



BÁRBARA SAAR MARTINS OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SECAGEM DA BATATA-
DOCE NA HIDRÓLISE ENZIMÁTICA**

**LAVRAS – MG
2023**

BÁRBARA SAAR MARTINS OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SECAGEM DA BATATA-DOCE NA
HIDRÓLISE ENZIMÁTICA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior
Orientador

Prof. Dr. Rafael Peron Castro
Coorientador

**LAVRAS – MG
2023**

BÁRBARA SAAR MARTINS OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SECAGEM DA BATATA-DOCE NA
HIDRÓLISE ENZIMÁTICA**

**EVALUATION OF SWEET POTATO DRYING CONDITIONS ON ENZYMATIC
HYDROLYSIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em

Banca:

Eng^a. Nayra Maria de Abreu Piva – UFLA

Prof. Dr. Luciano Jacob Correa - UFLA

Prof. Dr. Rafael Peron Castro - UFLA

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior - UFLA

**LAVRAS – MG
2023**

*À Deus.
Aos meus pais.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que nunca me desamparou nos momentos mais conturbados, sendo minha fortaleza e lugar de paz.

À minha mãe, Aparecida, que fez e faz de tudo por mim e pelos meus estudos, sendo minha melhor amiga, meu refúgio e cuidando de mim tão bem com seu amor incondicional. Sem você nada disso seria possível e sou feliz de poder ter o seu amparo.

Ao meu saudoso pai, Edvaldo, que me ensinou a ter força e coragem nas horas difíceis, sorrindo para a vida e sendo persistente. Obrigada por não ter medido esforços para me ajudar e por ter sido minha força para continuar. Sou eternamente grata.

Ao Guilherme, meu namorado e companheiro, por ter sido paciente e compreensivo com meus momentos de angústia e desânimo, me acompanhando e ajudando nessa jornada. Você me incentivou todos os dias a continuar.

À toda a minha família, tios, tias e primos que, por muitas vezes, foram meu refúgio de todo o caos, especialmente à minha avó Deijinha, que é meu grande exemplo de fé e bondade, além de me iluminar com momentos de gargalhadas e amor.

Aos meus amigos de infância, Diego, Jordan, Júlia e Raiane, por alimentarem nossa amizade com tantos momentos de felicidade, bons conselhos e risadas. Vocês tornam minha vida leve e me ajudaram a chegar até aqui.

À minha amiga Luana, que foi minha grande companheira e o maior presente que a faculdade poderia ter me dado. Obrigada por ter contribuído para que nosso lar fosse um lugar de paz e acolhimento, por todos os conselhos e momentos agradáveis ao seu lado.

À minha sogra e sogro, Cristina e Márcio, por terem sido tão prestativos e acolhedores, contribuindo para que eu pudesse concluir os meus experimentos.

Ao G-Óleo, por ter sido tão transformador na minha vida e ter me proporcionado tantas oportunidades, amizades e muito conhecimento. Levo comigo ótimas lembranças e uma imensa gratidão. Agradeço à toda equipe atual, por ter tornado esse TCC possível, especialmente aos integrantes do projeto bioetanol, que ajudaram muito nos meus experimentos.

Ao meu Orientador, Dr. Irineu, por ter acreditado nesse projeto e aceitado me orientar. Agradeço por toda a compreensão, confiança e por ter mantido esse período leve e agradável.

Ao meu Coorientador, Dr. Rafael Peron, por ter sido prestativo e otimista no nosso projeto. Obrigada por todos os conselhos, conversas e ensinamentos.

À Universidade Federal de Lavras, que com toda a sua estrutura me permitiu chegar até aqui, conhecendo ótimos professores e profissionais que ajudaram a construir todo o meu saber

até aqui. O meu muito obrigada.

RESUMO

A busca por combustíveis alternativos àqueles não renováveis é uma pauta mundialmente debatida, visando a diminuição de impactos ambientais negativos atrelados à sua queima. O bioetanol representa uma opção mais sustentável, podendo ser obtido de biomassas como a cana-de-açúcar, no caso do Brasil, em um processo no qual uma levedura consome os açúcares presentes, produzindo etanol. Existem outras matérias-primas potenciais para a produção de bioetanol, sendo uma delas a batata-doce, uma cultura de fácil plantio e que resulta em um bom rendimento de etanol. No entanto, por ser uma fonte amilácea, a batata-doce necessita de uma etapa adicional no processo, chamada de hidrólise, que consiste na quebra do amido em monossacarídeos. Para realizar a hidrólise, existem diferentes formas de pré-processamento da matéria-prima, sendo uma delas a secagem, podendo interferir na quantidade de açúcar obtida ao final dessa etapa. A secagem consiste na retirada de água do material e pode ser realizada de diversas formas. Com isso, o presente trabalho consiste em um estudo acerca das condições de secagem da batata-doce, variando parâmetros e observando sua influência na concentração final de açúcares da hidrólise enzimática, sendo estes: temperatura, tipo de secador e espessura. Foram testados dois tipos de secadores, sendo: a estufa com circulação forçada de ar, na qual as secagens foram feitas nas temperaturas de 100°C, 75°C e 50°C e nas espessuras de 1,5 mm e 3,0 mm; e o secador de micro-ondas com sistema *on/off* e controle de temperatura, nas temperaturas de 75°C e 50°C e 3,0 mm de espessura. Para melhor avaliação, foram construídas as curvas cinéticas das secagens e foi feito o ajuste dos dados experimentais com modelos semi empíricos. Por meio dos experimentos, foi possível constatar que o aumento da temperatura causa a diminuição do tempo de secagem, bem como o aumento das taxas de secagem, além de que o aumento da espessura resulta em maiores tempos de secagem e menores valores de taxas. O secador micro-ondas apresentou taxas de secagem consideravelmente mais elevadas do que a estufa ao início do processo e menores ao final. Os modelos que se mostraram mais adequados para realizar o ajuste dos dados experimentais foi o de Page e Page Modificado. Em relação ao rendimento de açúcares redutores, todas as hidrólises realizadas com a farinha resultaram em maiores concentrações do que a realizada com a batata-doce *in natura*. A espessura de 3,0 mm se mostrou mais eficiente e, no caso da estufa, a melhor temperatura foi a de 50°C. Para o micro-ondas, a melhor temperatura foi a de 75°C, mostrando uma tendência diferente da estufa. No panorama geral, a condição que demonstrou o melhor rendimento foi a secagem em estufa à 50°C e 3,0 mm de espessura. Na análise energética, concluiu-se que o gasto é maior do que o ganho, não sendo vantajosa a secagem.

Palavras-chave: Bioetanol. Bioenergia. Fontes amiláceas. Pré-tratamento. Concentração de açúcares redutores.

ABSTRACT

The search for alternative fuels to non-renewable ones is a globally debated issue, aimed at reducing the negative environmental impacts linked to their burning. Bioethanol represents a more sustainable option and can be obtained from biomass such as sugar cane, in the case of Brazil, in a process in which a yeast consumes the sugars present, producing ethanol. There are other potential raw materials for the production of bioethanol, one of which is sweet potatoes, a crop that is easy to grow and produces a good yield of ethanol. However, because it is a starchy source, sweet potatoes require an additional step in the process, called hydrolysis, which consists of breaking down the starch into monosaccharides. To carry out hydrolysis, there are different ways of pre-processing the raw material, one of which is drying, which can affect the amount of sugar obtained at the end of this stage. Drying consists of removing water from the material and can be carried out in various ways. With this in mind, the present work consists of a study of the drying conditions of sweet potatoes, varying parameters and observing their influence on the final concentration of sugars from enzymatic hydrolysis: temperature, type of dryer and thickness. Two types of dryer were tested: the oven with forced air circulation, in which drying was carried out at temperatures of 100°C, 75°C and 50°C and thicknesses of 1.5 mm and 3.0 mm; and the microwave dryer with an on/off system and temperature control, at temperatures of 75°C and 50°C and a thickness of 3.0 mm. For a better evaluation, the drying kinetic curves were constructed and the experimental data was adjusted using semi-empirical models. The experiments showed that increasing the temperature caused a reduction in drying time and an increase in drying rates, while increasing the thickness resulted in longer drying times and lower drying rates. The microwave dryer showed considerably higher drying rates than the oven at the start of the process and lower rates at the end. The models that proved most suitable for adjusting the experimental data were the Page and Modified Page models. With regard to the yield of reducing sugars, all the hydrolysis processes carried out with the flour resulted in higher concentrations than those carried out with the fresh sweet potato. The thickness of 3.0 mm proved to be more efficient and, in the case of the oven, the best temperature was 50°C. For the microwave, the best temperature was 75°C, showing a different trend to the oven. Overall, the condition that showed the best performance was oven drying at 50°C and 3.0 mm thickness. At the energy analysis, it was concluded that the expense is greater than the gain and that drying is not advantageous.

Keywords: Bioethanol. Bioenergy. Starch sources. Pre-treatment. Concentration of reducing sugars.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Macromoléculas de amilose e amilopectina.	19
Figura 2: Curvas de umidade, taxa de secagem e temperatura ao longo do tempo.	24
Figura 3: Estrutura do amido para diferentes métodos de secagem; (a) Secagem por Micro-Ondas; (b) Secagem na estufa a 105°C.	27
Figura 4: Batata-doce adquirida em supermercado.	29
Figura 5: Estufa com Circulação e Renovação de Ar modelo Ar SL-102.	30
Figura 6: Sistema de Secagem de Micro-Ondas.	31
Figura 7: Componentes do Sistema de Secagem de Micro-Ondas; (a) Magnetron e (b) Sistema elétrico.	32
Figura 8: Amostras de batatas-doces para teor de água.	32
Figura 9: Batatas-doces após corte e pesagem.	33
Figura 10: Secagem de batata-doce em estufa para moagem e hidrólise.	34
Figura 11: Moinho de Facas Fortinox, tipo Willye, Star FT 50.	35
Figura 12: Banho Maria Fisatom, modelo 550.	36
Figura 13: Liquefação do mosto.	36
Figura 14: Etapas da hidrólise enzimática da batata-doce <i>in natura</i> ; (a) gelatinização; (b) liquefação e (c) sacarificação.	37
Figura 15: Mostos finais de cada condição experimental.	38
Figura 16: Centrífuga Jouan C3i Multifunction.	40
Figura 17: Espectrofotômetro Bioespectro SP22.	40
Figura 18: Testes de DNS nas amostras de hidrólise.	41
Figura 19: Comparação das batatas-doces secas em cada condição experimental.	43
Figura 20: Cinética de secagem – secador Micro-Ondas e 3,0 mm de espessura.	43
Figura 21: Cinética de secagem – secador Estufa; a) 1,5 mm de espessura e b) 3,0 mm de espessura.	44
Figura 22: Cinética de secagem para uma dada temperatura; (a) 100°C; (b) 75°C e (c) 50°C.	46
Figura 23: Ajuste do modelo de Page para as cinéticas de secagem; (a) Secagem em estufa e 1,5 mm; (b) Secagem em estufa e 3,0 mm e (c) Secagem em Micro-Ondas e 3,0 mm.	49
Figura 24: Taxa de secagem; (a) estufa 1,5 mm; (b) estufa 3,0 mm e (c) micro-ondas 3,0 mm	50
Figura 25: Curva padrão de glicose.	52
Figura 26: Diluições das hidrólises referentes às condições experimentais A, E, F, G, H, I. ..	53

Figura 27: Fita medidora de pH e controle de temperatura do banho termostático.55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização físico-química do cultivar de batata-doce Brazilândia roxa.	15
Tabela 2: Modelos empíricos não-lineares utilizados para a secagem.....	26
Tabela 3: Diluições da solução padrão de glicose 1 g/L.	39
Tabela 4: Teor de água inicial médio (base úmida).....	42
Tabela 5: Tempos de equilíbrio para cada condição de secagem.....	45
Tabela 6: Parâmetros dos modelos cinéticos ajustados para as secagens de batata-doce (continua).....	47
Tabela 7: Parâmetros dos modelos cinéticos ajustados para as secagens de batata-doce (conclusão).....	48
Tabela 8: Absorbâncias das soluções de glicose.	52
Tabela 9: Absorbâncias e concentrações de açúcares redutores para cada condição experimental.	53
Tabela 10: Análise energética da secagem em estufa à 75°C e 3,0 mm.	56
Tabela 11: Análise energética da secagem em estufa à 50°C e 3,0 mm.....	56
Tabela 12: Análise energética da secagem em micro-ondas à 75°C e 3,0 mm.	57
Tabela 13: Análise energética da secagem em micro-ondas à 50°C e 3,0 mm.	57
Tabela 14: Energia específica total em termos de kg de etanol produzido.	57

