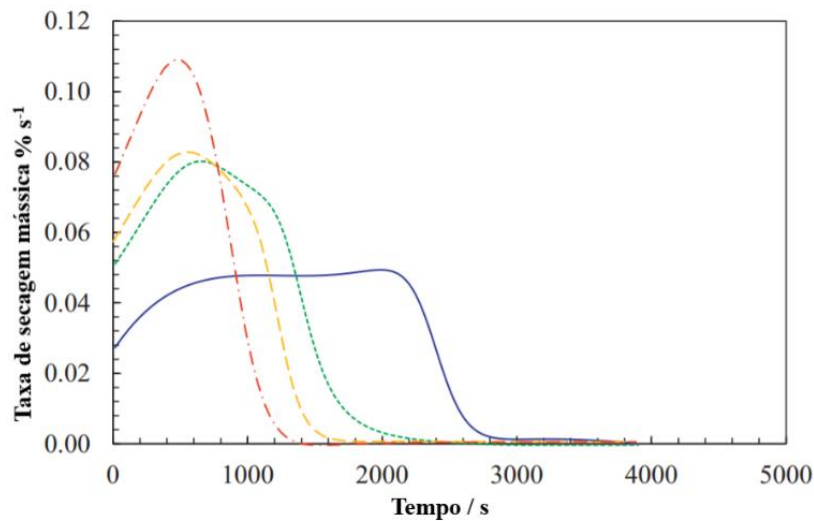
Figura 2 - Curvas de secagem



Fonte: Brod, Alonso e Park (1999).

Em relação aos períodos 0, 1 e 2, estes podem ser melhor compreendidos analisando-se a Figura 3, que apresenta a cinética de secagem do bagaço de malte para diferentes temperaturas, obtida do trabalho de Mallen e Najdanovic-Visak (2018).

Figura 3 - Taxa de secagem do BSG ao longo do tempo em condições isotérmicas



Fonte: Adaptado de Mallen e Najdanovic-Visak (2018).

A curva azul representa a taxa de secagem a 60°C, na qual são observadas três fases: a primeira é o período inicial, onde há o aumento acentuado da taxa de secagem, ocasionado pelo aquecimento do material. A segunda fase é o período em que a taxa de secagem é constante, representando a evaporação da água da superfície saturada do material. A terceira, por sua vez, é o período em que há uma taxa de secagem decrescente, onde ocorre a migração da água do interior do produto à superfície (MALLEN; NAJDANOVIC-VISAK, 2018).

As curvas verde e amarela dizem respeito as temperaturas de 70°C e 80°C, respectivamente. Nessas duas temperaturas, o período de taxa de secagem constante deixou de existir, e dois períodos de queda da taxa de secagem foram observados. O primeiro indica que a superfície do material tem pontos saturados e secos, e a transferência de massa é controlada tanto pela difusão quanto pela evaporação da água. O segundo período de queda ocorre quando a superfície do produto está seca e a difusão da água no sólido é observada (MALLEN; NAJDANOVIC-VISAK, 2018).

A curva vermelha está relacionada a temperatura de 90°C e nela é observável apenas um período de aumento da taxa de secagem e outro de diminuição, indicando que a água presente na superfície do produto evapora logo no aquecimento inicial, seguido pela difusão da água no interior do sólido (MALLEN; NAJDANOVIC-VISAK, 2018).

De forma a estudar o fenômeno de secagem do bagaço de malte, a modelagem matemática se faz de suma importância no estudo dos parâmetros que caracterizam a cinética de secagem, tornando possível, assim, uma interpretação adequada dos fenômenos físicos envolvidos, bem como a otimização deste processo.

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM

Os modelos matemáticos na área da Engenharia comumente são utilizados com o objetivo de descrever mais precisamente o que ocorre em certo fenômeno, através de uma descrição do sistema de análise que contém o fenômeno físico de interesse (NICOLIN; COUTINHO; JORGE, 2013). Dentre os fenômenos que se utilizam da simulação matemática, destaca-se a cinética de secagem. Nesse processo, modelos são utilizados com o objetivo de representar a perda de umidade em função do tempo de secagem (BATISTA, 2016).

As modelagens matemáticas das curvas de secagem são fundamentais para o projeto, controle e otimização de equipamentos de secagem (CELMA; LÓPEZ-RODRIGUÉZ; BLÁZQUEZ, 2009; ROCHA et al., 2005).

Devido ao fato de que normalmente a complexidade dos modelos matemáticos dificulta ou inviabiliza a resolução do problema de maneira analítica, como nos casos em que há equações diferenciais ordinárias e parciais, diversos métodos numéricos podem ser utilizados para a resolução destes tipos de problemas. Como exemplos, tem-se o método das diferenças finitas, método de Euler, que é uma técnica vastamente usada para solução numérica de equações diferenciais pela sua simplicidade de aplicação e de programação computacional, ou até mesmo Runge-Kutta, que utiliza o cálculo de quatro valores intermediários antes que possa estimar o valor posterior da solução. Já os parâmetros do modelo, estes podem ser melhor ajustados pelo uso do método dos Mínimos Quadrados, do gradiente, Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt ou Nelder-Mead Simplex (KREYSZIG, 2011; NICOLIN; COUTINHO; JORGE, 2013; NICOLIN; JORGE; JORGE, 2016).

Dessa forma, diversos autores vêm estudando o aprimoramento de modelos matemáticos para vários processos que podem se beneficiar desses estudos.

3.3.1 Modelos Empíricos e Fenomenológicos

Modelos que podem ser utilizados em problemas de engenharia podem ser classificados como modelos empíricos, semi-empíricos ou semi-teóricos, e fenomenológicos (FIORENTIN et al., 2012; MADAMBA, 2003; NICOLIN; COUTINHO; JORGE, 2013).

Os modelos empíricos normalmente são resultados de experimentos e observações, nos quais são formados grupos físicos adimensionais que descrevem de forma direta as tendências dos dados experimentais obtidos do sistema em estudo (CARLESSO et al., 2007; NICOLIN; COUTINHO; JORGE, 2013). O Quadro 1 mostra alguns dos modelos empíricos mais estudados na representação da cinética de secagem.

Batista (2016) comparou os modelos de Newton, Henderson e Pabis, Page e Midilli-Kucuk na representação da cinética de secagem do bagaço de malte, e obteve melhor desempenho com o modelo de Page. Mallen e Najdanovic-Visak (2018) compararam os modelos de Page, Newton, Midilli-Kucuk e Logarítmico para o BSG, e obtiveram o melhor resultado com o modelo de Midilli-Kucuk.

Os modelos fenomenológicos consideram as etapas elementares de fenômenos físicos como transferência de massa, calor ou momento (NICOLIN; COUTINHO; JORGE, 2013). Normalmente, estes modelos partem da segunda Lei da Difusão de Fick, representada pela Equação 1, e expressam que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004; MARTINAZZO et al.,

2007). Segundo Montanuci, Jorge e Jorge (2014, p. 2): “Os modelos fenomenológicos [...] podem ser de parâmetros concentrados ou distribuídos e, geralmente, representam as principais tendências do processo, mesmo fora das condições experimentais em que foram validados”.

Quadro 1 - Modelos empíricos de secagem

Modelo	Equação
Aproximação por Difusão	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot b \cdot t)$
Dois Termos	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$
Exponencial de Dois Termos	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$
Henderson e Pabis	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
Henderson e Pabis Modificado	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$
Logarítmico	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$
Midilli-Kucuk	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$
Newton	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = \exp(-k \cdot t)$
Page	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = \exp(-k \cdot t^n)$
Page Modificado	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = \exp[-(k \cdot t)^n]$
Thompson	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = \frac{\exp\{-a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0,5}\}}{2 \cdot b}$
Verma	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$
Wang e Sing	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$

Fonte: Adaptado de Akpınar, Bicer e Yildiz (2003); Corrêa et al. (2007); Faria et al. (2012).

Quando:

X = teor de água do produto, em decimal (base seca);

X_e = teor de água de equilíbrio do produto, em decimal (base seca);

X_i = teor de água inicial do produto, em decimal (base seca);

k, k₀ e k₁ = constantes de secagem em h⁻¹;

a, b, c, n = coeficientes dos modelos;

t = tempo de secagem em h.

Modelos de parâmetros concentrados não consideram variações espaciais das propriedades físicas no sistema, enquanto que os de parâmetros distribuídos consideram essas

mudanças no espaço de suas variáveis (MONTANUCI; JORGE; JORGE, 2014; NICOLIN; COUTINHO; JORGE, 2013).

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C_A \quad (1)$$

Quando:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \text{taxa de moles de A por unidade de volume};$$

$$D_{AB} = \text{difusividade mássica de A em B};$$

$$C_A = \text{concentração de A.}$$

3.3.2 Modelos Semi-empíricos

Além dos modelos empíricos e fenomenológicos, os modelos semi-teóricos ou semi-empíricos, vêm como uma alternativa de aplicação que permitem relacionar a fácil aplicabilidade dos modelos empíricos e o embasamento teórico dos modelos fenomenológicos. De modo geral, estes modelos adequam a Lei de Resfriamento de Newton, representada pela Equação 2, para a transferência de massa, e ainda consideram condições isotérmicas e que a transferência de umidade ocorre somente na superfície do produto de secagem (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999; BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; DE SOUZA, 2007; MARTINAZZO et al., 2007).

$$\frac{dT}{dt} = -k * (T - T_a) \quad (2)$$

Quando:

$$\frac{dT}{dt} = \text{taxa de variação da temperatura com o tempo};$$

$$k = \text{constante de resfriamento};$$

$$T = \text{temperatura do objeto};$$

$$T_a = \text{temperatura do ambiente.}$$

Dentre alguns modelos semi-empíricos amplamente utilizados, destaca-se o modelo de Lewis. Além deste, o modelo de Dois Termos, o de Henderson e Pabis, e o de Page também podem ser considerados semi-teóricos (MARTINAZZO et al., 2007; PANCHARIYA; POPOVIC; SHARMA, 2002).

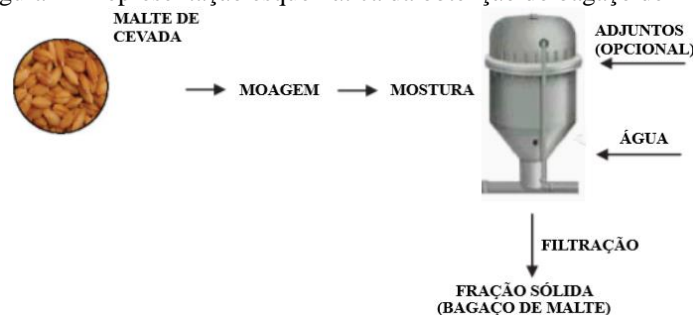
Uma consideração válida e já feita por alguns autores que estudam processos de transferência de massa é a determinação do coeficiente de transferência de massa variando exponencialmente com a concentração de água do produto. Coutinho et al. (2005) utilizaram essa consideração para um modelo fenomenológico aplicado à hidratação de grãos de soja, e obtiveram resultados satisfatórios. Coutinho et al. (2007) propuseram um modelo fenomenológico de parâmetros concentrados para a hidratação da soja com a mesma condição de variação exponencial do coeficiente de transferência de massa em função da concentração de água da soja, e o modelo obtido pôde representar adequadamente os dados experimentais.

Desta maneira, este trabalho consiste na utilização de um modelo semi-empírico que apresenta o coeficiente de transferência de massa variando exponencialmente com a umidade do material.

3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BAGAÇO DE MALTE

O bagaço de malte consiste basicamente numa massa de aglomerados de casca de malte com resíduos do processo de mosturação, bem como em fragmentos do endosperma do malte (CABRAL FILHO, 1999; CLARK; MURPHY; CROOKER, 1987). A sua composição varia de acordo com os diferentes tipos e tempo de colheita da cevada, bem como com o processo de malteação, moagem e demais características relacionadas ao processo da fabricação da cerveja até sua obtenção (MUSSATTO, 2014; SANTOS et al., 2003; XIROS; CHRISTAKOPOULOS, 2012). Algumas das etapas que podem interferir na composição do bagaço de malte podem ser melhor observadas na Figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática da obtenção do bagaço de malte



Fonte: Adaptado de Mussatto (2009).

Devido aos diversos fatores que implicam na variação da composição desse resíduo, a caracterização físico-química torna-se importante na análise das diversas substâncias que o resíduo contém. De acordo com Onofre et al. (2017), em peso seco, o bagaço de malte é predominantemente fibroso (cerca de 70%) e proteico (de 15 a 25%), além de conter carboidratos, lipídios, minerais, vitaminas, aminoácidos e compostos fenólicos em menores quantidades. Com base nisso, é possível indicar as melhores destinações para cada tipo de cerveja produzida, bem como alavancar pesquisas e a busca por novas aplicações para este resíduo, o qual já tem se mostrado promissor para a aplicação em diversas áreas, principalmente alimentícia. O bagaço de malte apresenta componentes que são benéficos à saúde, como por exemplo, as fibras, compostos fenólicos e proteínas, tornando-se muito atraente para este segmento industrial (LYNCH; STEFFEN; ARENDT, 2016).

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 OBTENÇÃO DO BAGAÇO DE MALTE

Para a elaboração da cerveja artesanal, foi utilizada uma receita como base, mais especificamente, a receita de uma cerveja do tipo Czech Pilsner, do Livro “Cerveja Feita em Casa” (HUGHES, 2014).

Na fabricação desta cerveja foram utilizados 9,4 kg de puro malte *Pilsen* e 68 L de água proveniente da Sanepar, a qual foi filtrada antes de ser inserida na panela de mostura (Figura 5). A receita foi adaptada para 46 L de bebida produzida.

O bagaço de malte foi obtido após as etapas iniciais do processo cervejeiro, mais especificamente, após a etapa de filtração do mosto.