LISTA DE SÍMBOLOS

X^*	Umidade de equilíbrio em base úmida	[g/g]
X_0	Umidade inicial em base úmida	[g/g]
$X_{b.s.}$	Umidade em base seca	[g/g]
$X_{b.u.}$	Umidade em base úmida	[g/g]
X	Umidade no tempo “t”	[g/g]
m_t	Massa total de amostra	[g]
m_a	Massa de água no sólido	[g]
m_s	Massa do sólido seco	[g]
RU	Razão de umidade	[-]
t	Tempo de secagem	[min]
r	Taxa de secagem	[g/(g.min)]
A	Área disponível para transferência de calor e massa	[m ²]
U	Concentração de água	[kg/m ³]
D_{ef}	Difusividade efetiva	[m ² /s]
E_aR	Energia de ativação vezes a constante dos gases	[K]
C	Concentração de açúcares redutores	[gAR/L]
ABS	Absorbância	[A]
T	Temperatura do ar de secagem	[K]
a	Parâmetro do modelo cinético	[-]
b	Parâmetro do modelo cinético	[-]
c	Parâmetro do modelo cinético	[-]
k_0	Parâmetro do modelo cinético	[-]
k_1	Parâmetro do modelo cinético	[-]
k	Parâmetro do modelo cinético	[-]
n	Parâmetro do modelo cinético	[-]
n_1	Parâmetro do modelo cinético	[-]
n_2	Parâmetro do modelo cinético	[-]

SUBÍNDICES

0	Inicial
*	Equilíbrio
<i>b. s.</i>	Base seca
<i>b. u.</i>	Base úmida
<i>s</i>	Sólido seco
<i>a</i>	Água
<i>t</i>	Total

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivos gerais	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Batata-doce.....	15
3.2 Etanol.....	16
3.3 Obtenção de etanol por fontes amiláceas	18
3.4 Processo de secagem	21
3.5 Cinética de secagem.....	23
3.6 Trabalhos correlatos	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 Condições operacionais	29
4.2 Unidades experimentais	30
4.3 Teor de água inicial	32
4.4 Secagem em Estufa	33
4.5 Secagem em Micro-ondas	34
4.6 Pré-tratamento: moagem	35
4.7 Hidrólise enzimática das batatas-doces	35
4.8 Análise de Açúcares Redutores Totais (ART)	38
4.9 Análise de gasto energético	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1 Teor de água.....	42
5.2 Cinética de secagem.....	43
5.3 Ajuste dos Modelos Cinéticos	47
5.4 Taxa de Secagem.....	50
5.5 Análise de Açúcares Redutores Totais (ART)	52
5.6 Análise Energética	56
6 CONCLUSÕES.....	58
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	60
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Existe, mundialmente, uma grande busca por combustíveis alternativos àqueles comumente utilizados, por serem esses últimos de origem fóssil e causarem impactos adversos ao meio ambiente. Os biocombustíveis apresentam uma alternativa promissora para a diversificação da matriz energética, destacando-se o bioetanol que é largamente utilizado para a combustão, por ser menos poluente e ainda ser um recurso renovável (LÁZARI e ABREU, 2010).

O etanol pode ser utilizado em sua forma hidratada, sendo ele o único constituinte do combustível, ou em sua forma anidra, sendo empregado como aditivo da gasolina. A porcentagem do etanol como aditivo pode variar de 18 - 27,5% conforme a Lei 13.033 de 24 de setembro de 2014 (BRASIL, 2014).

No Brasil, o bioetanol é produzido a partir do beneficiamento da cana-de-açúcar, visto que essa cultura demanda pequenas áreas de plantio em relação a outras empregadas pelo mundo. A batata-doce representa uma matéria-prima de grande potencial para a produção desse combustível, já que seu rendimento em litros por tonelada de material beneficiado é bastante satisfatório. Ainda que apresente essa vantagem, esse tubérculo necessita de uma área maior de plantio para produzir uma mesma quantidade de bioetanol se comparada à cana-de-açúcar (VITAL, 2008 *apud* CASTRO, TREPTOW e BECKER, 2012).

O processo produtivo do etanol a partir de fontes amiláceas, como a batata-doce, ocorre resumidamente por meio da hidrólise procedida de fermentação alcoólica. A hidrólise consiste na quebra das ligações glicosídicas da cadeia linear do amido em açúcares fermentescíveis, de tamanhos menores, que conseguem ser fermentados por uma levedura. Esse processo pode ser realizado com a utilização de enzimas ou ácidos, sendo a primeira alternativa a mais empregada (BARROS e BLUM, 2018).

Antes da etapa de hidrólise, é realizado um pré-processamento que pode variar conforme a matéria-prima, de modo que essa hidrólise pode ocorrer utilizando a batata-doce *in natura* ou na forma de farinha. O processo de obtenção da farinha é feito por meio de secagem e moagem e, a depender das condições e equipamentos utilizados, pode causar efeitos estruturais no amido que irão interferir nas etapas posteriores (RISSO, 2014).

O processo de secagem de um material sólido envolve a eliminação da água ou de qualquer outro líquido presente nesse material, até que seja alcançado um determinado teor de água. A diminuição dessa concentração de umidade no sólido é alcançada por meio de processos simultâneos de transferência de massa e de calor (MCCABE *et al.*, 2004).

Dessa forma, é importante estudar a secagem da batata-doce e sua interferência no processo de hidrólise enzimática, possibilitando o aprimoramento das técnicas já existentes de produção de bioetanol. Para isso, entender a cinética de secagem desse material e como ele se comporta em diversas condições torna-se relevante no contexto de diversificação da matriz energética brasileira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Avaliar a influência do processo de secagem da batata-doce (*Ipomoea batatas L.*) no teor de açúcares redutores obtido ao final da hidrólise enzimática, por meio do estudo de sua cinética de secagem em diferentes condições.

2.2 Objetivos específicos

Tem-se como objetivos específicos:

- Obter as curvas da cinética de secagem da batata-doce para secagem em estufa nas temperaturas de 100°C, 75°C e 50°C e espessuras de 1,5 mm e 3,0 mm;
- Obter as curvas de cinética de secagem da batata-doce para secagem em micro-ondas, nas temperaturas de 75°C e 50°C e espessura de 3,0 mm;
- Avaliar a influência dos parâmetros escolhidos na cinética de secagem e ajustar os resultados experimentais por meio de modelos de cinética da literatura, avaliando qual será o mais representativo;
- Definir qual condição experimental de secagem resultará no maior teor de açúcares redutores ao final da hidrólise enzimática;
- Realizar análise energética comparativa entre os dois tipos de secadores.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção é apresentada uma fundamentação sobre toda a teoria envolvida na secagem da batata-doce e na hidrólise de seu amido, além de dar um panorama geral sobre a produção de etanol a partir de biomassas.

3.1 Batata-doce

A batata-doce (*Ipomoea batatas L.*) é uma raiz muito presente no cotidiano da população brasileira, sendo muito consumida para alimentação, seja ela humana ou de animais. Por apresentar alta adaptabilidade a diferentes tipos de solo (incluindo aqueles pobres em nutrientes) e a condições de baixas taxas de precipitação, além de um custo de produção reduzido, é uma cultura considerada rústica sendo bastante comum em países em desenvolvimento (EMBRAPA, 2021).

As folhas da batata-doce são ricas em proteínas, fator favorável para a alimentação de animais, ao passo que o conteúdo de sua polpa pode variar de acordo com sua cor e origem. Ainda que haja conteúdo proteico em suas ramas, sua utilização para a alimentação animal ainda é reduzida e boa parte delas é desperdiçada (MASSAROTO, 2008). De forma geral, a polpa é rica em carboidratos, betacaroteno, vitaminas e minerais, sendo um alimento muito utilizado em diversos tipos de dietas (EMBRAPA, 2021). O teor de carboidrato dessa cultura pode ser quase equiparado ao da mandioca, tendo em torno de 20% de amido em suas raízes, como cita Neto *et al.* (2011).

Tabela 1: Caracterização físico-química do cultivar de batata-doce Brazilândia roxa.

Componentes	Valor
Carboidrato (%)	24,41
Lipídio (%)	1,23
Fibra (%)	0,40
Proteína (%)	5,52
Umidade (%)	67,33
Cinzas (%)	1,11
Açúcar redutor (%)	9,79
pH	5,31
Acidez titulável (%)	0,82
Sólidos solúveis (°Brix)	2,69
Cor (uH)	3,80

Fonte: adaptado de SOUZA *et al.* (2019).

De acordo com o IBGE (2020), o Brasil ocupa o 16º lugar no ranking de produção dessa cultura, totalizando 805,4 mil toneladas produzidas, consolidando-se como o maior produtor da América Latina. Sua produção ocorre em todo o território brasileiro, em sua maior parte como cultura de segurança alimentar em propriedades rurais de pequeno porte, sendo que, sua utilização para fins industriais ainda é muito pequena. O investimento em tecnologias de produção mais robustos para a batata-doce ainda é escasso, alegando-se que não é uma cultura que retorna muita lucratividade (EMBRAPA, 2021).

Há diversas aplicações industriais para os produtos da batata-doce; seu amido pode ser empregado nas indústrias de papel, têxtil, adesivos, etc. Algumas outras substâncias como o betacaroteno e as antocianinas também possuem utilidade como corantes depois de extraídas (RAY e TOMLINS, 2010). Uma aplicação que vem sendo estudada nos últimos anos é a utilização da batata-doce como matéria-prima na obtenção de etanol, já que seu teor de amido é alto e há várias outras vantagens em sua produção.

3.2 Etanol

Uma parcela significativa da energia consumida mundialmente é derivada da combustão de recursos energéticos fósseis, como o petróleo, o gás natural e o carvão. Estes compostos são grandes responsáveis pela emissão significativa de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, além de sua queima resultar na liberação de outros poluentes gasosos, tal qual o dióxido de enxofre (SO₂), que contribuem para a degradação da qualidade do ar e têm implicações ambientais substanciais (BRAGA et al., 2005).

Existe um grande debate em relação à substituição dos produtos advindos do petróleo, devido ao grande impacto ambiental associado à sua extração, beneficiamento e queima (ROSSETO *et al.*, 2017). Um biocombustível de grande potencial, já empregado em diversos países, é o etanol, que se caracteriza por uma queima mais limpa além de apresentar rotas de obtenção menos poluentes.

A ascensão dos biocombustíveis na matriz energética brasileira pode ser explicada pelos seguintes fatores: as condições climáticas favoráveis, as técnicas agrícolas avançadas e a presença consolidada do agronegócio, que proporcionam uma utilização eficaz dos recursos naturais. Um aspecto crucial a ser destacado é a capacidade desses biocombustíveis de manter um equilíbrio entre as emissões e a absorção de poluentes, uma vez que os gases liberados durante sua queima são compensados pelo crescimento das safras seguintes. Isso resulta em um ciclo autossustentável que contribui para a diminuição da emissão dos gases de efeito estufa (ABREU, OLIVEIRA e GUERRA, 2010).

Um dos biocombustíveis de maior importância é o etanol, sendo utilizado tanto sozinho, em sua forma hidratada, ou como aditivo da gasolina em sua forma anidra, além de ser uma substância importante para diversos ramos da indústria (BRASIL,2014). Devido a essa importância, as tecnologias de conversão de açúcar em etanol vêm sendo cada vez mais aprimoradas, havendo grandes biorrefinarias espalhadas pelo mundo.

Os biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel, que incorporam oxigênio em sua composição, desempenham um papel crucial na redução das emissões de monóxido de carbono (CO) quando adicionados aos combustíveis fósseis. Essa característica adicional torna esses biocombustíveis essenciais na busca por uma abordagem mais sustentável em relação à energia, não apenas preservando o meio ambiente, mas também beneficiando a qualidade do ar e a saúde pública (ABREU, OLIVEIRA e GUERRA, 2010).

O etanol pode ser obtido de diferentes maneiras, sendo que uma delas envolve a síntese a partir do eteno, um derivado de petróleo, que consiste em um recurso não renovável encontrado na natureza. Uma alternativa, mais sustentável e ecológica, é a produção de etanol através de uma rota fermentativa, na qual uma levedura especializada realiza a fermentação alcoólica dos açúcares (BASTOS, 2007)

De forma geral, o bioetanol via rota fermentativa pode ser obtido por meio de três fontes principais, sendo elas: açúcares simples, amido e celulose. Açúcares simples são encontrados em matérias-primas como cana-de-açúcar e beterraba, chamadas de sacarinas; o amido utilizado vem de fontes como mandioca, trigo, milho e batata-doce; a celulose é proveniente de madeiras e resíduos agroindustriais de forma geral (GÜLDEN, 2019).

As matérias-primas que contêm açúcares simples são menos complexas de serem transformadas em etanol, já que a levedura consegue consumi-las sem nenhum empecilho. De forma geral, a fermentação alcoólica só acontece a partir de monossacarídeos, dissacarídeos e/ou trissacarídeos. Quando a matéria é formada por polissacarídeos, que consistem em cadeias muito longas, necessita-se de uma etapa adicional para realizar a quebra das suas ligações, o que ocorre no caso do amido e da celulose.