4.1.1 Etapas Para Obtenção do Resíduo

Inicialmente, aqueceram-se 25 litros de água até aproximadamente 66°C na panela de mostura, conforme a Figura 5. Em seguida, o malte previamente moído foi adicionado na panela para dar início ao processo de mostura (Figura 6).

Figura 5 - Aquecimento da água na panela de mostura



Fonte: A autoria própria (2018).

Figura 6 - Adição do malte na tina de mostura



Fonte: Autoria própria (2018).

O processo enzimático do amido ocorreu na temperatura de 65°C, por cerca de uma hora. Confirmado este processo mediante o teste de iodo, elevou-se a temperatura até 76°C para inativação das enzimas, etapa chamada de *Mash Out*. Em seguida, foi feita a recirculação do mosto a fim de clareá-lo, por cerca de 20 minutos, conforme a Figura 7. Por fim, foi realizada a lavagem do mosto com 43 litros de água na mesma temperatura do *Mash Out*, conforme mostra a Figura 8.

Figura 7 - Recirculação do mosto cervejeiro



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 8 - Lavagem do mosto



Fonte: Autoria própria (2018).

Terminada a etapa de clarificação e filtração do mosto, o bagaço de malte úmido foi retirado da panela de mostura (Figura 9), enquanto o mosto seguiu para as etapas seguintes da elaboração da cerveja. Grande parte do bagaço de malte foi separado para a realização das curvas cinéticas de secagem, conforme mostrado na Figura 10. Antes da realização dos experimentos, os grãos foram estocados em diversos potes fechados e mantidos sob refrigeração, para evitar sua degradação microbiana (MAHMOOD et al., 2012).

Figura 9 - Bagaço de malte úmido



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 10 - Separação do bagaço de malte

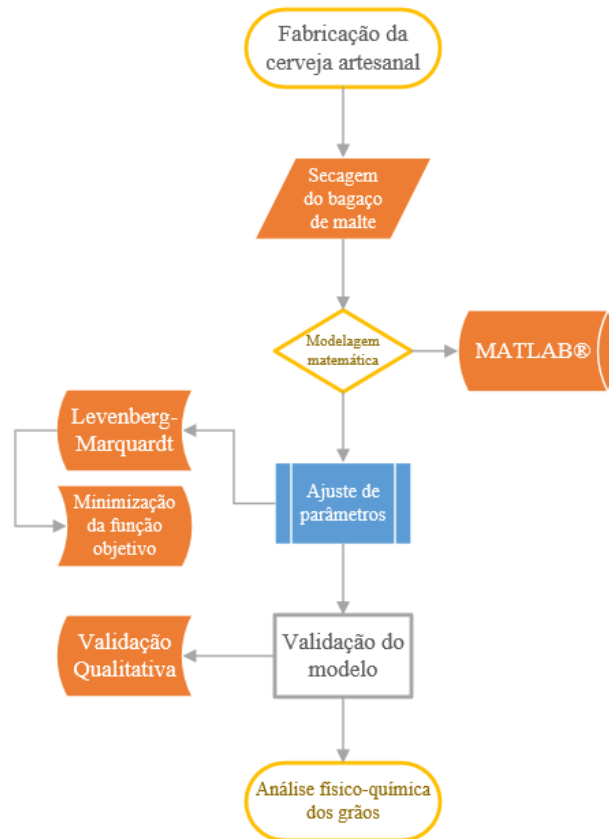


Fonte: Autoria própria (2018).

4.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O percurso experimental realizado neste trabalho pode ser melhor observado pela Figura 11.

Figura 11 - Etapas experimentais



Fonte: Autoria própria (2019).

4.2.1 Secagem do Bagaço de Malte

O procedimento experimental do estudo da cinética de secagem do bagaço de malte e suas condições está descrito na Tabela 1.

Primeiramente, as amostras foram adicionadas em placas de Petri, conforme a Figura 12, e pesadas até 12 g em uma balança semi-analítica (SHIMADZU, modelo BL3200H).

Tabela 1 - Parâmetros da secagem do resíduo

Amostras	Temperatura (°C)	Massa (g)
01	50	12
02	50	12
03	50	12
04	60	12
05	60	12
06	60	12
07	70	12
08	70	12
09	70	12

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 12 - Amostras prontas para secagem



Fonte: Autoria própria (2019).

Em seguida, os grãos foram secos em estufa sem circulação de ar (DeLeo) nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, em triplicata. As temperaturas de 50 e 60°C foram escolhidas tanto para o estudo da cinética de secagem, quanto para a caracterização físico-química dos grãos, pois temperaturas maiores que 60°C poderiam ocasionar o risco de torrar e queimar os grãos, além de poderem gerar sabores desagradáveis (HERNÁNDEZ et al., 1999; MUSSATTO; DRAGONE; ROBERTO, 2006; PRENTICE; D'APPOLONIA, 1977). A temperatura de 70°C foi determinada apenas para o estudo da secagem, modelagem matemática e avaliação da influência da temperatura no comportamento dos parâmetros do modelo. O tempo observado para que o processo chegasse ao equilíbrio, e a massa permanecesse constante, foi de 6 horas. As amostras foram retiradas da estufa e pesadas em uma balança semi-analítica de 3 em 3 minutos, e suas massas foram registradas.

Ao término do processo, o material foi colocado novamente na estufa (DeLeo) por 24 horas a 105°C, para a determinação da massa seca. Com isso, as umidades experimentais puderam ser calculadas, tanto em base seca (Equação 3), como em base úmida (Equação 4).

$$X_{bs} = \frac{m_i - m_f}{m_f} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$X_{bu} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100\% \quad (4)$$

Quando X_{bs} é a umidade em base seca ($\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{SS}}$), a sigla “SS” significa Sólido Seco, m_i é a massa inicial das amostras (g), m_f é a massa final das amostras desidratadas (g) e X_{bu} é a umidade em base úmida ($\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{total}}$).

4.2.2 Modelagem Matemática

Com posse dos dados experimentais, foi ajustado um modelo de cinética de secagem, o qual foi definido a partir da Equação de Lewis (LEWIS, 1921), representado pela Equação 5, em que foi considerado que o coeficiente de transferência de massa variasse exponencialmente com a umidade, de acordo com a Equação 7. Pelo fato deste modelo apresentar apenas uma derivada de primeira ordem, apenas a condição inicial se faz necessária para que o problema possa ser resolvido (Equação 6). O modelo resultante é apresentado pela Equação 8.

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_{eq}) \quad (5)$$

$$X(0) = X_0 \quad (6)$$

$$k = ae^{-bX} \quad (7)$$

$$\frac{dX}{dt} = ae^{-bX}(X_{eq} - X) \quad (8)$$

Sendo X a umidade em base seca ($\text{g}_{\text{água}}/\text{g}_{\text{SS}}$), k o coeficiente de transferência de massa ($1/\text{h}$), t a coordenada temporal (h), a ($1/\text{h}$) e b ($\text{g}_{\text{SS}}/\text{g}_{\text{água}}$) são os parâmetros do coeficiente de

transferência de massa, X_0 é a umidade inicial em base seca (g_{água}/g_{SS}) e X_{eq} é a umidade de equilíbrio em base seca (g_{água}/g_{SS}).

Com o modelo final, foi realizado ainda um processo de adimensionalização dos valores de umidade, apresentado pelas equações abaixo.

$$X_{ad} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (9)$$

$$X = X_{ad}(X_0 - X_{eq}) + X_{eq} \quad (10)$$

A Equação 9 foi inserida na Equação 8, resultando no seguinte modelo:

$$\frac{dX_{ad}}{dt} = -a_1 e^{-b_1 X_{ad}} X_{ad} \quad (11)$$

Em que o novo coeficiente de transferência de massa é denotado por:

$$k_{ad} = a_1 e^{-b_1 X_{ad}} \quad (12)$$

Portanto, o modelo final é representado pela Equação 13:

$$\frac{dX_{ad}}{dt} = -k_{ad} X_{ad} \quad (13)$$

Quando:

X_{ad} é a umidade adimensional;

$b_1 = b(X_0 - X_{eq})$;

$a_1 = a e^{-b_1 b_2}$, expressa em (1/h);

$b_2 = \frac{X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$;

k_{ad} é o novo coeficiente de transferência de massa do modelo adimensionalizado, expresso em (1/h).

As simulações deste processo foram realizadas no software MATLAB[®], onde a solução numérica foi obtida pelo comando “ode15s”. Os cálculos foram realizados para as três temperaturas de 50, 60 e 70°C, para um tempo total de 6 horas.

O modelo exponencial tradicional de Newton usado a título de comparação está descrito no Quadro 1.

4.2.3 Ajuste de Parâmetros

Os parâmetros do modelo foram ajustados pelo método de Levenberg-Marquardt, por meio de regressão não linear, para a minimização da função objetivo quadrática (LEVENBERG, 1944; MARQUARDT, 1963). A função objetivo é definida pela Equação 14.

$$\phi = \sum_{i=1}^{N_{exp}} (X_{calc}^i - X_{exp}^i)^2 \quad (14)$$

Sendo ϕ a função objetivo adimensional, X_{calc} os valores de umidade adimensionais calculados pelo modelo, X_{exp} os valores de umidade adimensionais obtidos experimentalmente. O comando que executa este método no software MATLAB[®] é o “nlinfit”.

Este método foi combinado com o comando “nlparci” que fornece um intervalo de confiança a 95% de confiança dos parâmetros ajustados.

Por fim, para a comparação do modelo com os dados experimentais, foi realizado um teste qualitativo por meio de histogramas e qqplots (quantil vs quantil) dos resíduos, bem como o erro quadrático médio (MSE).

4.2.4 Análise Físico-Química dos Grãos

Para a realização das análises, o bagaço de malte foi previamente secado a 50°C em estufa (LUCADEMA, modelo LUCA 80/150), até que se detectou que o mesmo estava suficiente seco.

Após a secagem do bagaço de malte, as amostras puderam ser destinadas aos diversos parâmetros da análise físico-química.

Mais especificamente, as análises de proteína (método nº4), fibra bruta (método nº11), lipídios (método nº10) e carboidratos (método nº21) seguiram a metodologia do MAPA (1991), e foram realizadas em duplicata pelo LGQ Laboratório (Apêndice B), localizado em Francisco Beltrão (PR).

As demais análises (pH, cinzas, acidez e umidade) foram realizadas em triplicata no *campus* da UTFPR de Francisco Beltrão (PR), e seguiram o padrão oficial do Instituto Adolfo Lutz (1985).

As análises de pH (método 017/IV) e acidez (método 016/IV) foram realizadas em sequência, pois foi possível utilizar a mesma amostragem para ambas as análises.

Primeiramente foi realizada a análise de pH seguindo o padrão estipulado, com 10 g de amostra por amostragem, pesadas em uma balança analítica (TECXEL, modelo FA2104N), utilizando-se um pHmêtro (modelo mPA-210).

Posteriormente, as mesmas amostras foram utilizadas para a análise de acidez. Uma única adaptação ao método foi necessária para esta análise, que foi o uso do dobro da quantidade de massa (10 g de bagaço de malte por amostragem) em relação ao estimado pelo método padrão (5 g de amostra). Porém, todas as devidas proporções foram mantidas de acordo com o procedimento estipulado, evitando assim, o risco de obtenção de resultados duvidosos.

Para a análise de umidade (método 012/IV), uma quantidade de bagaço de malte úmido foi secada outra vez a 50°C, mas desta vez por 6 horas e utilizando a mesma estufa sem circulação de ar (DeLeo) usada para o estudo da cinética de secagem. Após isso, foram separados 21 g da amostra previamente seca, e distribuída igualmente em três cápsulas de porcelana para a realização da análise de umidade e cinzas (método 018/IV), pesadas em uma balança analítica (RADWAG, modelo AS 220/C/2).

Como foi possível utilizar as mesmas amostras para ambas as análises, as mesmas foram realizadas em sequência, primeiro a de umidade, depois a de cinzas, cada qual seguindo seu respectivo procedimento experimental estabelecido pelo Instituto Adolfo Lutz (1985).

Portanto, para ambas as análises se utilizou o mesmo dessecador, e as mesmas amostras (7 g por amostragem). Para a análise de cinzas, utilizou-se uma mufla (ZEZIMAQ, modelo 2000).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADOS DA SECAGEM DO BAGAÇO DE MALTE

5.1.1 Ajuste dos Parâmetros do Modelo

Para o ajuste de parâmetros do modelo utilizado, fez-se necessário o uso de algumas características obtidas por meio do processo de secagem do bagaço de malte, como por exemplo, a utilização dos valores de umidade inicial e de equilíbrio, após realizada a adimensionalização desses valores médios resultantes das triplicatas realizadas. Estas condições estão presentes na Tabela 2. A segunda coluna mostra os valores de umidade inicial em base seca utilizados, e a terceira coluna, as umidades de equilíbrio. A quarta e a quinta colunas mostram esses valores iniciais e finais adimensionalizados, respectivamente.

Tabela 2 - Características do processo de secagem do bagaço de malte

Temperatura (°C)	X_i (g _{água} /g _{ss})	X_e (g _{água} /g _{ss})	X_{Iadm}	X_{Eadm}
50	2,4029	0,1039	1	0
60	2,7307	0,05390	1	0
70	2,7657	0,03661	1	0

Fonte: Aatoria própria (2019).