A utilização de culturas amiláceas para a produção de bioetanol já é bastante empregada ao redor do mundo, representando 60% da matéria-prima, ao passo que os outros 40% são cultivares sacaríneos, como a cana-de-açúcar, utilizada no Brasil (MUSSATTO *et al.*, 2010). Em outros países, outras culturas amiláceas são empregadas como fonte de obtenção de etanol, como é o caso dos Estados Unidos que utilizam principalmente o milho, assim como o Canadá, sendo a mandioca e o trigo mais utilizados em países asiáticos (MARCICCIA, 2007).

No cenário brasileiro, além da cana-de-açúcar que é a matéria-prima mais utilizada para a obtenção de etanol, há também outras fontes como o próprio milho, que teve seu início no estado do Mato Grosso em meados de 2012. Em relação ao espaço utilizado para a cultura, o milho apresenta desvantagem, visto que é necessária uma área de plantio muito maior para produzir a mesma quantidade de biomassa em relação à cana-de-açúcar (BNDES, 2008).

É de suma importância que os países adotem uma abordagem abrangente na diversificação de suas fontes de energia, visando otimizar o aproveitamento de diversas variedades energéticas. Isso permite não apenas mitigar o impacto da sazonalidade na produção energética, mas também reduzir a dependência geográfica das fontes de energia. Este fato, atrelado à boa adaptabilidade e características fisiológicas da batata-doce, a tornam uma boa alternativa para promover a ampliação de matérias-primas com potencial energético utilizadas na produção de bioetanol (RISSO, 2014).

Tomando como base a produtividade, reafirma-se a viabilidade de utilização da batata-doce na produção de etanol, visto que, de acordo com Vital (2008), a cana-de-açúcar apresenta uma produção de etanol de 80 L/t, ao passo que, para a batata-doce, esse valor é de 170 L/t.

3.3 Obtenção de etanol por fontes amiláceas

O processo produtivo do etanol a partir da cana-de-açúcar é mais simples do que aquele feito com a batata-doce, o que se deve à forma em que se encontra o carboidrato dentro de cada uma das culturas. Na cana-de-açúcar, uma espécie sacarina, esse carboidrato está na forma de açúcares simples, que estão livres para serem consumidos pela levedura. No caso da batata-doce e das demais culturas amiláceas, como visto anteriormente, o carboidrato se dispõe na forma de amido, demandando uma etapa adicional que realizará a quebra das ligações desse componente.

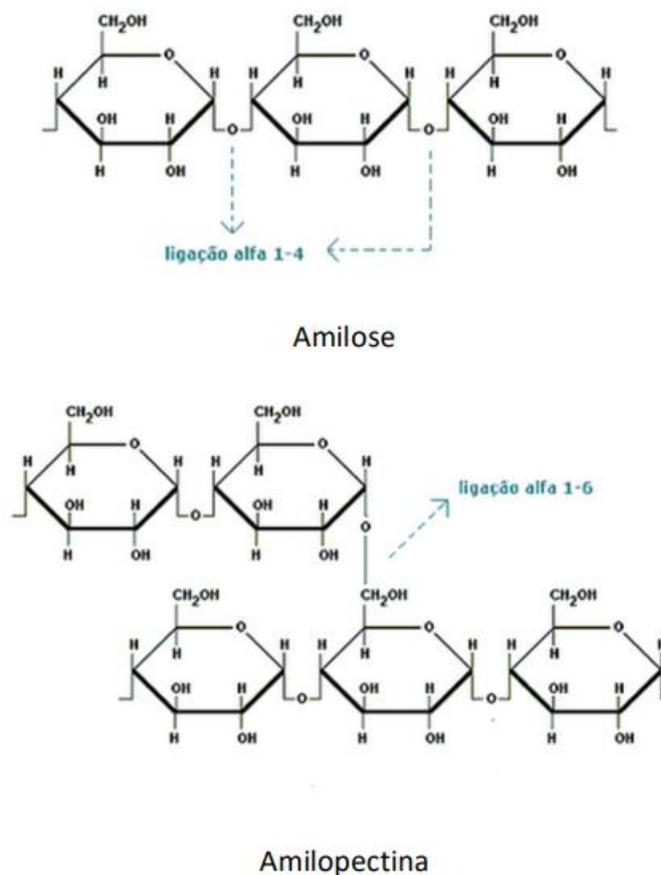
O amido é uma macromolécula que se caracteriza por sua extensa cadeia polimérica, composta por unidades de moléculas de glicose interligadas por meio de ligações glicosídicas, que podem assumir duas formas principais, α -1,4 e α -1,6. Esta complexa estrutura do amido é marcante por ser o carboidrato de maior relevância como reserva energética nos organismos do reino vegetal, desempenhando um papel fundamental na armazenagem de energia a longo prazo nas plantas (SCHWEINBERGER, 2016).

Esse polissacarídeo é formado por duas estruturas principais denominadas amilose e amilopectina, como mostradas na Figura 1, sendo que a porcentagem de cada tipo de cadeia presente no amido varia de acordo com sua fonte de origem. As amiloses são macromoléculas que contêm ligações do tipo α -1,4, caracterizando-se por apresentar cadeias lineares. Já as

amilopectinas são formadas por cadeias ramificadas, com presença de ligações α -1,6 podendo inclusive existirem sozinhas em alguns mutantes, sendo suficientes para formarem grânulos (OLIVEIRA, 2011).

As cadeias presentes no amido interagem por meio de ligações de hidrogênio, conferindo à essa estrutura a característica cristalina. As regiões amorfas são menos densas, sendo, portanto, mais propícias a sofrerem ataque químico e/ou enzimático. De modo geral, atribui-se a característica amorfa à presença de amilose, de forma que, quanto menor seu conteúdo no amido, maior será o grau de cristalinidade, o que resultará na necessidade de maiores temperaturas para desfazer seus cristais (SINGH *et al.*, 2003).

Figura 1: Macromoléculas de amilose e amilopectina.



Fonte: Silva (2010) *apud* Risso (2014).

A etapa que consiste na quebra das ligações do amido é chamada de hidrólise e pode se concretizar de duas maneiras distintas: por via ácida ou por via enzimática. A rota ácida, que não é muito empregada, apresenta desafios devido à tendência de corroer os equipamentos envolvidos, à necessidade de operar em condições de elevada pressão e temperatura, à potencial degradação dos açúcares alvo e à exigência de uma etapa suplementar de neutralização, que

culmina na formação de resíduos salinos. Além disso, esse método acaba por gerar também açúcares não fermentescíveis, diminuindo o rendimento do processo. Apesar dos pontos negativos, a hidrólise ácida apresenta como vantagem o fato de ocorrer em um tempo menor (MACHADO e ABREU, 2006).

Já a rota enzimática é um método bastante consolidado em todo o mundo, presente em países como os EUA, China e Tailândia. Enzimas são um tipo de proteína que desempenham função catalisadora em diversos processos e precisam estar em condições adequadas para que sejam eficazes. De forma geral, a atividade de uma enzima é diretamente influenciada pela temperatura, pH e concentração do meio em que se encontram, sendo que possuem faixas ótimas de operação (SCHWEINBERGER, 2016).

O processo de hidrólise enzimática pode ser dividido em gelatinização, liquefação e sacarificação. A gelatinização consiste na quebra das ligações de hidrogênio presentes no grânulo do amido, que deve estar em suspensão aquosa e ser submetido a um aumento de temperatura. A temperatura de gelatinização é diferente para cada fonte de amido, sendo que, de acordo com Rocha *et al.* (2010), para a batata-doce essa temperatura está entre 67°C e 75°C. Bermudez (1997) *apud* Vieira (2004) menciona que essa faixa de temperatura vai de 61,1 a 86°C.

Ao aquecer o grânulo de amido em excesso de água, ocorre uma notável mudança. As moléculas de água começam a penetrar na macromolécula, associando-se com os grupos hidroxila expostos e formando novas pontes de hidrogênio. Isso leva à desintegração gradual das pontes de hidrogênio entre as cadeias de amilopectina e amilose, devido às vibrações causadas pelo aumento da temperatura. Paralelamente, uma parte significativa da amilose é lixiviada para a fase aquosa, desempenhando um papel fundamental na sua solubilização. É importante notar que, em contraste, em água fria, o amido permanece insolúvel e se deposita na suspensão (SINGH *et al.*, 2002).

As enzimas responsáveis por catalisar a desestruturação das ligações glicosídicas presentes no amido são denominadas amilases, e podem ser categorizadas em dois grupos distintos: as exoamilases e as endoamilases. As exoamilases operam mediante o ataque direto das extremidades da cadeia de amido, resultando na produção de fragmentos menores como produtos finais desse processo, sendo a α -amilase uma das mais utilizadas. Por outro lado, as endoamilases, como a glucoamilase, fazem seu ataque no interior das moléculas de amido, o que resulta na formação de oligossacarídeos lineares ramificados e de diversas extensões (GUPTA *et al.*, 2003).

De forma mais detalhada, as endoamilases são responsáveis por catalisar a reação de hidrólise das ligações α -1,4, que estão presentes nas macromoléculas de amiloses. Já as exoamilases catalisam a hidrólise de ligações do tipo α -1,6, que formam as estruturas da amilopectina presente no amido (CINELLI, 2012).

Para que o processo de hidrólise seja efetuado com eficácia, utiliza-se a combinação dos dois tipos de enzimas, de forma que as endoamilases fazem a quebra em cadeias maiores e as exoamilases liberam as unidades de glicose dessas cadeias. Essa primeira etapa é chamada de liquefação, na qual a enzima α -amilase encontra o caminho mais livre para atacar as moléculas gelatinizadas, liberando estruturas chamadas de dextrinas. O processo de desintegração das dextrinas em açúcares fermentescíveis, catalisada pela glucoamilase, é chamado de sacarificação (SRICHUWONG *et al.*, 2012 *apud* RISSO, 2014).

O intervalo de temperatura ideal para a atividade das enzimas envolvidas na fase de liquefação normalmente situa-se entre aproximadamente 80°C a 95°C, enquanto o pH adequado varia de 5 a 7. Em contrapartida, no estágio de sacarificação, as enzimas devem operar dentro de uma faixa de pH mais ácido, geralmente em torno de 4 a 4,5, acompanhado de uma temperatura de 60°C a 70°C (MASIERO, 2012).

Vale ressaltar que esses valores podem apresentar variações conforme o tipo específico de enzimas utilizadas, dado que constantemente novas enzimas são introduzidas no mercado, cada uma com suas particularidades e condições ótimas de funcionamento (SCHWEINBERGER, 2016).

Ao final da hidrólise, é possível quantificar os açúcares fermentescíveis que foram liberados, procedimento importante para inferir sobre o potencial do mosto a ser utilizado para uma fermentação alcóolica. Para essa análise, costuma-se empregar o método DNS, que se baseia na reação do açúcar redutor com o reagente DNS em meio ácido, resultando na formação de um complexo. A solução é aquecida para aprimorar o desenvolvimento da cor e, em seguida, resfriada para que a reação seja parada, fazendo-se a medição da absorbância em um espectrofotômetro (EMBRAPA, 2013).

3.4 Processo de secagem

Na produção de etanol, a batata-doce apresenta duas opções de uso: ela pode ser utilizada tanto *in natura* como na forma de farinha. A obtenção da farinha de batata-doce envolve um processo que compreende etapas essenciais de secagem e moagem, que podem ser conduzidas por meio de uma variedade de equipamentos e métodos distintos, oferecendo flexibilidade no processo de preparação (RISSO, 2014).

A desidratação de um componente sólido consiste na remoção do conteúdo aquoso ou de qualquer fluido adicional nele contido, visando atingir um nível específico de umidade. A diminuição dessa concentração de umidade no sólido é alcançada por meio de processos simultâneos de transferência de massa e de calor (MCCABE *et al.*, 2004).

O conteúdo de umidade de um alimento pode estar presente de três formas distintas em seu interior, sendo: água livre, água ligada e água não ligada. Uma diferença importante entre essas formas de água reside na facilidade de mobilidade e na subsequente capacidade de ser retirada do alimento (CECCHI, 2003).

A água livre é aquela presente na superfície externa do sólido, localizando-se entre os espaços intergranulares e os poros, podendo também ser definida como a diferença entre a água total e a água de equilíbrio (MCCABE *et al.*, 2004). A água ligada tem sua mobilidade reduzida devido a ligações químicas estabelecidas com o meio ou até mesmo por estar presa aos microcapilares existentes. Já a água não ligada pode ser entendida como um excesso de água ligada (CECCHI, 2003).

A operação de secagem ocorre por meio de dois fenômenos de transporte, sendo eles a transferência de calor e a transferência de massa. Tais processos acontecem de forma simultânea, impulsionados principalmente pelos efeitos da temperatura e da pressão de vapor entre o corpo e o meio circundante (BRITO, 2022).

Quando há uma diferença de temperatura entre o corpo e o gás (geralmente ar), dá-se início ao fenômeno de transferência de calor. De acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, o calor flui naturalmente do corpo com temperatura mais alta para o corpo com temperatura mais baixa (SMITH e VAN NESS, 2007). Geralmente, a transferência de calor que ocorre no interior dos alimentos é significativamente mais rápida do que a que ocorre na parte externa (KAREL e LUND, 2003).

O fenômeno de transferência de massa está presente em todos os secadores nos quais um gás flui através de um sólido, de forma que a água que está na superfície é transferida para o gás e, ocasionalmente, isso ocorre por meio dos canais internos desse sólido (MCCABE *et al.*, 2004).

Sob a influência de condições que incluem ar com baixíssima ou nenhuma umidade ou temperaturas acima do ponto de vaporização, além da circulação de ar, um material submetido a um processo de secagem prolongado atinge o chamado "*bone-dry*" (ou "completamente seco"). Nesse caso, a umidade de equilíbrio do sólido exposto à secagem é zero em consequência da remoção de todo o conteúdo de água contido no material (MCCABE *et al.*, 2004).

Há diversos equipamentos comumente utilizados para promover a secagem de materiais, sendo um deles a estufa, que pode ser: de secagem simples, com circulação forçada de ar ou à vácuo (ZAMBRANO *et al.*, 2019). Na estufa com circulação forçada de ar, o ar é aquecido com o auxílio de resistências elétricas e injetado no interior do equipamento por meio de ventiladores, que ficam localizados atrás dessas resistências. Nelas, a temperatura é mais homogênea devido à distribuição uniforme do ar quente (RISSO, 2014).

Outra forma de realizar a secagem de materiais é por meio da utilização de micro-ondas. Essa secagem ocorre por meio da interação de moléculas polarizadas, ou íons livres, com as ondas eletromagnéticas, que promovem rotação intensa dessas moléculas e consequente geração de calor devido ao atrito inter e intramolecular. No geral, moléculas de água, que possuem um dipolo bastante expressivo, sofrem grande efeito dessas micro-ondas, explicando o sucesso desse tipo de secagem em alimentos (RISSO, 2014).

De maneira ampla e abrangente, é possível afirmar que o aquecimento induzido por micro-ondas demonstrou ser notavelmente mais eficaz em comparação ao aquecimento originado de fontes de calor convencionais, o que, por sua vez, resultou em um aumento substancial da sua utilização e aplicação no contexto do processamento de alimentos, fomentando sua adoção em larga escala (ALTON, 1998 *apud* GONGALVES *et al.*, 2009).

3.5 Cinética de secagem

O teor de água é imprescindível para a construção das curvas de secagem e posterior estudo da cinética desse processo, sendo calculado pela Equação 1, a seguir:

$$\text{Umidade (b. u.)} = X_{b.u.} = \frac{m_a}{m_t} \cdot 100\% \quad (1)$$

em que m_a é a massa de água, m_t é a massa total de amostra e $X_{b.u.}$ é a umidade em base úmida.

Além da umidade em base úmida, é possível obter a umidade em base seca, conforme Equação 2, sendo que essas duas se relacionam por meio da Equação 3:

$$X_{b.s.} = \frac{m_a}{m_s} \quad (2)$$

$$X_{b.u.} = \frac{X_{b.s.}}{1 + X_{b.s.}} \quad (3)$$

em que $X_{b.u.}$ é a umidade em base úmida, $X_{b.s.}$ é a umidade em base seca, m_a é a massa de água e m_s é a massa do sólido seco.

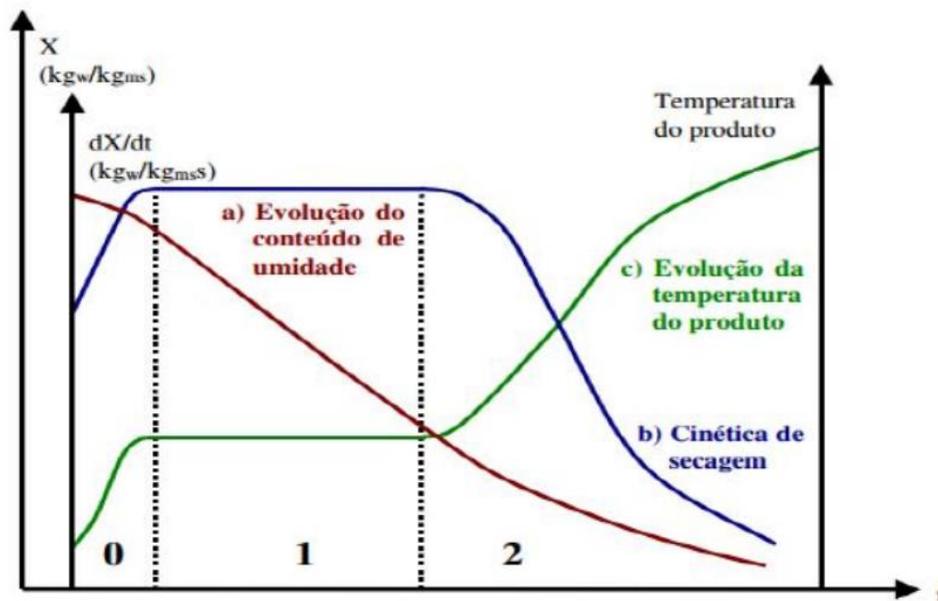
A razão de umidade (RU) é uma relação entre o teor de água em um dado tempo de secagem, o teor de água inicial (b.u.) e a umidade de equilíbrio, podendo ser calculada por meio da Equação 4:

$$RU = \frac{X_{b.u.} - X^*}{X_0 - X^*} \quad (4)$$

em que $X_{b.u.}$ é a umidade em base úmida no tempo “t”; X^* é a umidade de equilíbrio (b.u.) e X_0 é a umidade inicial (b.u.).

Além da razão de umidade, é importante calcular a taxa de secagem, que dá indícios sobre a velocidade na qual ocorre o processo de remoção de água de um determinado material. Para os sólidos, a taxa de secagem segue um perfil característico, como mostra a curva (c) da Figura 2, podendo ser dividido, segundo Park *et al.* (2002) em três períodos: indução, constante e decrescente.

Figura 2: Curvas de umidade, taxa de secagem e temperatura ao longo do tempo.



Fonte: Park *et al.* (2002).

O período de indução (0) é aquele em que a taxa está em crescimento, no qual o calor fornecido é majoritariamente utilizado para ocasionar a elevação de temperatura. Pode-se dizer que o sólido está se acomodando às condições às quais está sendo submetido.

O período de taxa constante (1) se caracteriza pela eliminação da água livre, que é de fácil remoção, estando disponível na superfície do sólido. Nessa fase, há uma equivalência entre as transferências de massa e calor, resultando em uma velocidade constante do processo.

O período de taxa decrescente (2) consiste na queda da taxa de secagem ocasionada pela diminuição da migração de água do interior do sólido para a sua superfície (transferência de massa), diminuindo essa água superficial, causando também um aumento de temperatura do material. Esse processo ocorre até que o sólido entre em equilíbrio com o ar de secagem, atingindo a umidade de equilíbrio.

A taxa de secagem pode ser obtida por meio da Equação 5:

$$r = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad (5)$$

em que r é a taxa de secagem; m_s é a massa de sólido seco; A é a área disponível para transferência de calor e massa; X é a umidade e t é o tempo.

A investigação e aprimoramento dos sistemas de secagem podem se beneficiar da aplicação de simulação matemática. Nesse contexto, é adotado um modelo matemático que efetivamente descreve a redução de umidade do produto ao longo do processo de secagem. Na literatura, encontram-se uma variedade de modelos disponíveis para a análise dessa operação, podendo estes serem: teóricos, semi-teóricos ou semi-empíricos e empíricos (MARTINAZZO *et al.*, 2007).

A difusão de líquidos é uma teoria bastante estudada e mostra-se importante nos processos de secagem, podendo, inclusive, ser considerada como o principal mecanismo existente por alguns modelos teóricos. Nesses modelos, o fluxo de massa por unidade de área é determinado em relação ao gradiente de concentração de água, tomando como base a Segunda Lei de Fick, apresentada na Equação 6 (CRANK, 1975 *apud* RAMALHO, 2018).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \cdot \nabla U) \quad (6)$$

em que X é a umidade, t é o tempo, D_{ef} é a difusividade efetiva e U é a concentração de água.

Os modelos empíricos e semiempíricos levam em consideração fatores externos, como: temperatura, umidade relativa do ar e resistência externa. Os modelos empíricos, em sua essência, estabelecem uma conexão direta entre o período de secagem e o teor médio de umidade, baseando-se em dados experimentais e análises adimensionais. Tais modelos retornam uma representação aceitável da curva de secagem, quando são aplicados às condições específicas nas quais a pesquisa foi conduzida (KEEY, 1972).

Tabela 2: Modelos empíricos não-lineares utilizados para a secagem.

Modelo	Equação
Newton ou Lewis	$RU = \exp^{-kt}$ (7)
Page	$RU = \exp^{-kt^n}$ (8)
Page Modificado	$RU = \exp^{-(kt)^n}$ (9)
Henderson & Pabis	$RU = a. \exp^{-kt}$ (10)
Logarítmico	$RU = c + a. \exp^{-kt}$ (11)
Midilli	$RU = b. t + a. \exp^{-(kt^n)}$ (12)
Dois Termos	$RU = a. \exp^{-k_0t} + a. \exp^{-k_1t}$ (13)
Dois Termos Exponencial	$RU = a. \exp^{-kt} + (1 - a). \exp^{-kat}$ (14)
Aproximação da Difusão	$RU = a. \exp^{-kt} + (1 - a). \exp^{-kbt}$ (15)
Verma	$RU = a. \exp^{-k_0t} + (1 - a). \exp^{-k_1t}$ (16)
Cavalcanti Mata	$RU = c + a. \exp^{-kt^{n_1}} + b. \exp^{-kt^{n_2}}$ (17)
Wang & Sing	$RU = 1 + a. t + b. t^2$ (18)

Fonte: Adaptado de MCCABE *et al.* (2004).

em que $a, b, c, k, k_0, k_1, n, n_1$ e n_2 são parâmetros dos modelos.

Uma forma de relacionar a temperatura com os modelos cinéticos apresentados é utilizando-se da Equação de Arrhenius, que estabelece uma correlação para a constante de secagem “ k ”, conforme mostra a Equação 19:

$$k = k_o. \exp\left(\frac{-E_a}{R.T}\right) \quad (19)$$

em que k é a constante de secagem, k_o é o fator pré-exponencial [h^{-1}], E_a é a energia de ativação [kJ/mol], R é a constante dos gases [kJ/(mol.K)] e T é a temperatura [K].

Em relação à análise energética dos equipamentos utilizados, é possível calcular a potência por meio da Equação 20, a seguir (FERREIRA, 2013).

$$P = U. i \quad (20)$$

em que P é a potência [W], U é a diferença de potencial [V] e i é a corrente elétrica [A].

Considerando-se o tempo de funcionamento do equipamento, bem como a massa inicial de material que foi submetido à secagem, tem-se a energia específica total, conforme Equação 21:

$$\text{Energia específica total} \left[\frac{kWh}{kg}\right] = \frac{P.t}{m} \quad (21)$$

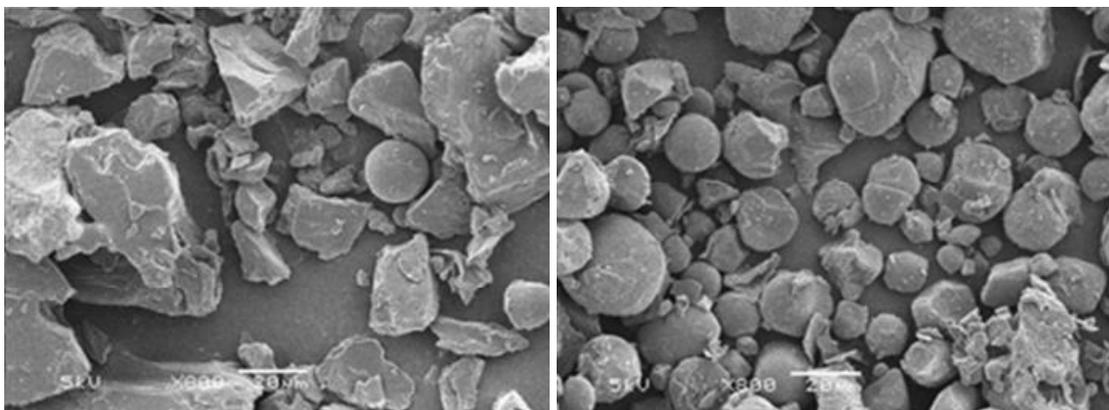
em que t é o tempo de funcionamento [h] e m é a massa inicial de material [kg].