Quando:

g_{água} = Grama de água;

g_{ss} = Grama de Sólido Seco;

X_i = Umidade inicial do produto em base seca;

X_e = Umidade de equilíbrio do produto em base seca;

X_{Iadm} = Umidade inicial adimensionalizada;

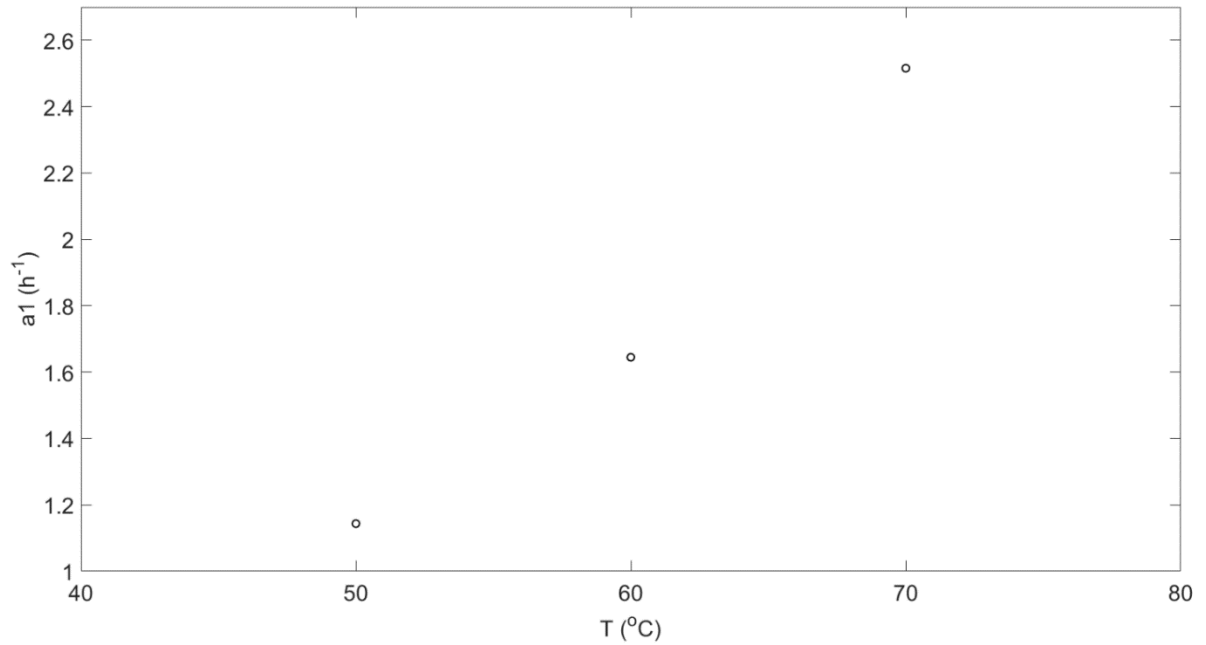
X_{Eadm} = Umidade de equilíbrio adimensionalizada.

As Figuras 13 e 14 apresentam os parâmetros a_1 e b_1 ajustados do modelo semi-empírico de Lewis adimensionalizado, respectivamente, conforme indicado pela Equação 11.

Pela análise da Figura 13, percebe-se que este parâmetro aumenta com a temperatura, com um certo caráter exponencial. Esse comportamento é esperado, uma vez que ele exerce uma influência direta na representação da variação da umidade, e portanto, quanto maior a temperatura, mais rapidamente a água se difunde do interior do grão em direção ao ambiente externo, devido à evaporação mais rápida da água contida na superfície externa dos grãos. Logo, este parâmetro possui a função de captar essa maior queda na taxa de umidade do grão conforme

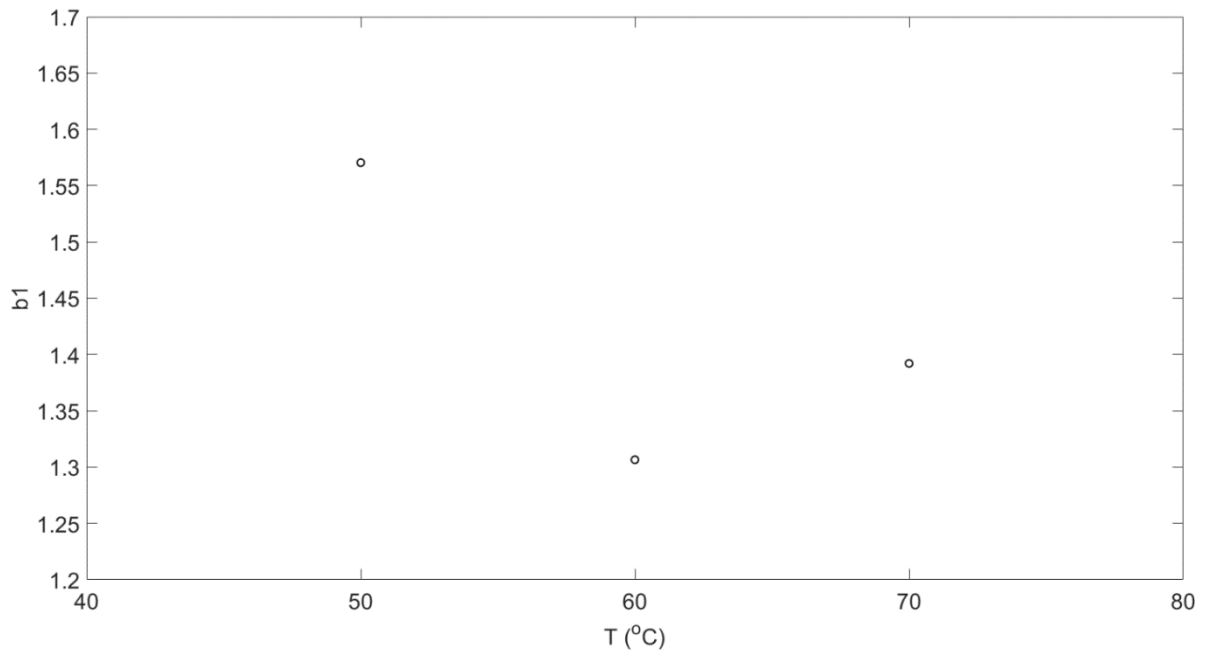
aumento de temperatura. No modelo adimensional, ele desempenha um papel semelhante ao coeficiente de transferência de massa do modelo original.

Figura 13 - Parâmetro a_1 ajustado para as três temperaturas analisadas



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 14 - Parâmetro b_1 ajustado para as três temperaturas analisadas



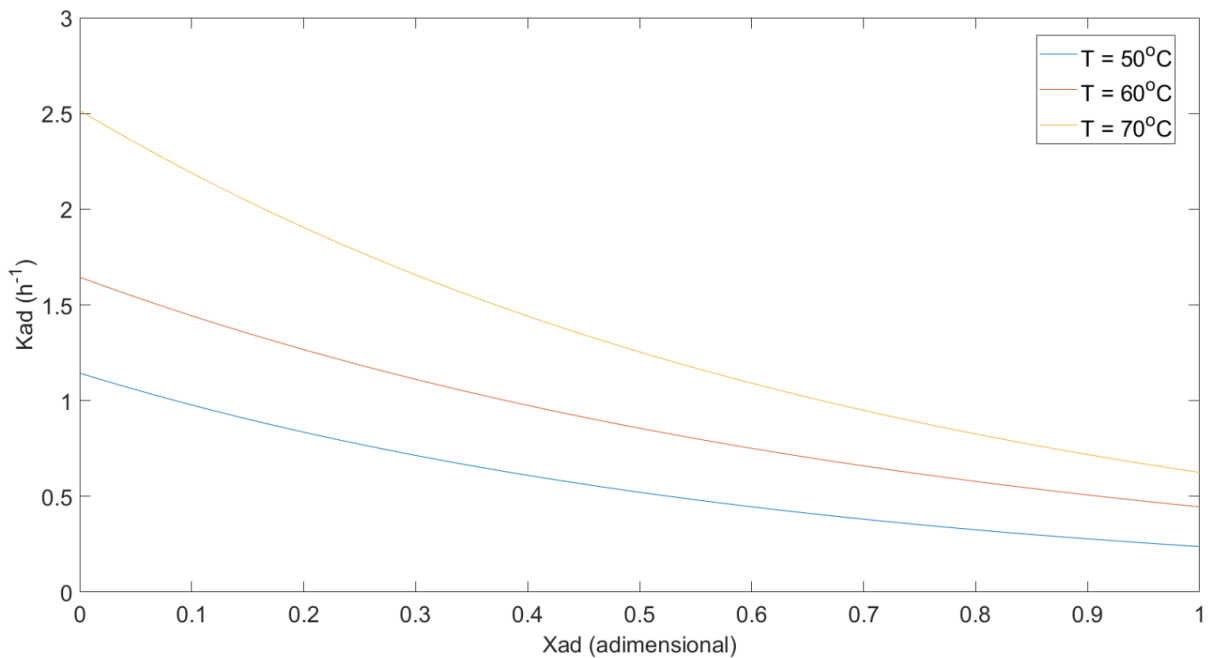
Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 14 mostra o comportamento do parâmetro b_1 com a temperatura. Esse parâmetro é adimensional, e apresenta um significado estritamente matemático, podendo ser

definido como um coeficiente exponencial. É possível perceber que este parâmetro não possui um comportamento definido com a temperatura, justamente por apenas se tratar de um parâmetro auxiliar exponencial.

O comportamento do coeficiente de transferência de massa do modelo adimensional (k_{ad}) é mostrado na Figura 15. Nela é possível observar que, para temperaturas maiores, seu valor é maior. Isso é esperado, uma vez que há uma maior taxa de transferência de massa a temperaturas mais elevadas, e portanto, este coeficiente capta este comportamento. Percebe-se também que seus valores diminuem com o aumento da umidade. Neste caso, por se tratar de um modelo semi-empírico, o comportamento físico do parâmetro fica comprometido, e portanto, a análise fica restrita a uma abordagem matemática.

Figura 15 - Comportamento do parâmetro k_{ad} em função da umidade X_{ad}



Fonte: Autoria própria (2019).

Outro fator interessante que influencia muito no comportamento deste coeficiente é o parâmetro a_1 , onde é possível observar que seus valores são iguais aos do coeficiente k quando o processo chega no equilíbrio, de acordo com os valores de a_1 da Tabela 3. Isso ocorre devido ao valor do termo exponencial do modelo, que tende a 1 à medida que o processo se encaminha ao seu equilíbrio, quando os valores da umidade adimensional tendem a 0.

A Tabela 3 informa todos os valores dos parâmetros a_1 e b_1 encontrados para o modelo de Lewis com k exponencial adimensionalizado.

Tabela 3 - Valores de a_1 e b_1 do modelo

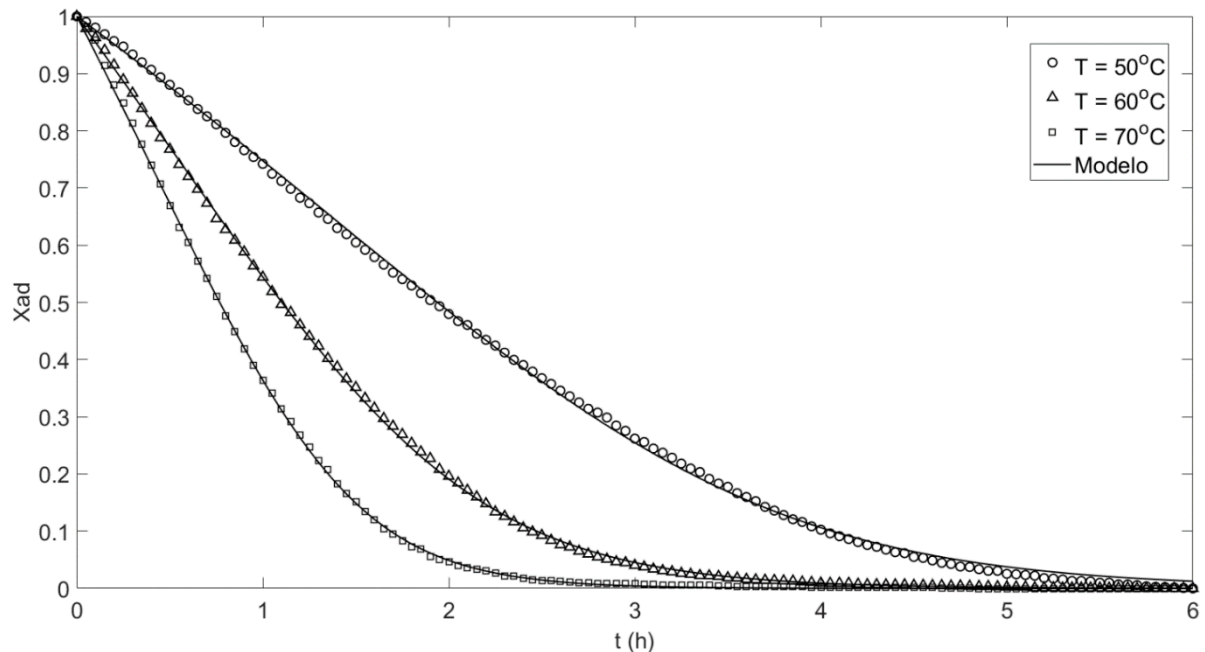
Temperatura (°C)	a_1	b_1
50	1,1437	1,5704
60	1,6449	1,3065
70	2,5158	1,3921

Fonte: A autoria própria (2019).

5.1.2 Aplicação do Modelo Matemático

A Figura 16 apresenta os valores de umidade adimensionais ajustados pelo modelo de Lewis considerando k exponencial com a umidade utilizado aos dados experimentais. É possível observar que o modelo descreve a cinética de secagem satisfatoriamente para as três temperaturas testadas. Alguns desvios notórios ocorrem para a temperatura de 50°C, principalmente quando o processo começa a se encaminhar para a umidade de equilíbrio. Para esta temperatura os dados de umidade ainda não haviam atingido um valor constante como nas temperaturas maiores. A falta de uma curva de secagem completa para esta condição de secagem, pode ter levado aos desvios observados. De maneira geral, o desempenho do modelo se mostrou excelente para a representação deste fenômeno.