3.6 Trabalhos correlatos

Risso (2014) avaliou as produções de açúcares redutores de hidrólises enzimáticas realizadas com a batata-doce *in natura* e com sua farinha, utilizando uma mistura comercial de enzimas STARGEN 002. As farinhas foram obtidas por meio de seis diferentes métodos de secagem, sendo eles: liofilização, estufa de convecção natural a 60°C e 105°C, ar quente a 60°C, secagem ao sol e micro-ondas. O autor avaliou, também a temperatura de gelatinização da batata-doce, encontrando um valor médio de 57°C. Os resultados foram melhores nos casos em que a hidrólise foi realizada com a farinha, ao invés da batata-doce *in natura*, independentemente do método de secagem utilizado.

Dentre esses métodos, o mais promissor foi o da secagem em micro-ondas, que além de apresentar maior quantidade de açúcares redutores, destacou-se por ter o melhor balanço econômico. Em seus estudos, Risso (2014) analisou a estrutura do amido após as diferentes secagens, por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e observou que na secagem por micro-ondas os grânulos de amido foram quebrados, como mostra a Figura 3.

Figura 3: Estrutura do amido para diferentes métodos de secagem; (a) Secagem por Micro-Ondas; (b) Secagem na estufa a 105°C.



(a)

(b)

Fonte: Adaptado de RISSO (2014).

Nos estudos realizados por Duvernay, Chinn e Yencho (2013), também foram utilizadas batatas-doces tanto *in natura* quanto na forma de farinha para os processos de liquefação e sacarificação, para os quais foram escolhidas as enzimas α -amilase e glucoamilase. Além disso, houve também a etapa de fermentação utilizando três diferentes tipos de levedura. O processo de secagem foi realizado a 70°C por 60 h, seguido de trituração e moagem, além de que a liquefação foi feita a 85°C por 2 h e a sacarificação a 65°C por 48 horas. Para a etapa de

liquefação, a batata-doce *in natura* apresentou melhores resultados, sendo que na etapa seguinte de sacarificação, a quantidade de açúcares fermentescíveis obtida foi maior quando utilizada a farinha. Já na fermentação, o rendimento de etanol foi similar para ambos os casos.

Schweinberger (2016) comparou a eficiência da hidrólise de batatas-doces secas e *in natura* utilizando as enzimas α -amilase e amiloglucosidase. Por meio de análise em espectrofotômetro, foi concluído que a batata-doce seca resultou em menores valores de açúcares fermentescíveis. Porém, esse resultado foi atribuído ao fato de que a farinha formou conglomerados que não se dissolveram durante a hidrólise, dificultando o acesso das enzimas às ligações do amido.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será abordado todo o procedimento experimental do trabalho, bem como o processo de escolha das variáveis analisadas. Além disso serão listadas as unidades experimentais utilizadas, suas especificações e dimensões.

4.1 Condições operacionais

Com a finalidade de avaliar a influência da operação de secagem no processo de hidrólise da batata doce, foram estabelecidas as variáveis dos experimentos, sendo elas: o tipo de secador, a temperatura de secagem e a espessura do material. Cada uma foi avaliada e estudada individualmente, de forma a possibilitar escolhas estratégicas e posteriores comparações que demonstrem resultados satisfatórios.

De início, foi escolhida para os experimentos a batata-doce comercial de casca roxa e poupa branca, como observado na Figura 4. Outros cultivares não foram considerados devido à dificuldade de obtenção, já que essa variedade de batata-doce é muito facilmente encontrada em supermercado.

Figura 4: Batata-doce adquirida em supermercado.



Fonte: Do autor (2023).

Os secadores selecionados foram a Estufa com Circulação e Renovação de Ar e o Secador de Micro-ondas, visto que, com base nos estudos de tempos de secagem Risso (2014), estes apresentam bons resultados de ART ao final da hidrólise, utilizando de bastante divergentes.

As temperaturas escolhidas para as secagens feitas em estufa foram de 100°C, 75°C e 50°C. Temperaturas menores não foram consideradas visto que o tempo de secagem aumentaria

significativamente e, para o presente trabalho, não há interesse em preservar os demais componentes das batatas. Para o secador de micro-ondas as temperaturas foram de 75°C e 50°C devido às limitações da própria unidade experimental.

As espessuras foram de 1,5 mm e 3,0 mm, sendo que a primeira foi adotada devido à disponibilidade de equipamento para realizar a o corte, e a segunda foi inferida de forma que o tempo do experimento não fosse muito prolongado, mas que fosse possível observar a interferência no resultado.

4.2 Unidades experimentais

A princípio, foi utilizada a Estufa com Circulação e Renovação de Ar SOLAB, modelo SL-102, localizada no Laboratório de Operações e Sistemas Térmicos da Universidade Federal de Lavras (UFLA), sobre a qual tem-se uma Balança Digital Marte, modelo AD500, como mostra a Figura 5.

Figura 5: Estufa com Circulação e Renovação de Ar modelo Ar SL-102.



Fonte: Do autor (2023)

A estufa conta com: um sistema de aquecimento, composto por uma resistência elétrica; sistema de ventilação, que injeta ar quente de forma uniforme no interior do equipamento; termostato para controle da temperatura; painel para determinação das configurações desejadas, como a temperatura de *set-point*.

Foi utilizado também o Secador de Micro-Ondas, mostrado na Figura 6, sendo um sistema composto por: uma Balança Digital Even (1), modelo BL-6200AS-BI, uma cavidade (2), um termopar (3), um magnetron (4), mostrado na Figura 7 (a), sistema elétrico (5), mostrado na Figura 7 (b), cabos de aterramento (6) e um *software* de controle LabView.

Na cavidade, são inseridas as amostras de material a ser seco, que recebem as ondas eletromagnéticas emitidas pelo magnetron, sendo este último alimentado pelo sistema elétrico. Há também um sistema de resfriamento tanto no magnetron quanto no sistema elétrico para evitar superaquecimento.

O primeiro passo para o funcionamento do sistema é a configuração do *software*, no qual são escolhidas as temperaturas de *set-point*, bem como o funcionamento manual ou automático do sistema elétrico. Com tudo configurado, o sistema elétrico liga, a temperatura começa a subir até ultrapassar o *set-point* e, posteriormente, o sistema elétrico desliga para o resfriamento.

Assim, o sistema liga/desliga (*on/off*) mantém a temperatura em torno da desejada durante todo o processo, por meio da manipulação da potência. O *software* retorna em forma de gráfico toda essa oscilação de temperatura durante o tempo, gerando também os dados de quanto tempo o sistema ficou ligado e desligado.

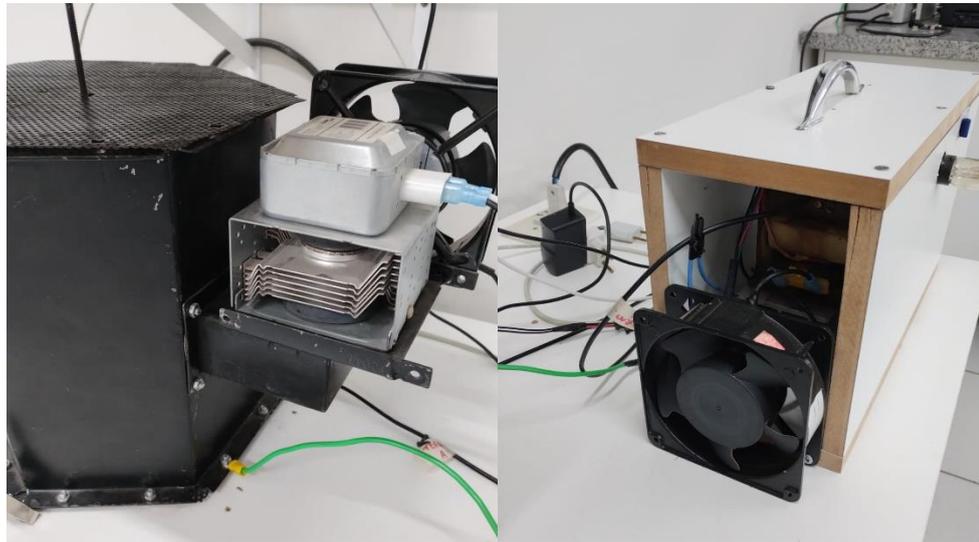
Figura 6: Sistema de Secagem de Micro-Ondas.



Legenda: Balança Digital Even (1), modelo BL-6200AS-BI, cavidade (2), termopar (3), magnetron (4), sistema elétrico (5), cabos de aterramento (6).

Fonte: Do autor (2023).

Figura 7: Componentes do Sistema de Secagem de Micro-Ondas; (a) Magnetron e (b) Sistema elétrico.



(a)

(b)

Fonte: Do autor (2023).

4.3 Teor de água inicial

As batatas foram caracterizadas de acordo com seu teor de água inicial por meio do Método 012/IV do Instituto Adolfo Lutz (IAL) (2005), que consiste na secagem em estufa de circulação por 24h a 105°C, sendo feita em duplicata para todas as condições, como mostra a Figura 8.

Figura 8: Amostras de batatas-doces para teor de água.



Fonte: Do autor (2023).

4.4 Secagem em Estufa

O procedimento de secagem em estufa iniciou-se com o corte das batatas no formato e espessura desejados. Para a espessura de 1,5 mm utilizou-se um mandolim como ferramenta de corte, enquanto para a espessura de 3 mm os cortes foram realizados com o auxílio de uma faca e um gabarito.

Após o corte, foi feita a pesagem das batatas em um cesto, como mostra a Figura 9, que foi inserido dentro da estufa e acoplado à balança digital, o qual mediu a perda de massa ao longo da secagem. Essa perda foi anotada nos tempos previamente determinados, sendo eles de 5 em 5 minutos nos primeiros 30 minutos, depois de 10 em 10 minutos até os 90 minutos de secagem e, após isso, de 30 em 30 minutos. O procedimento chega ao fim quando se atinge o equilíbrio, que é indicado pelo momento em que a variação de massa na balança é nula ou quase nula.

Figura 9: Batatas-doces após corte e pesagem.

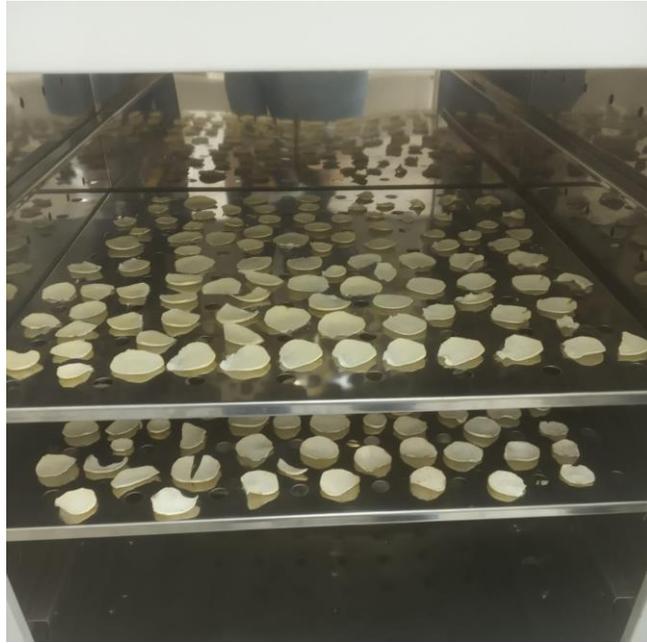


Fonte: Do autor (2023).

Com isso, foram calculados: umidade em base úmida, razão de umidade (RU) e taxa de secagem, de acordo com as Equações 1, 2 e 3, respectivamente. Assim, foram construídas as curvas de: variação de umidade por tempo, razão de umidade por tempo e variação da taxa de secagem por umidade.

Para a secagem de maiores quantidades de batata-doce que foram posteriormente utilizadas nas hidrólises, o corte foi feito nas mesmas espessuras, porém com formato arredondado, de acordo com cada batata, como mostra a Figura 10.

Figura 10: Secagem de batata-doce em estufa para moagem e hidrólise.



Fonte: Do autor (2023).

4.5 Secagem em Micro-ondas

Para a secagem em micro-ondas, o preparo das batatas-doces consistiu também no corte com arestas nas mesmas dimensões apresentadas anteriormente (2 cm). Como foi utilizada somente a espessura de 3 mm, o corte foi realizado com o auxílio de um gabarito nessa espessura.

Com as amostras cortadas, foi feita a pesagem em um cesto similar ao utilizado na secagem em estufa, sendo este posteriormente inserido dentro da cabine do sistema e acoplado à balança. A cavidade foi vedada com uma tampa fixada por parafusos, de forma que não houvesse a possibilidade de que as ondas eletromagnéticas atingissem o ambiente externo. Posteriormente, o *software* foi configurado com as condições desejadas e iniciou-se a secagem.

Os dados referentes às perdas de massa foram coletados nos mesmos tempos estabelecidos para a estufa e, assim, pôde-se calcular os parâmetros desejados para a construção das curvas de variação de umidade por tempo, razão de umidade por tempo e variação da taxa de secagem por umidade. Vale ressaltar que, para a leitura das massas, os equipamentos de

ventilação são desligados e o fio de aterramento é retirado da haste do cesto para não gerar interferência nos valores.

4.6 Pré-tratamento: moagem

Inicialmente, secou-se maiores quantidades de batata doce para cada condição testada na etapa de secagem, de forma que houvesse material suficiente para o experimento. As secagens foram feitas tomando como base o tempo que cada uma dessas condições levou para alcançar o equilíbrio.

O próximo passo foi a obtenção das farinhas por meio da moagem das batatas doces secas, que foi realizada em um Moinho de Facas Fortinox, tipo Willye, Star FT 50, mostrado na Figura 11, presente no Laboratório de Química da Plataforma de Energias Renováveis da UFLA.

Figura 11: Moinho de Facas Fortinox, tipo Willye, Star FT 50.



Fonte: Do autor (2023).

A batata-doce in natura foi triturada em liquidificador industrial, juntamente com água destilada, na proporção de 1:1,33 m/v, formando uma mistura pastosa.

4.7 Hidrólise enzimática das batatas-doces

Para a hidrólise, foi utilizado o procedimento experimental padronizado pelo Núcleo de Estudos em Plantas Oleaginosas, Óleos Vegetais, Gorduras e Biocombustíveis (G-Óleo) –

UFLA. Foram utilizados 50 g de farinha misturados com 150 mL de água destilada (proporção 1:3) em um balão volumétrico de fundo redondo. O processo de gelatinização foi feito colocando-se a mistura em banho maria a 65°C por 20 minutos, em um Banho Maria Fisatom, modelo 550, como mostra a Figura 12.

Figura 12: Banho Maria Fisatom, modelo 550.



Fonte: Do autor (2023).

Após a gelatinização, o mosto teve seu pH ajustado para um valor entre 7 e 8 com o auxílio de uma solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) 1M e, então, foram adicionados 0,05 mL da enzima α -amilase. Vale ressaltar que, de acordo com a ficha técnica da enzima utilizada, essa seria a faixa ótima de pH. O balão volumétrico foi acoplado a um evaporador rotativo, a temperatura do banho foi elevada para 90°C e a rotação foi colocada em 30 rpm, realizando-se a etapa de liquefação durante 60 minutos, como indicado na Figura 13.

Figura 13: Liquefação do mosto.

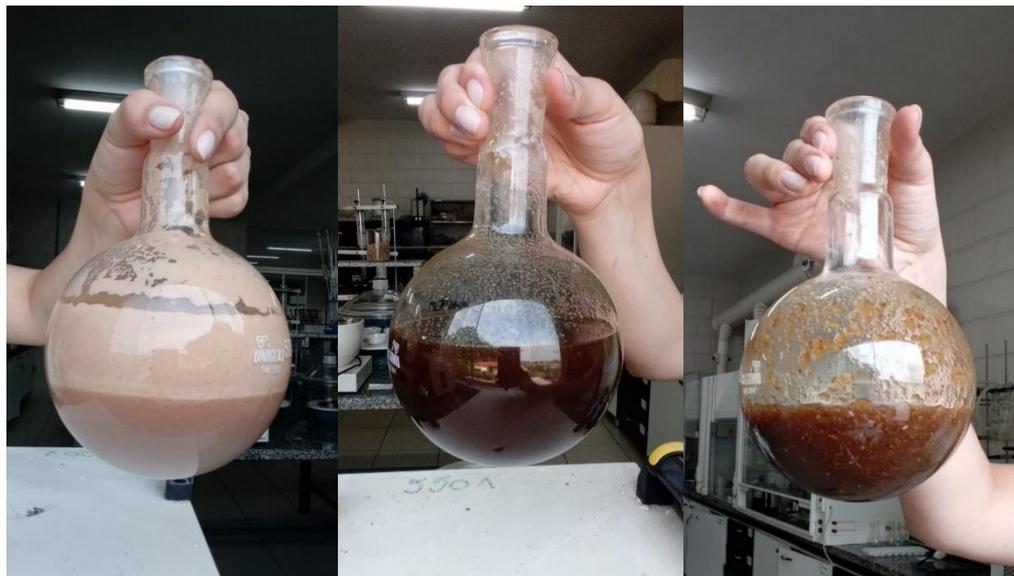


Fonte: Do autor (2023).

Decorridos os 60 minutos, o pH do mosto foi corrigido para aproximadamente 4,5 com uma solução de Ácido Clorídrico (HCl) 1M e, após resfriamento para 60°C, foi adicionada a enzima amilglucosidase. A temperatura do banho permaneceu em 60°C, com rotação de 30 rpm, durante 90 minutos, concluindo-se a etapa de sacarificação, obtendo-se, então, um mosto final.

Todo esse procedimento foi realizado para cada uma das condições de secagem e, ainda, para uma amostra da batata-doce *in natura*. Para este último caso, foi feito o cálculo das quantidades de forma que fossem utilizados os mesmos 50 g de massa seca, considerando-se o teor de água da batata-doce utilizada. A Figura 14, a seguir, mostra as etapas do processo de hidrólise da batata-doce *in natura*.

Figura 14: Etapas da hidrólise enzimática da batata-doce *in natura*; (a) gelatinização; (b) liquefação e (c) sacarificação.



(a)

(b)

(c)

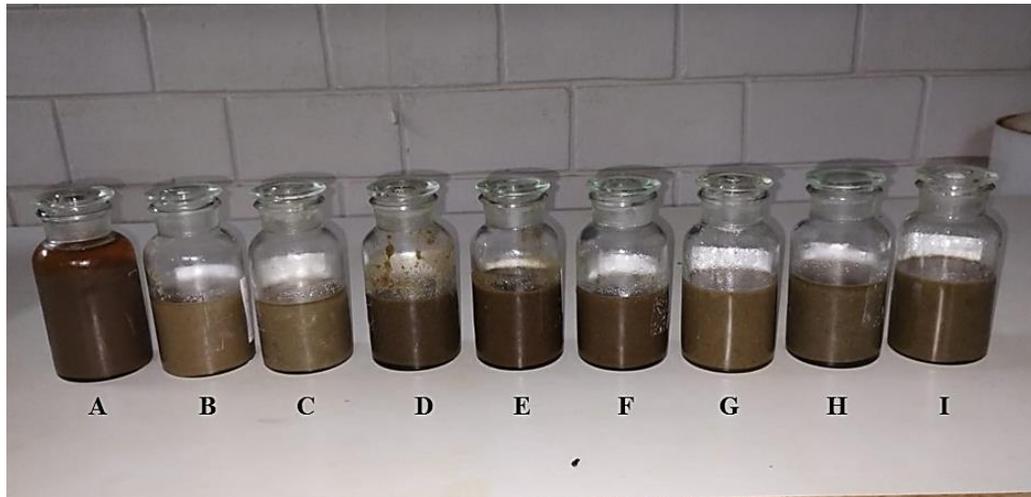
Fonte: Do autor (2023).

Ao final de todo o processo, foram obtidos 9 mostos, como mostra a Figura 15, na qual cada letra representa uma condição experimental, sendo:

- A: *In natura*;
- B: Estufa à 100°C e 1,5 mm;
- C: Estufa à 75°C e 1,5 mm;
- D: Estufa à 50°C e 1,5 mm;
- E: Estufa à 100°C e 3,0 mm;
- F: Estufa à 75°C e 3,0 mm;

- G: Estufa à 50°C e 3,0 mm;
- H: Micro-Ondas à 75°C e 3,0 mm;
- I: Micro-Ondas à 50°C e 3,0 mm;

Figura 15: Mostos finais de cada condição experimental.



Fonte: Do autor (2023).

4.8 Análise de Açúcares Redutores Totais (ART)

Para a análise de ART, foi utilizado o procedimento estabelecido pela EMBRAPA (2013). Primeiramente foi necessário o preparo de algumas soluções.

- Solução Padrão de Glicose 1 g/L: pesou-se 0,1000 g de dextrose (P.A.) em balança analítica que foram dissolvidos em 20mL de água destilada em agitação constante. Em seguida, o conteúdo foi transferido para um balão volumétrico de 100 mL e o volume foi completado com água destilada.
- Reagente DNS: Pesou-se 10,6 g de ácido 3,5 dinitrosalissílico e 19,8 g de NaOH, que foram dissolvidos em aproximadamente 1416 mL de água destilada. Em seguida, adicionou-se 7,6 mL de fenol (fundido à 50°C) e 8,3 g de metabissulfito de sódio e agitou-se a solução.
- Solução de tartarato duplo de sódio e potássio: pesou-se 15,1 g de tartarato duplo de sódio e potássio tetra hidratado ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) que foram dissolvidos em 1 litro de água destilada.
- Solução de NaOH 2N: Pesou-se 40 g de hidróxido de sódio anidro, que foram diluídos em água destilada, tendo seu volume posteriormente ajustado para 500 mL.
- Solução de HCl 2N: Mediu-se 85 mL de ácido clorídrico (HCl) em capela de ventilação, que foram diluídos em água destilada, tendo seu volume posteriormente ajustado para

500 mL.

O passo seguinte consistiu na construção da curva padrão de glicose, que iniciou com o preparo de diversas soluções de glicose em concentrações diferentes, utilizando a solução já preparada de 1 g/L, conforme mostra a Tabela 3, a seguir. Para as demais concentrações, as quantidades de dextrose foram pesadas separadamente e diluídas em balão volumétrico.

Tabela 3: Diluições da solução padrão de glicose 1 g/L.

Concentração de glicose (g/L)	Volume de solução padrão de glicose (mL)	Volume de água destilada (mL)
0,20	2,00	8,00
0,40	4,00	6,00
0,60	6,00	4,00
0,80	8,00	2,00
1,00	10,00	0,00

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2003).

Para obter a curva, realizou-se, para cada concentração, o teste DNS que consiste no seguinte procedimento:

- i. Adicionou-se 1,0 mL da solução de glicose e 1,0 mL do reagente DNS em um tubo de ensaio e a mistura foi agitada para homogeneização;
- ii. Fez-se o aquecimento em banho maria à 100°C por 5 minutos;
- iii. Depois, foi feito o resfriamento em banho de gelo por 5 minutos;
- iv. Adicionou-se 16 mL da solução de tartarato duplo de sódio e potássio;
- v. Fez-se a leitura da absorbância em espectrofotômetro a 540 nm.

Vale ressaltar que, antes de utilizar a solução padrão de glicose, esse procedimento foi realizado somente com água destilada, de forma a obter o branco. Então, foi construída uma curva de concentração de glicose (g/L) no eixo Y e absorbância no eixo X, obtendo-se a equação da reta por meio de regressão linear.

Para realizar a leitura da amostra de hidrolisado, foi feito um preparo como descrito a seguir:

- i. A amostra foi diluída com água destilada de forma que a absorbância ficasse entre 0,1 e 1 g/L;
- ii. Após diluição, foi feita a centrifugação a 15.000 rpm por 15 min;
- iii. Retirou-se 2,0 mL de sobrenadante do hidrolisado;
- iv. Adicionou-se 2,0 mL de HCl 2N;

- v. Realizou-se o aquecimento em banho maria à 100°C por 10 minutos;
- vi. Realizou-se o resfriamento em banho de gelo;
- vii. Adicionou-se 2,0 mL de NaOH 2N e agitou-se a solução;
- viii. Retirou-se 1,0 mL do sobrenadante para o teste de DNS.

As Figuras 16 e 17, a seguir, mostram, respectivamente, a centrífuga e o espectrofotômetro utilizados. As soluções do teste DNS de cada condição experimental estão mostradas na Figura 18. Então, para cada absorbância lida, obteve-se, por meio da equação da curva padrão, a concentração de açúcares redutores.

Figura 16: Centrífuga Jouan C3i Multifunction.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 17: Espectrofotômetro Bioespectro SP22.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 18: Testes de DNS nas amostras de hidrólise.



Fonte: Do autor (2023).

4.9 Análise de gasto energético

O aquecimento da estufa utilizada se dá por meio de 3 fases distintas, sendo elas: *start-up*, na qual a resistência fica ligada em tempo integral; estabilização, na qual a resistência fica ligada por 1 segundo e desligada por 1 segundo (50% do tempo ligada); e a fase do ensaio experimental, na qual a resistência fica ligada por 0,5 segundos e desligada por 1,5 segundos (25% do tempo ligada).

Foi realizado um experimento para calcular a potência de cada fase do aquecimento da estufa, para o qual foram medidos os dados de corrente elétrica e diferença de potencial, utilizando-os na Equação 20. Com o tempo total do experimento e a massa de material utilizada, foi possível obter a energia específica total, conforme Equação 21.