Figura 16 - Comparação entre o modelo de Lewis modificado e dados experimentais

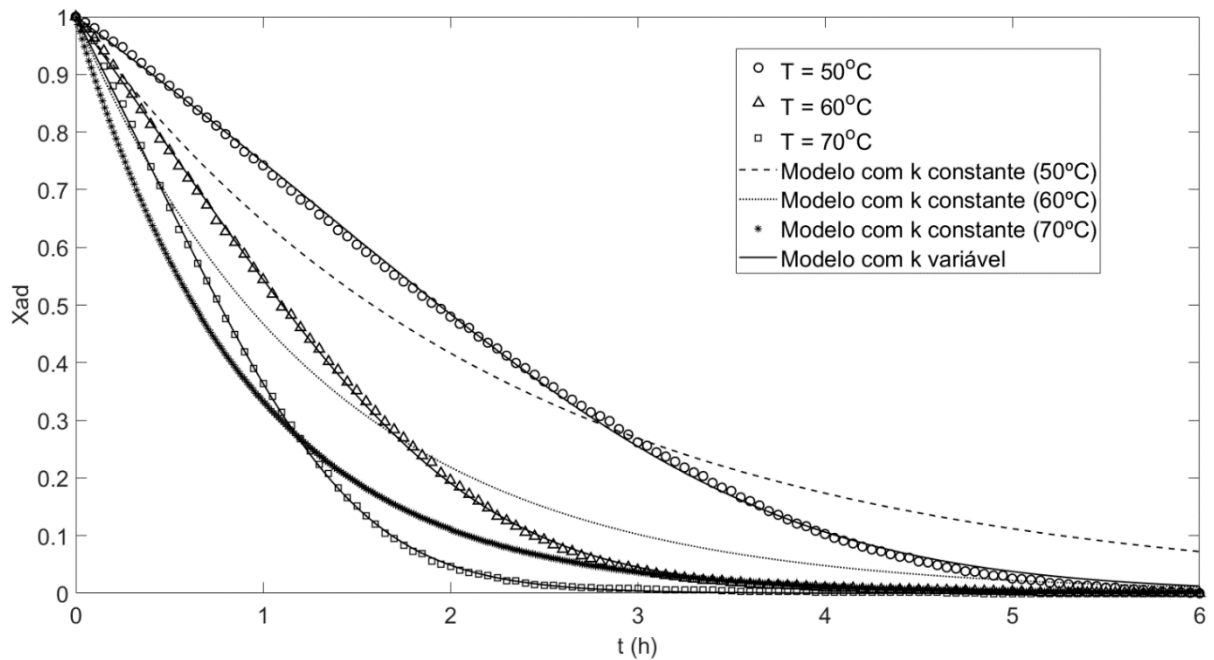


Fonte: A autoria própria (2019).

Para termos comparativos, a Figura 17 traz, simultaneamente, o ajuste dos dois modelos aos dados experimentais. Esta figura é importante para a justificativa de se utilizar um coeficiente de transferência de massa que varie ao longo do processo. Pela figura, observa-se a

piora da qualidade do ajuste quando se considera um coeficiente constante, para todas as temperaturas. Deste modo, fica claro que a adição de parâmetros no modelo se justifica pelo enriquecimento matemático fornecido por este acréscimo. Como visto pela Figura 16, e também pelas curvas obtidas pelos autores Mallen e Najdanovic-Visak (2018), a secagem do bagaço de malte pode apresentar um comportamento diferenciado, que foge do comportamento tradicional exponencial fornecido pela maioria dos modelos empíricos. Portanto, propor mudanças nestes modelos para obter uma melhora no ajuste se tornam opções muito viáveis.

Figura 17 - Comparação do modelo de Lewis e de Newton com os dados experimentais



Fonte: Autoria própria (2019).

5.1.3 Validação do Modelo Matemático

A adequação do modelo de Lewis proposto aos dados experimentais foi analisada de forma qualitativa, por meio de histogramas, qqplots dos resíduos (quantil vs quantil) e o erro quadrático médio (Mean Squared Error - MSE) para todas as temperaturas. Já o modelo de Newton usado para fins comparativos, foi analisado apenas com os valores dos erros quadráticos médios. A Tabela 4 apresenta os valores de MSE encontrados para as três temperaturas do modelo de Lewis e do modelo de Newton.

Tabela 4 - Valores de MSE dos modelos em estudo

Temperatura (°C)	MSE do modelo de Lewis	MSE do modelo de Newton
50	$7,5031 \times 10^{-05}$	0,0048
60	$1,6924 \times 10^{-05}$	0,0023
70	$1,5287 \times 10^{-05}$	0,0018

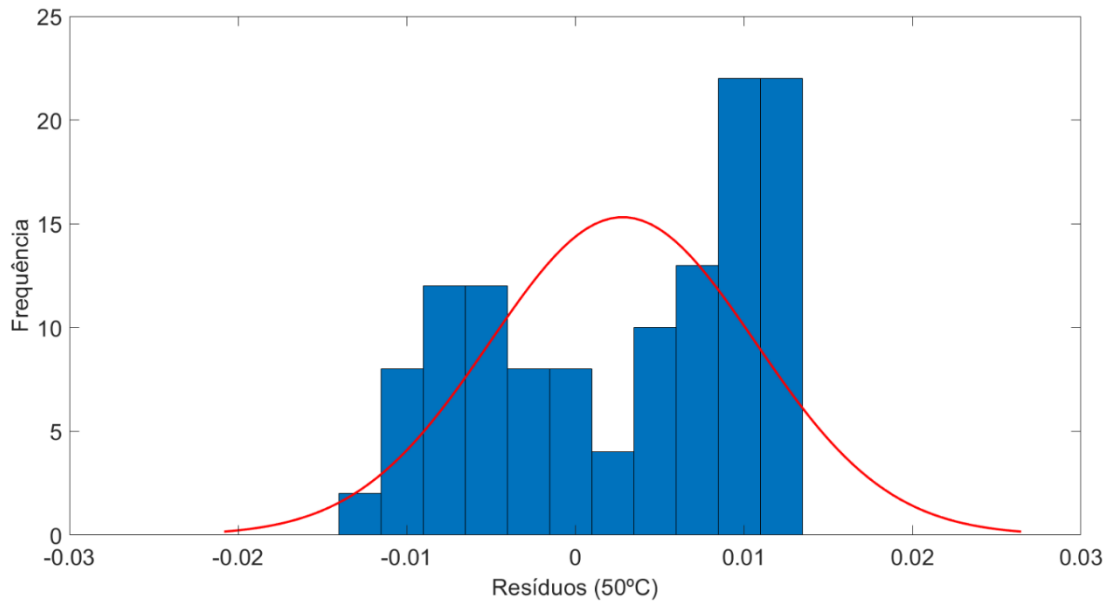
Fonte: Autoria própria (2019).

Por esta tabela, observa-se que os valores de MSE mais elevados do modelo de Newton em relação ao modelo de Lewis modificado colaboram com a análise da Figura 17, onde se observa que a consideração do coeficiente de transferência de massa (k) variando com a umidade altera completamente a precisão do ajuste do modelo aos dados experimentais do bagaço de malte, se tornando, neste caso, fundamental para um ajuste de qualidade.

A Figura 18 apresenta o histograma dos resíduos para a temperatura de 50°C. Por esta figura, percebe-se que a maior parte dos resíduos se distribuem de forma normal em torno da média igual a zero, ou muito próximo dele. Este resultado indica que há uma boa adequação do modelo utilizado aos dados experimentais, já que os resíduos entre eles, ou são nulos, ou são muito próximos de zero. Esta tendência é mantida para as temperaturas de 60 e 70°C, como é mostrado nas Figuras 19 e 20, respectivamente, sendo que na temperatura de 70°C é onde se obtém a maior frequência de resíduos circundando a média zero. Além disso, os baixos valores de MSE encontrados reforçam a boa qualidade do ajuste do modelo matemático aos dados experimentais para todas as temperaturas abordadas.

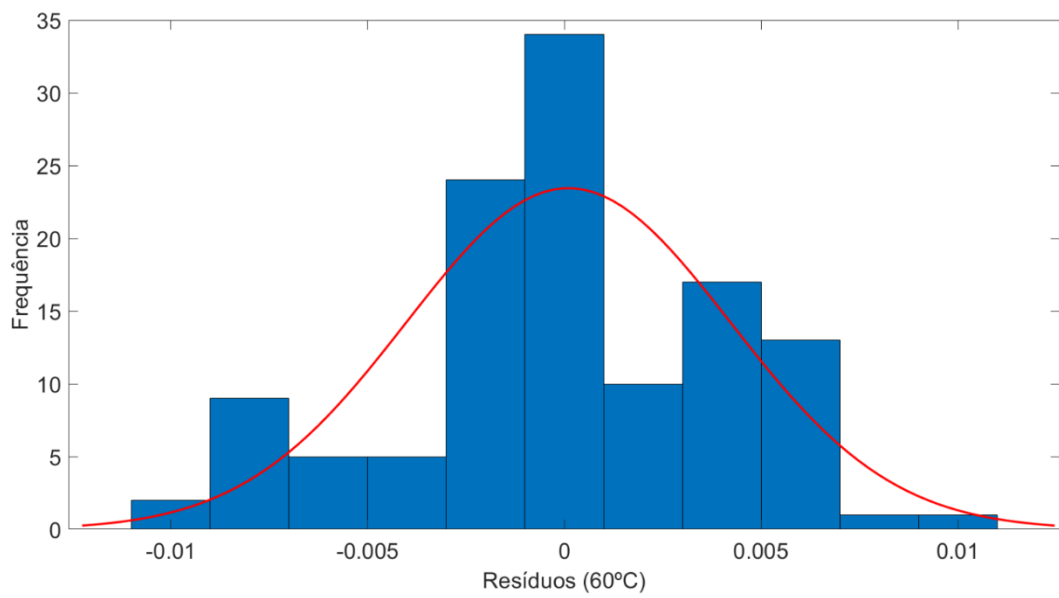
As Figuras 21, 22 e 23 reforçam esta análise, já que mostram que os quantis calculados para a distribuição normal em torno de zero são muito próximos aos quantis obtidos para os resíduos entre valores do modelo e os obtidos experimentalmente, ainda que haja certos afastamentos para alguns quantis. O ideal é que haja uma sobreposição dos quantis em relação à reta de referência. Porém, como existem erros associados aos experimentos, acabam ocorrendo alguns desvios. De qualquer maneira, os quantis dos resíduos se encontram muito próximos da reta ideal, validando o modelo matemático. E ainda, este parâmetro vem a concordar com a análise dos histogramas, pois é possível observar que na temperatura de 70°C é onde se tem a maior parte dos resíduos tocando a reta dos quantis normais, seguido pela temperatura de 60°C e, por fim, a de 50°C, onde o modelo obteve um desempenho inferior comparado às outras duas temperaturas (MONTGOMERY; RUNGER, 2014).

Figura 18 - Histograma dos resíduos para 50°C



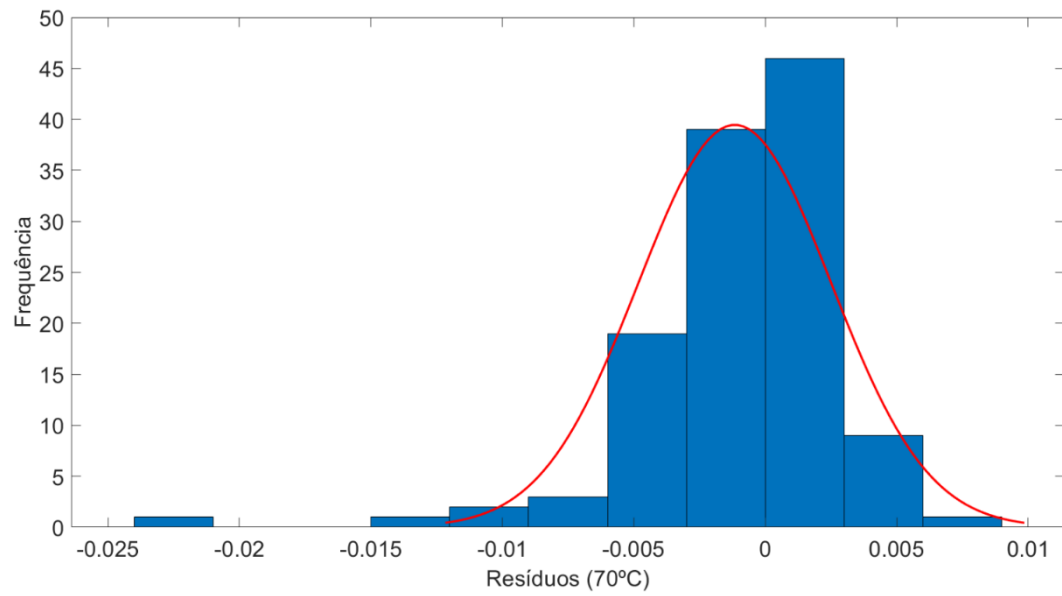
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 19 - Histograma dos resíduos para 60°C