Já para a secagem em micro-ondas, tem-se uma potência constante de 1,5 kW, de forma que apenas necessita-se do tempo de experimento e da massa inicial de material. Porém, o tempo de experimento é considerado como aquele no qual o magnetron ficou ligado e, com o auxílio do software LabView, é possível obter esse tempo de funcionamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão abordados os resultados obtidos para cada condição de secagem experimental, incluindo as curvas de cinética de secagem, taxa de secagem e razões de umidade. Ainda, serão comparados os resultados experimentais com aqueles obtidos por meio de ajustes aos modelos da literatura. Por fim, serão mostrados os rendimentos de cada hidrólise realizada a partir de cada uma das condições de secagem.

5.1 Teor de água

Para cada lote de batatas utilizado em todas as secagens foi realizado o experimento de teor de água, sendo calculada a umidade inicial por meio da Equação 1. Os resultados de teor de água obtidos para cada condição de secagem estão expostos na Tabela 4, a seguir, assim como o teor de água inicial médio em base úmida e seu desvio padrão:

Tabela 4: Teor de água inicial médio (base úmida).

Secador	Temperatura [°C]	Espessura [mm]	
		1,5	3,0
		Teor de água [%]	
Estufa	50	71,88	74,59
	75	81,47	72,81
	100	72,64	76,09
Micro-Ondas	50	-	67,28
	75	-	67,28
Teor de água inicial médio [%]		73,01	
Desvio Médio		3,28	

Fonte: Do autor (2023).

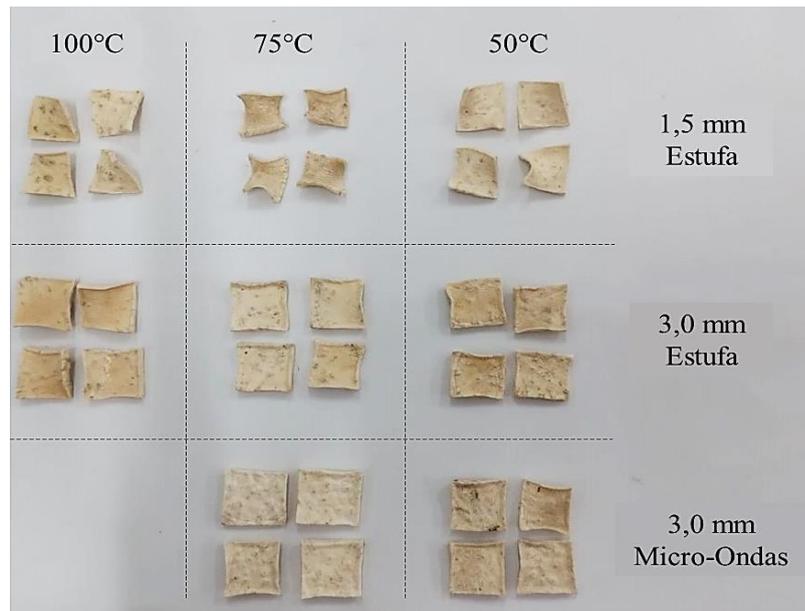
O valor alto de desvio médio pode ser justificado pelo fato de que foram utilizados diferentes lotes de batata-doce e, mesmo que tenham sido todos adquiridos do mesmo estabelecimento, pode haver variação nas suas características.

Risso (2004) encontrou um teor de água inicial médio de 64,8%. Nos estudos de Souza et al., (2019) encontrou-se um teor de água de 67,33% para a variedade de batata-doce Brazlândia roxa. Já para a caracterização feita por Taborda (2014), a umidade inicial foi de 61,73% para o cultivar rosa-maçã.

5.2 Cinética de secagem

As batatas-doces secas em cada uma das condições experimentais estão dispostas na Figura 19, a seguir:

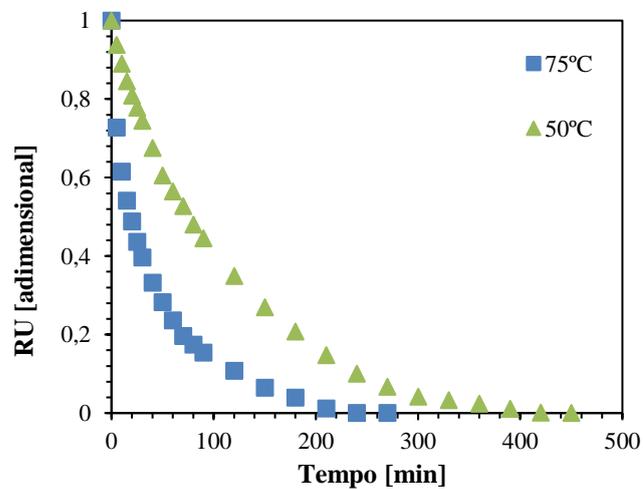
Figura 19: Comparação das batatas-doces secas em cada condição experimental.



Fonte: Do autor (2023).

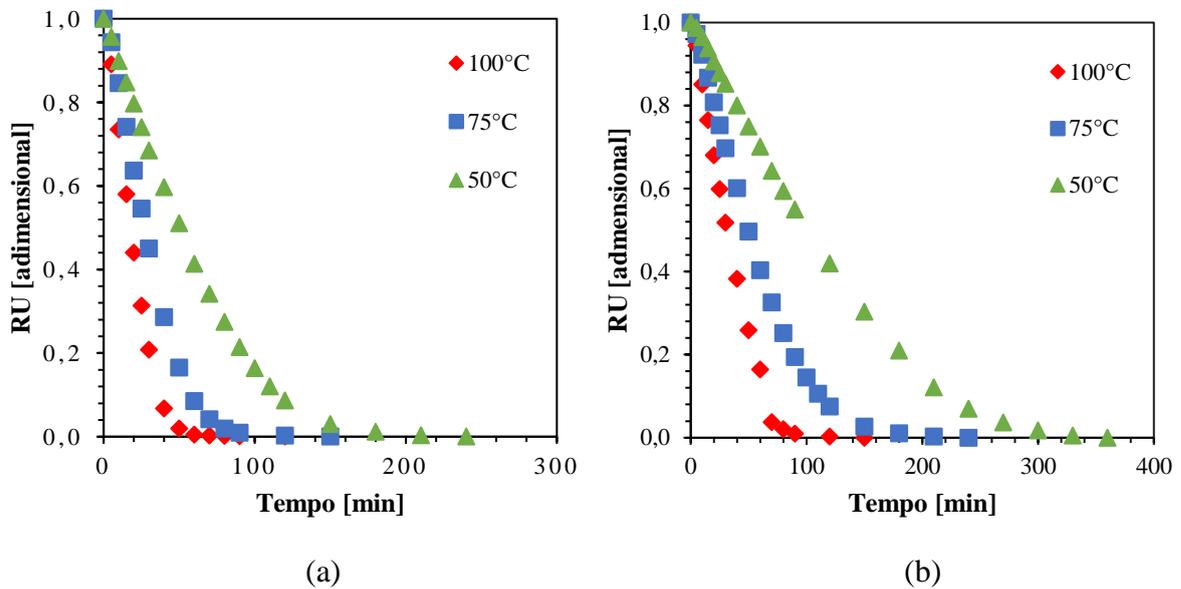
Para analisar as cinéticas das secagens de cada uma das condições experimentais, foram construídos diversos gráficos comparativos das razões de umidade, fixando um ou mais parâmetros por vez. Nas Figuras 20 e 21 o parâmetro variável foi a temperatura.

Figura 20: Cinética de secagem – secador Micro-Ondas e 3,0 mm de espessura.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 21: Cinética de secagem – secador Estufa; a) 1,5 mm de espessura e b) 3,0 mm de espessura.



Fonte: Do autor (2023).

Percebe-se que, em ambos os casos, o perfil das curvas de RU por tempo seguiu a tendência esperada, para a qual tem-se uma queda mais brusca de umidade no início da secagem, sendo que, ao longo do tempo, a curva tende a ter sua inclinação suavizada, até o momento em que fique constante. Rodrigues *et al.* (2021) obteve resultados similares na secagem de batata-doce em um secador solar, tendo uma velocidade de secagem mais expressiva nas primeiras duas horas do processo. De acordo com Souza *et al.* (2020) essa tendência é explicada devido à maior facilidade de remoção da água superficial presente no alimento em relação às moléculas de água mais internas.

Torna-se bastante evidente, também, que as secagens realizadas em temperaturas mais altas acontecem de forma mais rápida, alcançando-se o equilíbrio em menos tempo, como mostra a Tabela 5. Esse resultado condiz com os encontrados na literatura, como mostrado no trabalho de Viana *et al.* (2019), no qual o tempo necessário para atingir o equilíbrio pela secagem em estufa convectiva à 70°C foi de 1h, ao passo que para a temperatura de 60°C esse tempo foi de 1h30min. O autor ressalta que o aumento da temperatura diminui a interação entre as moléculas polares da batata-doce com a água, fazendo que a resistência interna à saída de umidade seja diminuída.

Tabela 5: Tempos de equilíbrio para cada condição de secagem.

Secador	Temperatura [°C]	Espessura [mm]	
		1,5	3
		Tempo [min]	
Estufa	50	180	330
	75	90	180
	100	60	90
Micro-Ondas	50	-	390
	75	-	240

Fonte: Do autor (2023).

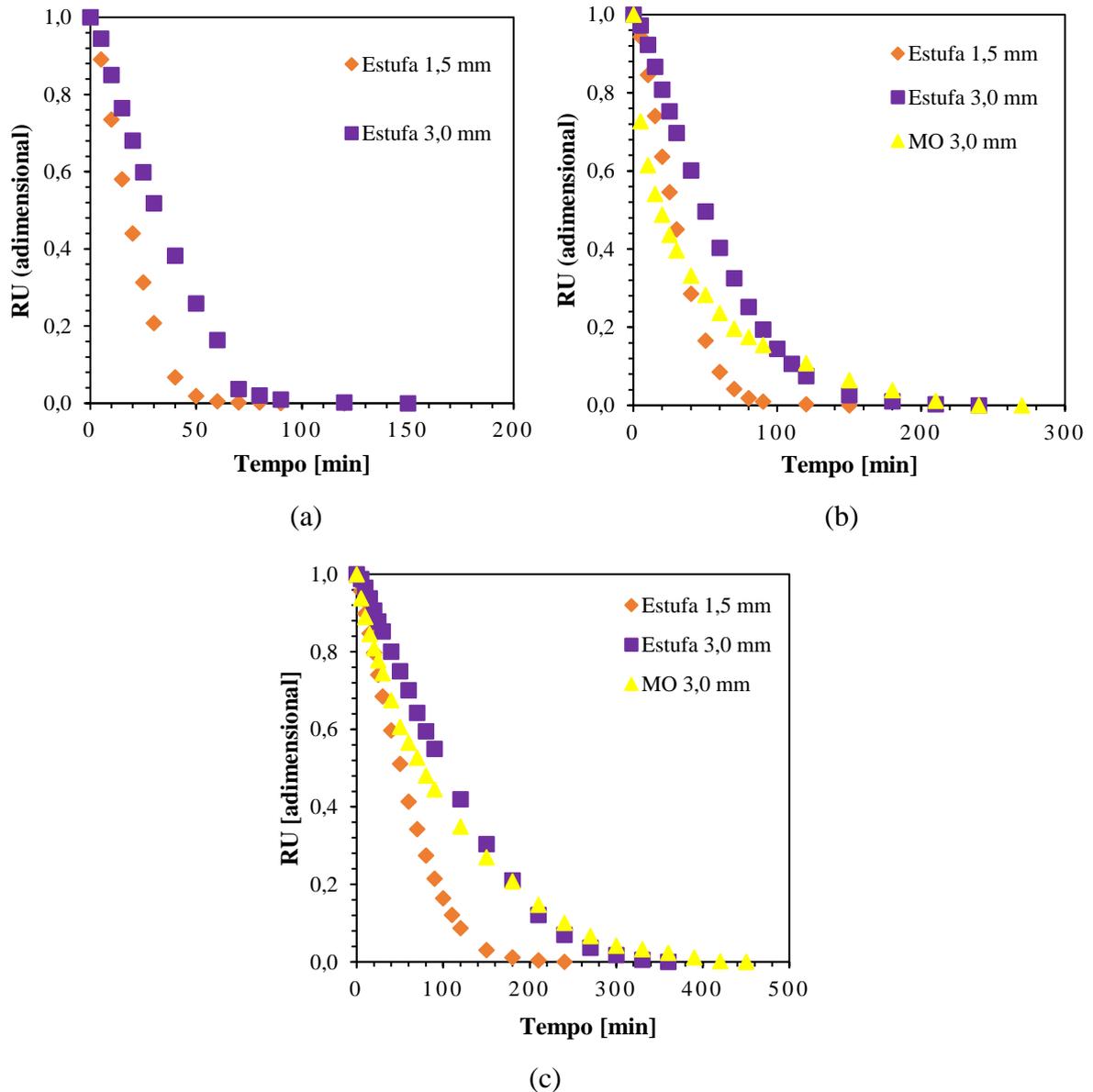
Observa-se também, de acordo com a Tabela 5, que a secagem por micro-ondas nas mesmas condições da secagem por estufa leva maiores tempos para atingir o equilíbrio. Esse fato pode ser explicado devido à perda gradual da eficiência de secagem no micro-ondas de acordo com o tempo, visto que seu aquecimento se dá pela vibração das moléculas de água (ou outras moléculas polares, que no caso a batata-doce não existem em quantidades significativas) que se tornam cada vez mais escassas.