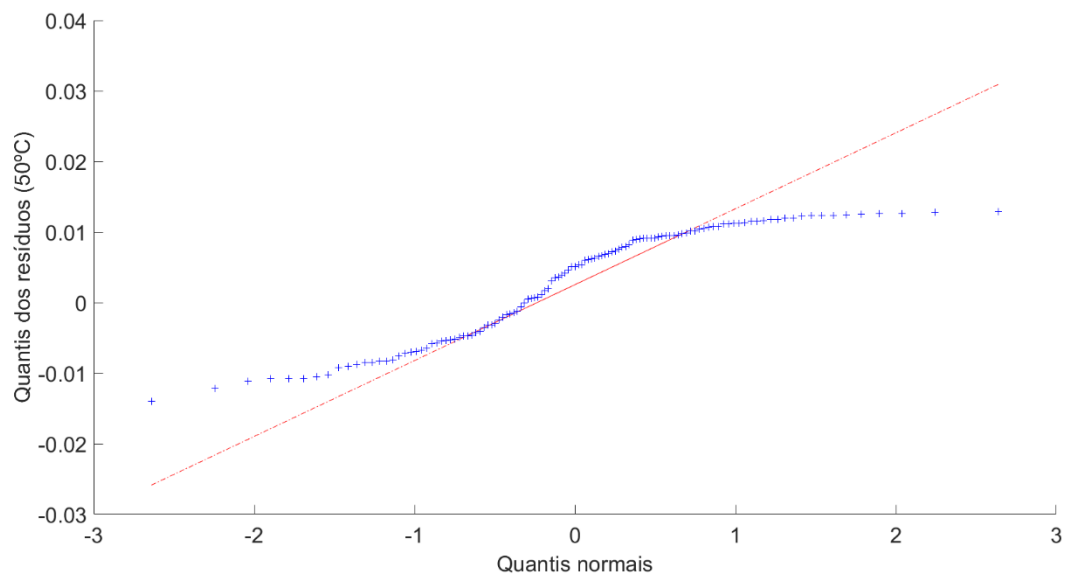
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 20 - Histograma dos resíduos para 70°C



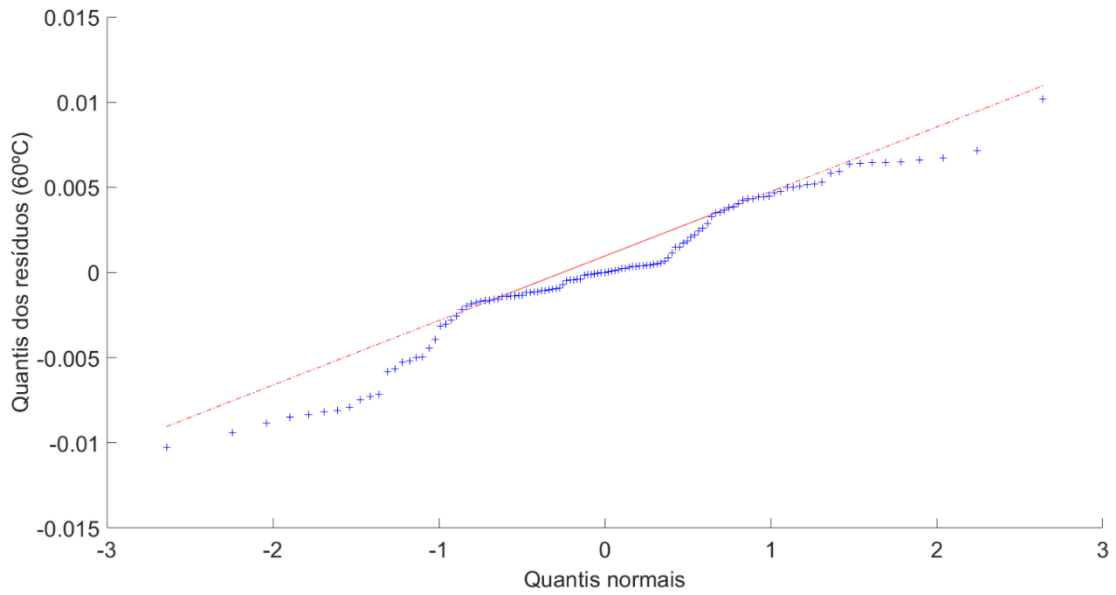
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 21 - Qqplot dos resíduos para 50°C



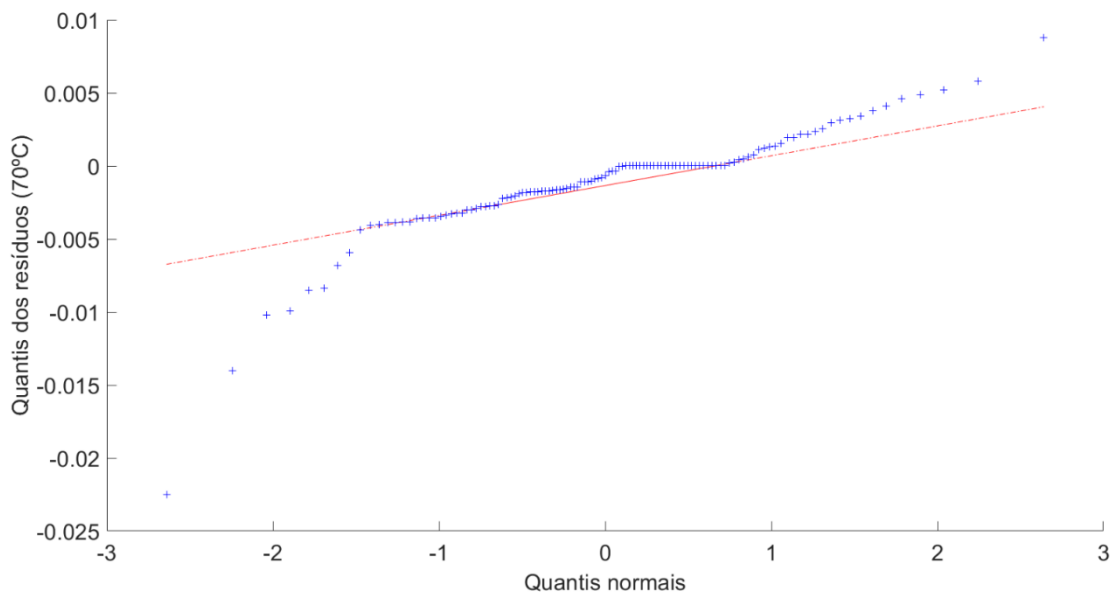
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 22 - Qqplot dos resíduos para 60°C



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 23 - Qqplot dos resíduos para 70°C

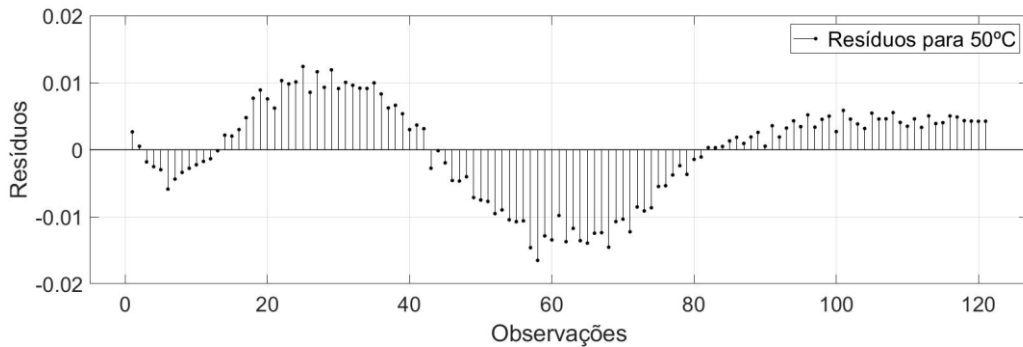


Fonte: Autoria própria (2019).

De forma a observar melhor a distribuição dos resíduos em torno de zero, foram plotados gráficos de dispersão dos resíduos, para as três temperaturas analisadas.

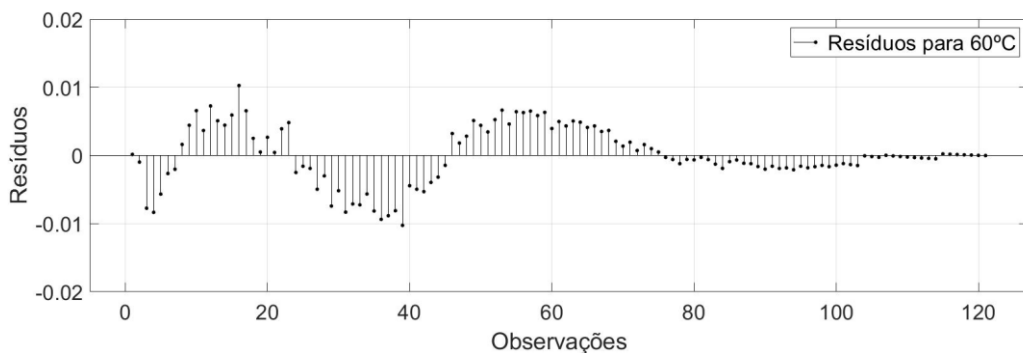
Pela análise das Figuras 24, 25 e 26, percebe-se que os resíduos são independentes e aleatoriamente distribuídos em torno de zero. Ou seja, o modelo ora subestima e ora superestima os valores ajustados com relação aos dados experimentais.

Figura 24 - Distribuição dos resíduos em torno de zero para 50°C



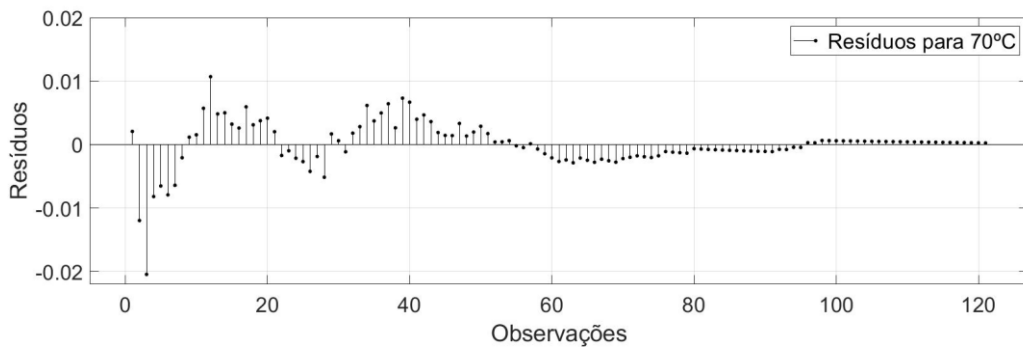
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 25 - Distribuição dos resíduos em torno de zero para 60°C



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 26 - Distribuição dos resíduos em torno de zero para 70°C



Fonte: Autoria própria (2019).

Outras formas de validar o modelo matemático poderiam ser realizadas, como por exemplo, usando o coeficiente de determinação (R^2) como parâmetro de análise e testes de normalidade. Porém, o coeficiente de determinação é um parâmetro inadequado quando utilizado para validar modelos não lineares, inclusive pode levar à escolha de modelos inferiores para certos dados experimentais, como demonstrado no trabalho de Spiess e Neumeyer (2010), e deve ser evitado quando modelos não lineares são investigados. Os autores demonstraram que, mesmo para modelos com ajuste inferior, o valor de R^2 pode ser elevado, e que mudanças podem ocorrer apenas na terceira ou quarta casa decimal, podendo levar à escolha de modelos inapropriados, ou não tão qualificados.

Com relação a testes de normalidade, um dos mais comumente utilizados é o teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965). Este teste tem a capacidade de avaliar se os resíduos entre valores calculados pelo modelo e os dados experimentais se distribuem de forma normal ou não, em torno da média zero. Este teste é considerado bem rigoroso e, por isso, costuma ser muito utilizado. Porém, pode facilmente rejeitar a hipótese de normalidade, principalmente em amostras grandes, em que pode se tornar difícil determinar pontos percentuais de sua distribuição. Por isso, este teste pode ser utilizado como um complemento a plotagem da distribuição normal (como histogramas e qqplots dos resíduos, por exemplo), e não como um substituto a estes. Portanto, os valores de p do teste não podem ser considerados como uma verdade absoluta e inquestionável (PAES, 2008; SHAPIRO; WILK, 1965).

O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado aos resíduos analisados neste trabalho. Porém, devido ao número de pontos experimentais usados para a validação do modelo cinético proposto (121 pontos experimentais) ser relativamente grande, o teste de Shapiro-Wilk falhou para os dados de todas as temperaturas de secagem avaliadas experimentalmente. Por esta razão, optou-se por não apresentar os valores-p do teste.

Neste caso, pela análise dos histogramas e qqplots dos resíduos, já se percebe um ótimo ajuste do modelo aos dados experimentais, mesmo que o teste de Shapiro-Wilk tenha sido falho para estes dados.

5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO BSG

A Tabela 5 apresenta os valores encontrados para todos os parâmetros da análise físico-química realizada no bagaço de malte, com seus respectivos desvios padrões, em base seca.

De acordo com esta tabela, é possível verificar que a umidade foi de 13,69%. A umidade máxima segura para estocagem e armazenamento do bagaço de malte varia de acordo com a finalidade, e o tempo de estocagem varia em termos da atividade de água do material. Porém, a Anvisa (2005) estabelece uma umidade máxima fixa para farinhas, neste caso considerando-se farinha de malte, de 15%. Portanto, de acordo com a legislação, o bagaço de malte seco está de acordo com os padrões estabelecidos, e poderia ser comercializado.

Tabela 5 - Resultado da análise físico-química do bagaço de malte

Parâmetros	Resultados	
Umidade (g/100g)	13,69 ± 0,25	
Cinzas (g/100g)	1,70 ± 0,35	
pH	5,70 ± 4,58x10 ⁻⁰²	
Acidez (g/100g)	2,43 ± 0,38	
Proteína (g/100g)	7,76 ± 0,49	
Carboidratos (g/100g)	18,69 ± 0,51	60,48*
Fibra Bruta (g/100g)	14,70 ± 0,16	
Lipídios (g/100g)	1,67 ± 7,07x10 ⁻⁰³	

Fonte: Autoria própria (2019).

* Valor calculado por diferença centesimal

Já de acordo com dados encontrados na literatura, para que não se corra o risco de propiciar a proliferação de microrganismos no BSG, a umidade do produto deve estar abaixo de 10%. Portanto, mesmo que a umidade do bagaço de malte não esteja infringindo a legislação vigente, para garantia de um armazenamento seguro a longos períodos de tempo para posterior comercialização deste material, indica-se um maior tempo de secagem, ou um aumento da temperatura de secagem, desde que esta não seja maior que 60°C. Acima desta temperatura, como já mencionado, pode ocorrer a modificação na estrutura dos grãos e, assim, comprometer a qualidade do produto (ALIYU; BALA, 2011; DRAGONE, 2007; JANGAM, 2011; LYNCH; STEFFEN; ARENDT, 2016; MUSSATTO, 2014; SANTOS et al., 2003).

A comparação entre a amostra antes e após a secagem pode ser analisada pelas Figuras 27 A e 27 B, respectivamente.

Figura 27 - Amostra antes (A) e após (B) a secagem



Fonte: Autoria própria (2019).

O valor de cinzas (1,70%) foi um pouco abaixo da maioria dos valores encontrados na literatura, os quais variaram entre 2,4% e 4,6%, isso para análises do produto em base seca (DRAGONE, 2007; KANAUCHI; MITSUYAMA; ARAKI, 2001). Carvalheiro et al. (2004) encontraram 1,2% de cinzas no bagaço de malte, enquanto Adeniran, Abiose e Ogunsua (2010) encontraram 7,9%, ambos também em base seca. Ou seja, este componente possui grande faixa de variação para este resíduo. As cinzas do bagaço de malte têm por característica serem ricas

em minerais, principalmente silício, cálcio e fósforo (DRAGONE, 2007). A amostra após a realização da análise pode ser observada pela Figura 28.

Figura 28 - Amostra após análise de cinzas



Fonte: Autoria própria (2019).

Já o pH do bagaço de malte (5,70) ficou muito próximo dos valores encontrados na literatura. Mello, Vergílio e Mali (2013) encontraram um valor de 5,73 para o pH do BSG, e Almeida (2014) encontrou 5,93, após um processo de secagem e moagem do bagaço. Esses valores próximos de pH entre os diversos trabalhos contidos na literatura, com relação ao bagaço de malte, podem ser explicados, em parte, pelo efeito tamponante que o malte apresenta, já que ele é fornecedor de ácidos orgânicos ao mosto cervejeiro. Este efeito tamponante do malte torna-se muito importante quando relacionado à maximização da atividade enzimática, devendo o mosto, para tanto, ser mantido com um pH entre 4,5 e 5,8. Com isso, mesmo que o pH da água das diversas produções cervejeiras sejam diferentes, o pH, devido à presença do malte, tem uma tendência natural de estabilizar próximo da faixa considerada ideal para o processo, desde que a água não possua um caráter muito alcalino. Neste caso, podem ser dissolvidos materiais indesejáveis ao mosto (BRUNELLI; MANSANO; VENTURINI FILHO, 2014; KUNZE, 1999; MELLO; SIQUEIRA, 2017; TSCHOPE, 2001).

A análise de acidez revelou uma quantidade de 2,43% de acidez para este resíduo. De acordo com a literatura, os principais ácidos constituintes do bagaço de malte são aminoácidos e ácidos fenólicos, que conferem um potencial antioxidante ao BSG, e ácido acético (LYNCH; STEFFEN; ARENDT, 2016; MUSSATTO, 2014; MUSSATTO; DRAGONE; ROBERTO, 2006; PALMQVIST; HAHN-HÄGERDAL, 2000; XIROS; CHRISTAKOPOULOS, 2012). Xiros e Christakopoulos (2012) indicaram que o BSG pode conter até 0,8% de ácidos fenólicos. Almeida (2014) encontrou 8,03% de acidez no bagaço de malte, sendo ligeiramente mais elevada do que o valor encontrado neste trabalho.

O valor para proteína (7,76%) do bagaço de malte encontra-se dentro dos limites de 2,4 e 24%, reportado na literatura por Aliyu e Bala (2011). O mesmo ocorre para fibra bruta (14,70%), o qual ficou dentro da faixa encontrada na literatura, entre 3,3 e 17,66%, sendo estes valores encontrados pelos autores Adeniran, Abiose e Ogunsua (2010) e Batista (2014), respectivamente.

A quantidade de carboidratos no bagaço de malte foi calculada de duas maneiras. A primeira foi realizada por meio de análise laboratorial, resultando em 18,69%, e a segunda pelo cálculo tradicional da diferença centesimal (60,48%), amplamente difundido e estabelecido na literatura (GOTTHARDI et al., 2018; INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008; MELO; MANFIO; DA ROSA, 2016; RIGO et al., 2017). A análise laboratorial revelou uma certa diferença em relação a resultados encontrados na literatura. Adeniran, Abiose e Ogunsua (2010) e Niemi et al. (2012) obtiveram 79,9% e 42,2% de carboidratos no bagaço de malte em base seca, respectivamente. Já o cálculo por diferença mostrou-se adequado aos valores contidos na literatura, e foi comparado com os valores nutricionais do malte antes da extração de seus açúcares no processo de fabricação da cerveja. Foi encontrado valor de carboidratos no malte brasileiro em torno de 76%, reportado por Aquarone et al. (2001), o que indica que valores elevados de carboidratos no bagaço de malte são condizentes, mesmo que haja a transferência de boa parte destes açúcares e amidos para as etapas seguintes da produção. Os demais trabalhos encontrados na literatura reportaram seus valores em base úmida. Com isso, torna-se difícil a comparação deste parâmetro, pois a quantidade de água no resíduo influencia significativamente na porcentagem (g/100g) dos demais constituintes do BSG, sem contar que os resultados contidos na literatura também diferem bastante entre si. O resultado da análise de lipídios (1,67%) mostrou certa diferença em relação à literatura, ainda que pequena. Lynch, Steffen e Arendt (2016) reportaram valores entre 3 e 10,6% de lipídios no bagaço de malte, em base seca.

As pequenas diferenças encontradas para alguns constituintes (cinzas e lipídios) do BSG com relação à maior parte dos trabalhos comparados, podem ser relacionadas com o clima, variedade e tempo de colheita da cevada, adição de adjuntos e diferentes condições do processo de mosturação (GOTTHARDI et al., 2018; RIGO et al., 2017; SANTOS et al., 2003).

Pela análise da Tabela 5, percebe-se que a quantidade de carboidratos, fibra e proteína tiveram destaque neste resíduo. Diversas aplicações têm como enfoque a utilização destes constituintes do bagaço de malte para compor novos produtos. Dentre eles, utilização do BSG na fabricação de produtos alimentícios, como a produção de biscoitos tipo *cookie*, onde há o aumento do teor de fibra alimentar e o decréscimo do conteúdo calórico (RIGO et al., 2017).

Outra aplicação possível é a implementação de BSG na dieta alimentícia de animais, principalmente ruminantes, devido ao alto valor de carboidratos e proteínas, que podem levar ao aumento na produção e qualidade do leite de vaca. Porém, o alto valor que o resíduo pode conter de lignina na fibra, pode torná-lo indigerível para muitos animais (PLAZA et al., 2017).

No setor de tecnologia, a baixa quantidade de cinzas, associado a alta quantidade de material fibroso (lignina, hemicelulose e celulose), torna o bagaço de malte adequado para uso na produção de materiais de construção, bem como matéria-prima na fabricação de papel (RUSS; MÖRTEL; MEYER-PITTROFF, 2005; XIROS; CHRISTAKOPOULOS, 2012).

6 CONCLUSÃO

Levando em conta a melhora obtida no desempenho do modelo na descrição da cinética de secagem do bagaço de malte, considerando a variação do coeficiente de transferência de massa com a umidade, conclui-se que estas mudanças, quando condizentes com o processo estudado, se tornam muito factíveis, pois nem sempre modelos empíricos conseguem descrever com precisão dados obtidos da secagem de materiais com comportamentos diferenciados. Além disso, este modelo não possui toda a complexibilidade matemática de um modelo fenomenológico, o que se torna uma vantagem em termos de implementação computacional.

Outro ponto relevante é a importância da temperatura no comportamento dos dados experimentais e dos parâmetros obtidos do modelo. A temperaturas mais elevadas, há maiores taxas de transferência de umidade do grão, e os parâmetros que captam esse fenômeno também aumentam. Além disso, temperaturas maiores resultam em um menor tempo de processo de secagem. Porém, essa temperatura deve ser escolhida cautelosamente, pois a certas temperaturas pode haver a mudança da estrutura dos grãos. Isto pode acarretar prejuízos quando há outros interesses envolvidos que não sejam apenas o estudo da cinética de secagem, como por exemplo, a comercialização do resíduo.

A composição físico-química do resíduo de bagaço de malte revelou muita variação nas propriedades deste produto, devido a diversos fatores relacionados ao seu processo de obtenção. Além disso, a sua composição revelou o imenso potencial de aproveitamento que este resíduo pode ter.

Com isso, este estudo pode ser relevante não somente para o estudo da cinética de secagem do bagaço de malte, como também para a análise da sua obtenção e suas diversas aplicações para posterior comercialização.

REFERÊNCIAS

- ABRACERVA. **Número de cervejarias artesanais no Brasil cresce 37,7% em 2017.** Disponível em: <<http://abracerva.com.br/numero-de-cervejarias-artesanais-no-brasil-cresce-377-em-2017/>>. Acesso em: 11 set. 2018.
- ADENIRAN, H. A.; ABIOSE, S. H.; OGUNSUA, A. O. Production of Fungal β -amylase and Amyloglucosidase on Some Nigerian Agricultural Residues. **Food Bioprocess Technol**, p. 693-698, 2010.
- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 349-353, 1999.
- AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, v. 59, p. 99-104, 2003.
- ALIYU, S.; BALA, M. Brewer's spent grain: A review of its potentials and applications. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, p. 324-331, 2011.
- ALMEIDA, A. R. **Compostos bioativos do bagaço de malte: fenólicos, capacidade antioxidante in vitro e atividade antibacteriana.** Curitiba, PR. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, 2014.
- (ANVISA) Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos. Artigo nº 5. DOU n. 184, de 23 de setembro de 2005. **Resolução de diretoria colegiada - RDC n. 263.** 2005.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official Methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists.** Arlington: A.O.A.C., 1980.
- AQUARONE, E.; BORZANI, W.; SCHMIDELL, W.; LIMA, U. A. **Biotecnologia Industrial: Biotecnologia na Produção de Alimentos.** 1. Ed. Editora Edgard Blücher LTDA, v. 4, 2001.
- BATISTA, E. A. **Estudo do processo de secagem do resíduo de malte gerado na produção de cerveja.** Trabalho de Conclusão de Curso. Campina Grande, PB, 2016.
- BATISTA, M. C. T. **Produção de dextranases a partir de bagaço de malte: caracterização e avaliação do potencial de aplicação em indústria sucroalcooleira.** Curitiba, PR. Tese de Doutorado em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2014.
- BEQUETTE, B. W. **Process Dynamics Modeling, Analysis and Simulation.** 1. Ed. New Jersey: Prentice-Hall PTR, 1998. 621 p.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte.** 2. Ed. LTC Editora, 2004.

BOREL, L. D. M. S.; LIRA, T. S.; RIBEIRO, J. A.; ATAÍDE, C. H.; BARROZO, M. A. S. Pyrolysis of brewer's spent grain: Kinetic study and products identification. **Industrial Crops & Products**, p. 388-395, 2018.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária - Anvisa. Decreto nº 2.314, de 4 de setembro de 1997. Regulamenta a Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 5 set. 1997.

BROD, F. P. R.; ALONSO, L. F. T.; PARK, K. J. **Secagem de produtos agrícolas**. XI SEMEAGRI – Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp. Campinas: Agrológica – Empresa Júnior de Eng. Agrícola. 1999, 122 p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI Book, 1992. 450 p.

BRUNELLI, L. T.; MANSANO, A. R.; VENTURINI FILHO, W. G. Caracterização físico-química de cervejas elaboradas com mel. **Braz. J. Food Technol.**, Campinas, v. 17, n. 1, p. 19-27, 2014.

BUFFINGTON, J. The economic potential of brewer's spent grain (BSG) as a biomass feedstock. **Advances in Chemical Engineering and Science**, p. 308-318, 2014.

CABRAL FILHO, S. L. S. **Avaliação do Resíduo de Cervejaria em Dietas de Ruminantes Através de Técnicas Nucleares e Correlatas**. Piracicaba, SP. Dissertação de Mestrado em Ciências, Universidade de São Paulo, 1999.

CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; DA SILVA, R. F.; DETMANN, E. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 29, n. 2, p. 28-37, 2007.

CARVALHEIRO, F.; ESTEVES, M. P.; PARAJÓ, J. C.; PEREIRA, H.; GÍRIO, F. M. Production of oligosaccharides by autohydrolysis of brewery's spent grain. **Bioresource Technology**, p. 93-100, 2004.

CARVALHO, G. B. M.; BENTO, C. V.; SILVA, J. B. A. Elementos Biotecnológicos Fundamentais no Processo Cervejeiro: 1ª parte – As Leveduras. **Revista Analytica N° 25**, 2006.

CECCHI, H. M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos**. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2003. 208 p.

CELMA, A. R.; LÓPEZ-RODRIGUÉZ, F.; BLÁZQUEZ, F. C. Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products. **Food and Bioproducts Processing**, v. 87, p. 247-253, 2009.

CERVBRASIL. **Indústria da cerveja aposta na sustentabilidade**. Disponível em: <http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/industria-da-cerveja-aposta-na-sustentabilidade/>. Acesso em: 29 set. 2018.

CHAE, H. J.; JOO, H.; IN, M-J. Utilization of brewer's yeast cells for the production of food-grade yeast extract. Part 1: effects of different enzymatic treatments on solid and protein recovery and flavor characteristics. **Bioresource Technology**, p. 253-258, 2001.

CLARK, J. H.; MURPHY, M. R.; CROOKER, B. A. Supplying the Protein Needs of Dairy Cattle from By-Product Feeds. **Journal of Dairy Science**, v. 70, n. 5, p. 1092-1109, 1987.

CORDEIRO, L. G. **Caracterização e Viabilidade Econômica do Bagaço de Malte Oriundo de Cervejarias para Fins Energéticos**. João Pessoa, PB. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal da Paraíba, 2011.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Eng. Agríc.**, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.

COUTINHO, M. R.; CONCEIÇÃO, W. A. S.; OMOTO, E. S.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. M. Novo modelo de parâmetros concentrados aplicado à hidratação de grãos. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, p. 451-455, 2007.

COUTINHO, M. R.; OMOTO, E. S.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. M. Modelagem e validação da hidratação de grãos de soja. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, p. 603-610, 2005.

DA MOTTA, A. P.; NASCIMENTO, B. S.; DE SOUZA, F. B.; NICOLIN, D. J. Cálculo fracionário aplicado à generalização da modelagem matemática da secagem de bagaço de uva. In: ENEMP, 2017, Maringá. **Anais...** Maringá: UEM, 2017. p. 1-2.

DE SOUZA, L. F. **Um experimento sobre a dilatação térmica e a Lei de Resfriamento**. Trabalho de Conclusão de Curso. 2007.

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

DRAGONE, G.; SILVA, T. A. O.; SILVA, J. B. A. Cerveja, in: FILHO, V.; GASTONI, W. **Bebidas Alcoólicas: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Blücher, 2010.

DRAGONE, S. I. M. **Aproveitamento integral de subproduto da indústria cervejeira em processos químicos e biotecnológicos**. Lorena, SP. Tese de Doutorado em Biotecnologia Industrial, Universidade de São Paulo, 2007.

EVANGELISTA, J. **Tecnologia de Alimentos**. 2. ed. São Paulo: Atheneu, 2001.

FARIA, R. Q.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; RESENDE, O. Cinética de Secagem de Sementes de Crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 573-583, 2012.

FERREIRA, A. S.; BENKA, C. L. **Produção de Cerveja Artesanal a Partir de Malte Germinado Pelo Método Convencional e Tempo Reduzido de Germinação**. Trabalho de Conclusão de Curso. Francisco Beltrão, PR, 2014.

- FERREIRA, I. M. P. L. V. O.; PINHO, O.; VIEIRA, E.; TAVARELA, J. G. Brewer's *Saccharomyces* yeast biomass: characteristics and potential applications. **Trends Food Sci. Technol.**, v. 21, p. 77-84, 2010.
- FILLAUDEAU, L.; BLANPAIN-AVET, P.; DAUFIN, G. Water, wastewater and waste management in brewing industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, p. 463-471, 2006.
- FIORENTIN, L. D.; MENON, B. T.; ALVES, J. A.; DE BARROS, S. T. D.; PEREIRA, N. C.; LIMA, O. C. M.; MODENES, A. N. Análise da secagem do bagaço de laranja em camada fina utilizando modelos semi-teóricos e empíricos. **ENGEVISTA**, v. 14, n. 1, p. 22-33, 2012.
- GOMES, F. P.; RESENDE, O.; SOUSA, E. P.; DE OLIVEIRA, D. E. C.; DE ARAÚJO NETO, F. R. Drying kinetics of crushed mass of 'jambu': Effective diffusivity and activation energy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 7, p. 499-505, 2018.
- GOTTHARDI, A.; TAVARES, G.; MOHR, L.; LICODIEDOFF, S.; KOSLOWSKI, L. A. D. Aproveitamento do bagaço de malte no desenvolvimento de pão de mel. In: 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 2018, Bento Gonçalves - RS. **Anais...** Bento Gonçalves: 2018.
- GOVERNO DO BRASIL. **Brasil é o terceiro no ranking mundial de produção de cerveja**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/08/brasil-e-o-terceiro-no-ranking-de-producao-mundial-de-cerveja>>. Acesso em: 11 set. 2018.
- HERNÁNDEZ, A. M.; RODRÍGUEZ, J. L.; LÓPEZ, B.; ZERQUERA, O. L. Caracterización química y funcional del afrecho de malta. **Alimentaria May**, p. 105-107, 1999.
- HUGHES, G. **Cerveja Feita em Casa**. 1. ed. Editora Publifolha, 2014. 224 p.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz**. v. 1: *Métodos Químicos e Físicos para análise de alimentos*. 3. ed. São Paulo: IMESP, 1985.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz: Métodos físico-químicos para análises de alimentos**. São Paulo: IAL, 2008.
- JANGAM, S. V. An Overview of Recent Developments and Some R&D Challenges Related to Drying of Foods. **Drying Technology**, v. 29, p. 1343-1357, 2011.
- KANAUCHI, O.; MITSUYAMA, K.; ARAKI, Y. Development of a Functional Germinated Barley Foodstuff from Brewer's Spent Grain for the Treatment of Ulcerative Colitis. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, p. 59-62, 2001.
- KREYSZIG, E. **Advanced engineering mathematics**. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2011.
- KUNZE, W. **Technology Brewing and Malting**. Berlim: VLB, 1999.
- KUNZE, W. **Technology Brewing and Malting**. Berlim: VLB, 2004.

- LEVENBERG, K. A method for the solution of certain problems in least squares. **Quarterly of Applied Mathematics**, v. 2, p. 164-168, 1944.
- LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, 1921.
- LIANG, S.; WAN, C. Carboxylic acid production from brewer's spent grain via mixed culture fermentation. **Bioresource Technology**, p. 179-183, 2015.
- LOPES, C. R.; DE QUEIROZ, A. M.; DA SILVA, K. C.; MENDES, E. C. S.; SILVÉRIO, B. C.; FERREIRA, M. M. P. Estudo cinético de desidratação e caracterização do bagaço de malte resíduo da indústria. **Universidade Federal de Goiás**, 2015.
- LUFT, L.; CONFORTIN, T. C.; TODERO, I.; DA SILVA, J. R. F.; TOVAR, L. P.; KUHN, R. C.; JAHN, S. L.; TREICHEL, H.; MAZUTTI, M. A. Ultrasound technology applied to enhance enzymatic hydrolysis of brewer's spent grain and its potential for production of fermentable sugars. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-8, 2018a.
- LUFT, L.; CONFORTIN, T. C.; TODERO, I.; UGALDE, G.; ZABOT, G. L.; MAZUTTI, M. A. Transformation of residual starch from brewer's spent grain into fermentable sugars using supercritical technology. **The Journal of Supercritical Fluids**, p. 85-90, 2018b.
- LYNCH, K. M.; STEFFEN, E. J.; ARENDT, E. K. Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. **J. Inst. Brew.**, p. 553-568, 2016.
- MACHADO, J. A. T.; GALHANO, A. M. S. F.; TRUJILLO, J. J. On development of fractional calculus during the last fifty years. **Scientometrics**, p. 577-582, 2013.
- MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried Young coconut. **Drying Technology**, v. 21, n. 9, p. 1759-1780, 2003.
- MAHMOOD, A. S.; BRAMMER, J. G.; HORNUNG, A.; STEELE, A.; POULSTON, S. The intermediate pyrolysis and catalytic steam reforming of Brewers spent grain. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 103, p. 328-342, 2012.
- MALLEN, E.; NAJDANOVIC-VISAK, V. Brewers' spent grains: Drying kinetics and biodiesel production. **Elsevier**, p. 16-23, 2018.
- MARQUARDT, D. W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, p. 431-441, 1963.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.
- MATHIAS, T. R. S.; MELLO, P. P. M.; SERVULO, E. F. C. Caracterização de resíduos cervejeiros. In: COBEQ, 2014, Florianópolis. **Anais...** p. 2.

MATTOS, C. **Desenvolvimento de um pão fonte de fibras a partir do bagaço de malte**. Porto Alegre, RS. Monografia apresentada para obtenção do título de Engenheiro de Alimentos, UFRGS, 2010.

MAYER, E. T.; FUKU, G.; NÖRNBERG, J. L.; MINELLA, E. Caracterização nutricional de grãos integrais e descascados de cultivares de cevada. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 42, n. 11, p. 1635-1640, 2007.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5. ed. Editora McGraw-Hill, 1993.

MELLMANN, J.; WEIGLER, F.; SCAAR, H. Research on procedural optimization and development of agricultural drying processes. **Drying Technology**, 2018.

MELLO, L. R. P. F.; VERGÍLIO, R. M.; MALI, S. Caracterização Química e Funcional do Resíduo Fibroso da Indústria Cervejeira. BBR – Biochemistry and Biotechnology Reports - ISSN 2316-5200 Número Especial. **Anais do III Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia**, v. 2, n. 3, p. 191-194, 2013.

MELLO, L. S. S.; SIQUEIRA, V. L. **Estudo de cervejas ácidas**. Niterói, RJ. Projeto Final apresentado para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense, 2017.

MELO, A. A.; MANFIO, M.; DA ROSA, C. V. Composição e propriedades tecnológicas da farinha do resíduo da fermentação da cerveja. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 18, n. 1, p. 91-95, 2016.

(MAPA) MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **A Cerveja no Brasil**. Jan. 2018. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/a-cerveja-no-brasil>>. Acesso em: 29 set. 2018.

(MAPA) MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **As Cervejas Continuam a Crescer**. Jan. 2019. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/pasta-publicacoes/DIPOV/as-cervejas-continuam-a-crescer-pdf/view>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

(MAPA) MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Normas gerais de amostragem para análise de rotina. **Portaria n. 108**, de 04 de setembro de 1991, [República Federativa do Brasil], Brasília. Seção 1.

MONTANUCI, F. D.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Cinética de hidratação e difusão nos grãos de cevada. In: COBEQ, 2014, Florianópolis. **Anais...** p. 2.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. John Wiley & Sons, 2014.

MUNEKATA, P. E. S.; FRANCO, D.; TRINDADE, M. A.; LORENZO, J. M. Characterization of phenolic composition in chestnut leaves and beer residue by LC-DAD-ESI-MS. **LWT - Food Science and Technology**, p. 52-58, 2016.

MUSSATTO, S. I. Biotechnological Potential of Brewing Industry By-Products. **In: Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation**. P. Singh nee' Nigam e A. Pandey. Springer, 2009.

MUSSATTO, S. I. Brewer's spent grain: a valuable feedstock for industrial applications. **J. Sci. Food Agric.**, p. 1264-1275, 2014.

MUSSATTO, S. I.; DRAGONE, G.; ROBERTO, I. C. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. **Journal of Cereal Science**, p. 1-14, 2006.

NICOLIN, D. J.; COUTINHO, M. R.; JORGE, L. M. M. **Simulação e ajuste de modelos matemáticos de hidratação de grãos, segundo a abordagem de parâmetros concentrados**. 1. ed. Eduem, 2013.

NICOLIN, D. J.; JORGE, R. M. M.; JORGE, L. M. M. Efeitos da difusividade variável na modelagem da hidratação de soja como um problema do tipo Stefan. In: COBEQ, 2016, Fortaleza. **Anais...** p. 1-2.

NICOLIN, D. J.; JORGE, R. M. M.; JORGE, L. M. M. Moving boundary modeling of conventional and transgenic soybean hydration: Moisture profile and moving front experimental validation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 90, p. 568-577, 2015.

NIEMI, P.; TAMMINEN, T.; SMEDS, A.; VILJANEN, K.; OHRA-AHO, T.; HOLOPAINEN-MANTILA, U.; FAULDS, C. B.; POUTANEN, K.; BUCHERT, J. Characterization of lipids and lignans in brewer's spent grain and its enzymatically extracted fraction. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, p. 9910-9917, 2012.

OHRA-AHO, T.; NIEMI, P.; AURA, A. M.; ORLANDI, M.; POUTANEN, K.; BUCHERT, J.; TAMMINEN, T. Structure of brewer's spent grain lignin and its interactions with gut microbiota in vitro. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, p. 812-820, 2016.

OLAJIRE, A. A. The brewing industry and environmental challenges. **Journal of Cleaner Production**, p. 1-21, 2012.

ONOFRE, S. B.; BERTOLDO, I. C.; ABATTI, D.; REFOSCO, D. Physiochemical Characterization of the Brewers' Spent Grain from a Brewery Located in the Southwestern Region of Parana - Brazil. **International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB)**, v. 2, p. 277-280, 2017.

ORTIZ, P. R. B. **Análise do consumo energético do processo de produção de cerveja artesanal por bateladas**. Porto Alegre, RS. Monografia apresentada para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, UFRGS, 2014.

PAES, A. T. Por dentro da estatística. **Einstein: Educ. Contin. Saúde**, p. 107-108, 2008.

PALMER, J. J. **How to Brew: Everything you need to know to brew beer right the first time**. Brewers Publications, 2006.

- PALMQVIST, E.; HAHN-HÄGERDAL, B. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanisms of inhibition. **Bioresource Technology**, p. 25-33, 2000.
- PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modelling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 4, p. 349-357, 2002.
- PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus* sp.) em fatias. **Ciência e Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 21, p. 288-292, 2001.
- PLAZA, P. E.; GALLEGO-MORALES, L. J.; PEÑUELA-VÁSQUEZ, M.; LUCAS, S.; GARCÍA-CUBERO, M. T.; COCA, M. Biobutanol production from brewer's spent grain hydrolysates by *Clostridium beijerinckii*. **Bioresource Technology**, p. 166-174, 2017.
- POLAN, C. E.; HERRINGTON, T. A.; WARK, W. A.; ARMENTANO, L. E. Milk production response to diets supplemented with dried brewers grains, wet brewers grains, or soybean meal. **Journal of Dairy Science**, v. 68, p. 2016-2026, 1985.
- PRENTICE, N.; D'APPOLONIA, B. L. High-fiber bread containing brewers' spent grain. **Cereal Chemistry**, p. 1084-1095, 1977.
- RAMÍREZ, C.; ASTORGA, V.; NUÑEZ, H.; JAQUES, A.; SIMPSON, R. Anomalous diffusion based on fractional calculus approach applied to drying analysis of apple slices: The effects of relative humidity and temperature. **Journal of Food Process Engineering**, p. 1-10, 2017.
- REINOLD, M. R. **Manual Prático de Cervejaria**. 1. ed. São Paulo: ADEN, 1997.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, p. 17-26, 2008.
- RESENDE, O.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V. C.; ARCANJO, R. V. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. **Acta Amazônica**, v. 40, p. 247-256, 2010.
- RIGO, M.; BEZERRA, J. R. M. V.; RODRIGUES, D. D.; TEIXEIRA, A. M. Avaliação físico-química e sensorial de biscoitos tipo cookie adicionados de farinha de bagaço de malte como fonte de fibra. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 13, n. 1, p. 47-57, 2017.
- ROCHA, D. C.; SANTOS, B. M.; SCHEID, C. M.; E CALÇADA, L. A. Determinação dos coeficientes de difusão e convectivo na secagem de sementes de *nasturtium officinale* (agrião). In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2005, Campinas. **Resumos...** Campinas: 2005.
- ROSA, N. A.; AFONSO, J. C. A Química da Cerveja. **Quím. nova esc.**, São Paulo, v. 37, n. 2, p. 98-105, 2015.
- RUSS, W.; MÖRTEL, H.; MEYER-PITTROFF, R. Application of spent grains to increase porosity in bricks. **Constr. Build. Mater.**, p. 117-126, 2005.

- SANTOS, M.; JIMÉNEZ, J. J.; BARTOLOMÉ, B.; GÓMEZ-CORDOVÉS, C.; NOZAL, M. J. Variability of brewer's spent grain within a brewery. **Food Chemistry**, p. 17-21, 2003.
- SARAIVA, B. R.; VITAL, A. C. P.; ANJO, F. A.; CESARO, E.; MATUMOTO-PINTRO, P. T. Valorização de resíduos agroindustriais: fontes de nutrientes e compostos bioativos para a alimentação humana. **Pubsaúde**, 2018.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Teste for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.
- SIMPSON, R.; JAQUES, A.; NUÑEZ, H.; RAMIREZ, C.; ALMONACID, A. Fractional Calculus as a Mathematical Tool to Improve the Modeling of Mass Transfer Phenomena in Food Processing. **Food Eng. Rev.**, v. 5, p. 45-55, 2013.
- SIQUEIRA, P. B.; BOLINI, H. M. A.; MACEDO, G. A. O processo de fabricação da cerveja e seus efeitos na presença de polifenóis. **Alim. Nutr.**, Araraquara, v. 19, n. 4, p. 491-498, 2008.
- SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Drying kinetics of Jatropha seeds. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 2, p. 171-177, 2012.
- SOUSA, F. T.; SILVA, M. A. P.; OLIVEIRA, D. E. C.; PLÁCIDO, G. R.; CAGNIN, C.; MOURA, L. C.; SOUZA, D. G.; CALIARI, M.; LIMA, M. S. Modelagem Matemática da Secagem e Propriedades Físicas e Funcionais do Bagaço de Malte. **Gl. Sci Technol.**, Rio Verde, v. 9, n. 3, p. 51-61, 2016.
- SPIESS, A.; NEUMEYER, N. An evaluation of R^2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: a Monte Carlo approach. **BMC Pharmacology**, 2010.
- STATISTA. **Beer production worldwide from 1998 to 2017**. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/270275/worldwide-beer-production/>>. Acesso em: 11 set. 2018.
- TSCHOPE, E. C. **Microcervejarias e Cervejarias: A História, a Arte e a Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Aden, 2001.
- UGHELINI, D. **La birra artigianale oltre la rivoluzione: la crescita del movimento e il futuro del settore**. Dissertação de Mestrado em Estratégias de Comunicação, Universidade de Pádua, 2016.
- VIEIRA, A. W. **Apostila de Produção de Cervejas Artesanais**. VERSÃO: 0.4, 2009. Disponível em: <<http://www.acervapaulista.com.br/>>. Acesso em: 31 dez. 2018.
- XIROS, C.; CHRISTAKOPOULOS, P. Biotechnological potential of brewers spent grain and its recent applications. **Waste Biomass Valor**, p. 213-232, 2012.
- ZHANG, J.; ZANG, L. Enhancement of biohydrogen production from brewers' spent grain by calcined-red mud pretreatment. **Bioresource Technology**, p. 73-79, 2016.

APÊNDICE A - Rotina computacional do modelo

```

function tcc = modeloSecKEXPADM(P,~)

rho0 = 2.4029; % 50oC - Umidade inicial em base seca
rhoe = 0.1039; % 50oC - Umidade de equilíbrio em base seca

rhospan = [Dados Experimentais Omitidos]; %50oC - Dados
experimentais de umidade em base seca

rhoeq = ((rhoe-rhoe)./(rho0 - rhoe));%Umidade de
equilíbrio adimensional
rhoi = ((rho0 - rhoe)./(rho0 - rhoe));%Umidade inicial
adimensional

B1 = P(2).*(rho0-rhoe); % Parâmetro B adimensionalizado
B2 = rhoe./(rho0-rhoe); % Agrupamento realizado para o
processo de adimensionalização
A1 = P(1).*exp(-B1.*B2); % Parâmetro A adimensionalizado

tspan
=(1/60)*[0;3;6;9;12;15;18;21;24;27;30;33;36;39;42;45;48;51
;54;57;60;63;66;69;72;75;78;81;84;87;90;...

93;96;99;102;105;108;111;114;117;120;123;126;129;132;135;1
38;141;144;147;150;153;156;159;...

162;165;168;171;174;177;180;183;186;189;192;195;198;201;20
4;207;210;213;216;219;222;225;...

228;231;234;237;240;243;246;249;252;255;258;261;264;267;27
0;273;276;279;282;285;288;291;...

294;297;300;303;306;309;312;315;318;321;324;327;330;333;33
6;339;342;345;348;351;354;357;360];%Vetor Tempo
Experimental

[~,rho] = ode15s(@modelsec,tspan,rhoi); % Comando para
solução numérica

function drhodt = modelsec(~,rho)
B1 = P(2).*(rho0-rhoe);
B2 = rhoe./(rho0-rhoe);
A1 = P(1).*exp(-B1.*B2);

rhoe = 0.1039; % 50oC

```

```

drhodt = -A1.*(exp(-B1.*rho)).*rho;
    end

    tcc = rho;
end

close all
clear all
clc

% Rotina de ajuste de parâmetros e plotagem de resultados
para 50oC

P0 = [2 1]; %Chute Inicial

t0
=(1/60)*[0;3;6;9;12;15;18;21;24;27;30;33;36;39;42;45;48;51
;54;57;60;63;66;69;72;75;78;81;84;87;90;...

93;96;99;102;105;108;111;114;117;120;123;126;129;132;135;1
38;141;144;147;150;153;156;159;...

162;165;168;171;174;177;180;183;186;189;192;195;198;201;20
4;207;210;213;216;219;222;225;...

228;231;234;237;240;243;246;249;252;255;258;261;264;267;27
0;273;276;279;282;285;288;291;...

294;297;300;303;306;309;312;315;318;321;324;327;330;333;33
6;339;342;345;348;351;354;357;360]; %Vetor Tempo
Experimental

rhoexp = [Dados Experimentais Omitidos]; %50oC - Dados
experimentais de umidade em base seca

rho0 = 2.4029; % 50oC
rhoe = 0.1039; % 50oC

rhoexp2 = (rhoexp-rhoe)./(rho0-rhoe);

options = statset('Display','iter');

[P,RESIDS,J,COVB,MSE] =
nlinfit(t0,rhoexp2,'modeloSecKEXPADM',P0,options); %
Comando para ajuste de parâmetros

ci = nlparci(P,RESIDS,J);

```

```

[rho,sigma] = corrcov(COVB);

rhopred = modeloSecKEXPADM(P,t0);

[rhopred,delta]=nlpredci('modeloSecKEXPADM',t0,P,RESIDS,J,
0.05,'on','curve');

[rhopred,deltaob]=nlpredci('modeloSecKEXPADM',t0,P,RESIDS,
J,0.05,'on','observation');

%Intervalos de confiança para a linha de regressão
CBu = rhopred+delta;
CBl = rhopred-delta;

%Intervalos de previsão para a linha de regressão
PBu = rhopred+deltaob;
PBl = rhopred-deltaob;

plot(t0,rhopred,'-k','linewidth',2)
set(gca,'fontsize',18)
xlabel('t (h)','fontsize',24)
ylabel('X(t)','fontsize',24)
hold on
plot(t0,rhoexp2,'ok','linewidth',1.5,'markersize',7)
p = legend('Modelo','Dados Experimentais');
set(p,'location','best','fontsize',14)

```


APÊNDICE B - Resultados das análises realizadas pelo laboratório LGQ



Relatório de Ensaio 4658/2019.1

Este relatório de ensaio cancela e substitui o relatório 4658/2019.0

Proposta Comercial: PC390/2018.1

Data de Publicação: 25/04/2019 09:59

Identificação Conta	
Cliente: Bruno Telli Ceccato	CNPJ/CPF: 068.717.539-90
Endereço: Rua Octaviano Teixeira dos Santos apartamento - Centro - Francisco Beltrão - Paraná - CEP: 85601030 - Brazil	

Identificação da Amostra: 4658-1/2019.1 - Farinha de Malte	
Data Amostragem: 05/04/2019 13:00	Data Recebimento: 05/04/2019 15:04
Data Fabricação: NI	Data Validade: NI
Lote: NI	Lacre: NA
Ponto de Amostragem: Amostra 01	Responsável pela Amostragem: Cliente
Temperatura no Recebimento (°C): 26.4°	Quantidade de Amostra recebida (g/mL): 211 g
Observações: NI	

Resultados Analíticos

Físico Químico					
Ensaio	Resultado	LQ	Incerteza	Método de Referência	Data Ensaio
Proteína Bruta	7,42 g/100g	0,49	-	MAPA – Portaria n°108, de 04/09/1991. Método n°4	09/04/2019 13:00
Glicídios Totais (Carboidratos)	18,33 g/100g	2	-	MAPA – Portaria n°108, de 04/09/1991. Método n°21	09/04/2019 08:30
Fibra Bruta	14,59 g/100g	0,62	-	MAPA – Portaria n°108, de 04/09/1991. Método n°11	10/04/2019 09:00
Lipídios (Gordura)	1,68 g/100g	0,06	-	MAPA – Portaria n°108, de 04/09/1991. Método n°10	09/04/2019 10:00

Notas

NI: Não informado. NA: Não aplica. LQ: Limite de quantificação. ND: Não detectável.

Valores de Referência: Consulte a legislação aplicável e em vigor.

Este relatório de ensaio refere-se somente à amostra conforme recebida e só pode ser reproduzido por completo e sem nenhuma alteração.

Plano e método de amostragem e informações da amostra são de responsabilidade do solicitante.

Opiniões, interpretações e declarações de conformidade não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

Local da realização dos ensaios LGQ Laboratório: Instalações permanentes.



Relatório de Ensaio 4659/2019.1

Este relatório de ensaio cancela e substitui o relatório 4659/2019.0

Proposta Comercial: PC390/2018.1

Data de Publicação: 25/04/2019 09:57

Identificação Conta	
Cliente: Bruno Telli Ceccato	CNPJ/CPF: 068.717.539-90
Endereço: Rua Octaviano Teixeira dos Santos apartamento - Centro - Francisco Beltrão - Paraná - CEP: 85601030 - Brazil	

Identificação da Amostra: 4659-1/2019.1 - Alimentos Processados	
Data Amostragem: 05/04/2019 13:10	Data Recebimento: 05/04/2019 15:05
Data Fabricação: NI	Data Validade: NI
Lote: NI	Lacre: NA
Ponto de Amostragem: Amostra 02	Responsável pela Amostragem: Cliente
Temperatura no Recebimento (°C): 26,4°	Quantidade de Amostra recebida (g/mL): 154 g
Observações: NI	

Resultados Analíticos

Físico Químico					
Ensaio	Resultado	LQ	Incerteza	Método de Referência	Data Ensaio
Proteína Bruta	8,11 g/100g	0,49	-	MAPA – Portaria n°108, de 04/09/1991. Método n°4	08/04/2019 13:00
Glicídios Totais (Carboidratos)	19,05 g/100g	2	-	MAPA – Portaria n°108, de 04/09/1991. Método n°21	09/04/2019 08:30
Fibra Bruta	14,82 g/100g	0,62	-	MAPA – Portaria n°108, de 04/09/1991. Método n°11	10/04/2019 09:00
Lipídios (Gordura)	1,67 g/100g	0,06	-	MAPA – Portaria n°108, de 04/09/1991. Método n°10	09/04/2019 10:00

Notas

NI: Não informado. NA: Não aplica. LQ: Limite de quantificação. ND: Não detectável.

Valores de Referência: Consulte a legislação aplicável e em vigor.

Este relatório de ensaio refere-se somente à amostra conforme recebida e só pode ser reproduzido por completo e sem nenhuma alteração. Plano e método de amostragem e informações da amostra são de responsabilidade do solicitante. Opiniões, interpretações e declarações de conformidade não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório. Local da realização dos ensaios LGQ Laboratório: Instalações permanentes.