Com isso, pode-se dizer que a secagem em estufa torna-se melhor do que aquela com micro-ondas à medida que o conteúdo de água diminui. Para amenizar essa perda de eficiência, uma alternativa é utilizar um sistema de secagem híbrido, iniciando-se o processo com o micro-ondas e terminando-o com a estufa, a partir do momento em que a taxa de secagem passa a apresentar valores muito baixos.

Além do que foi citado, um fator que pode ter contribuído para esse resultado é o mecanismo *on/off* do secador micro-ondas, que pode ocasionar grande variação de temperatura durante o processo de secagem, permitindo certo resfriamento das amostras. Além disso, pode ter havido imprecisão nos cortes das amostras, de forma que a espessura média para a secagem em micro-ondas tenha ficado maior. Outro parâmetro que também influencia no tempo de secagem é a umidade do ar e, visto que as secagens foram realizadas em dias diferentes, presume-se que o dia era menos úmido na secagem em estufa, necessitando de menos tempo para atingir o equilíbrio.

Para a próxima análise, a temperatura foi o parâmetro fixado, variando-se então as espessuras e o tipo de secador, conforme exposto na Figura 22.

Figura 22: Cinética de secagem para uma dada temperatura; (a) 100°C; (b) 75°C e (c) 50°C.



Fonte: Do autor (2023).

Ao analisar os gráficos da Figura 22, nota-se a influência da espessura na cinética de secagem, sendo que, quanto mais espesso for o material, mais tempo irá demorar para que o equilíbrio seja alcançado. Esse fato é também esperado, já que a água presente no interior da batata-doce deve migrar para a sua superfície por meio do mecanismo de difusão, de forma que quanto maior a espessura, maior será o caminho dessa migração, demorando mais tempo para que esse conteúdo de umidade esteja disponível na superfície para o fenômeno de transferência de massa que ocorre com o ar externo (BORGES, *et al.*, 2008).

No estudo realizado por Silva *et al.* (2023), a espessura utilizada para a secagem de batata-doce em secador convectivo de bandejas foi de 1 mm e, para a secagem a 60°C o tempo

de equilíbrio foi de aproximadamente 180 minutos. Já para a secagem na temperatura de 70°C e espessura de 5 mm, também em secador convectivo com ar quente, realizada no trabalho de Gasa *et al.* (2022), esse tempo foi de 285 minutos, constatando a relação diretamente proporcional entre o tempo de equilíbrio e a espessura do material.

Além disso, observa-se que, para uma mesma temperatura e espessura, a cinética é bastante similar nos diferentes secadores, seguindo a mesma tendência durante o processo. Isso ressalta que o tipo de secador não foi um fator tão significativo quando se trata da cinética de secagem (exceto pelo tempo de equilíbrio), principalmente em comparação aos demais parâmetros, temperatura e espessura.

O aumento do tempo de equilíbrio é muito mais expressivo quando se muda a temperatura ou a espessura. Para a temperatura de 50°C, houve um aumento de 83,33% no tempo de equilíbrio referente à mudança de espessura de 1,5 para 3,0 mm, enquanto variando-se o tipo de secador esse aumento foi de apenas 18,18%. Fixando-se a espessura, uma maior temperatura para a secagem em micro-ondas ocasionou o aumento do tempo de secagem em 62,5%, ao passo que para a estufa essa porcentagem foi de 83,33% considerando também as temperaturas de 50°C e 75°C.

5.3 Ajuste dos Modelos Cinéticos

As regressões não-lineares para os ajustes dos modelos cinéticos foram realizadas com o auxílio do software STATISTICA AGA 7, no qual são inseridos os dados experimentais e as equações dos modelos de interesse. Viana *et al.* (2019) ajustou os dados experimentais de secagem de batata-doce aos modelos de Page, Midilli e Henderson & Pabis. Silva *et al.* (2023) realizou os ajustes para os três modelos citados, além de acrescentar o modelo de Newton, para a secagem convectiva a 60°C. Na Tabela 6, a seguir, estão dispostos os valores dos parâmetros encontrados para cada modelo selecionado.

Tabela 6: Parâmetros dos modelos cinéticos ajustados para as secagens de batata-doce (continua).

Modelo	Exp.	ko	Ea/R [K]	n	a	b	c	R ²
Newton	1	0,1249	105,2708	-	-	-	-	0,9461
	2	0,0800	-118,1590	-	-	-	-	0,9708
	3	0,2990	-173,0976	-	-	-	-	0,9785
Page	1	0,0503	147,5053	1,4221	-	-	-	0,9972
	2	0,0280	-161,424	1,4030	-	-	-	0,9966
	3	0,3636	146,2753	0,8415	-	-	-	0,9868

Tabela 7: Parâmetros dos modelos cinéticos ajustados para as secagens de batata-doce (conclusão).

Modelo	Exp.	ko	Ea/R [K]	n	a	b	c	R ²
Page Modificado	1	0,1221	103,7238	1,4221	-	-	-	0,9974
	2	0,0775	115,0425	1,4032	-	-	-	0,9966
	3	0,3005	173,8190	0,8415	-	-	-	0,9868
Henderson & Pabis	1	0,1332	103,6031	-	1,0840	-	-	0,9809
	2	0,0854	115,9688	-	1,0838	-	-	0,9807
	3	0,2715	172,6817	-	0,9425	-	-	0,9833
Logarítmico	1	0,1142	103,0281	-	1,1361	-	0,0685	0,9868
	2	0,0679	115,6459	-	1,1747	-	0,1136	0,9888
	3	0,2970	174,4211	-	0,9308	-	0,0192	0,9841
Midilli	1	0,0458	152,1828	1,4596	0,9843	0,0000	-	0,9976
	2	0,0269	165,7709	1,4144	0,9875	-0,0001	-	0,9970
	3	0,4527	137,6426	0,7421	1,0166	-0,0002	-	0,9900

Fonte: Do autor (2023).

sendo que: Exp. 1 é a secagem na estufa com espessura de 1,5 mm; Exp. 2 é a secagem na estufa com espessura de 3,0 mm e Exp. 3 é a secagem no micro-ondas com espessura de 3,0 mm; ko , n , a , b e c são parâmetros dos modelos cinéticos; EaR é a energia de ativação multiplicada pela constante dos gases.

A partir dos valores de R^2 obtidos, é possível notar que o único modelo que apresentou R^2 acima de 0,99 para as três condições experimentais foi o de Midilli, sendo o que melhor representou os dados experimentais. Ressalta-se, ainda, que esse modelo teve melhor ajuste para a condição experimental 1, com $R^2=0,9976$ e um valor médio de $R^2=0,9949$.

O segundo modelo que melhor representou os dados foi o de Page Modificado, apresentando uma mínima diferença de 0,02% no valor de R^2 comparado ao modelo de Page apenas no Exp. 1. Como essa diferença não é significativa, pode-se dizer que ambos consistem em ajustes similares. Em seu trabalho, Silva *et al.* (2023) obteve o melhor ajuste com o modelo de Page, com $R^2 = 1,0000$, seguido pelo modelo de Midilli, que apresentou um R^2 de 0,9999. Viana *et al.* (2019) também encontrou melhores resultados com os ajustes feitos pelos modelos de Midilli e Page, sendo que todos apresentaram R^2 maior que 0,99.

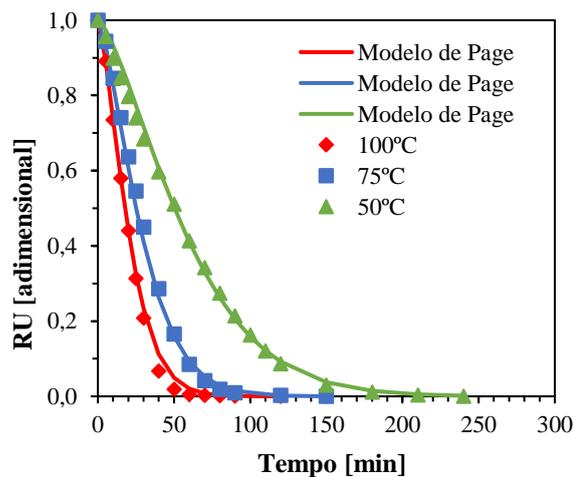
Comparando-se os dois modelos com melhores resultados, é importante ressaltar que o modelo de Page consiste em um ajuste mais simples de ser feito, já que sua equação possui apenas dois parâmetros. Já o de Midilli possui quatro parâmetros, tornando-o mais complexo e trabalhoso, de forma que, a depender da diferença entre os valores de R^2 obtidos, é preferível utilizar o modelo mais simples. No caso atual, como a diferença de ajuste entre os dois modelos

citados é muito pequena, entende-se que o melhor modelo a ser utilizado é o de Page.

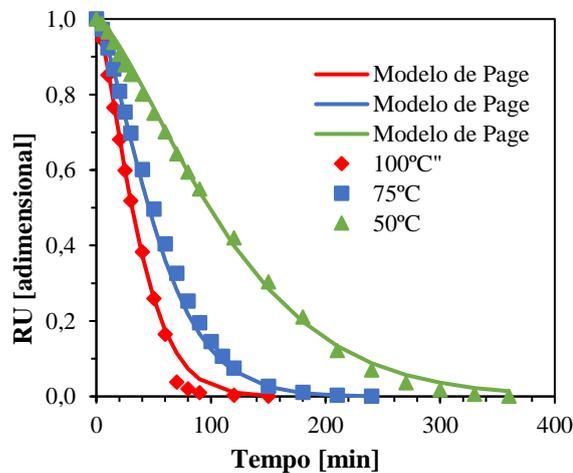
Os demais modelos utilizados não atingiram valores maiores ou iguais a 0,99 para R^2 , tornando-os menos representativos. Dentre eles, o que apresentou os menores valores para R^2 foi o de Newton, estando abaixo de 0,98 para todas as condições experimentais. Isso condiz com os resultados obtidos por Silva *et al.* (2023), o qual constatou que, apesar de todos os modelos apresentarem valores acima de 0,99, o modelo de Newton foi o menos representativo. Os modelos Logarítmico e de Henderson & Pabis apresentaram ajustes intermediários aos demais com valores de R^2 maiores que 0,98 e menores que 0,99, tornando-os ajustes ainda satisfatórios.

Na Figura 23, é possível perceber visualmente que o modelo de Page representou bem os dados experimentais em ambas as condições experimentais.

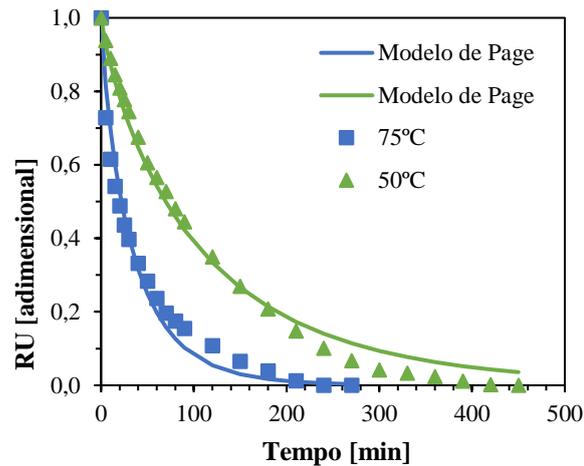
Figura 23: Ajuste do modelo de Page para as cinéticas de secagem; (a) Secagem em estufa e 1,5 mm; (b) Secagem em estufa e 3,0 mm e (c) Secagem em Micro-Ondas e 3,0 mm.



(a)



(b)



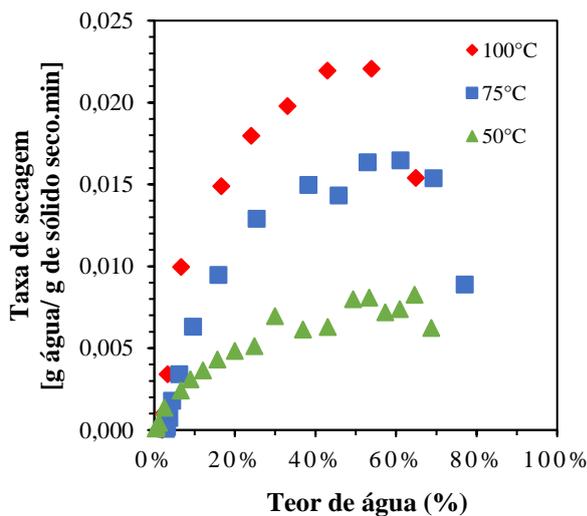
(c)

Fonte: Do autor (2023).

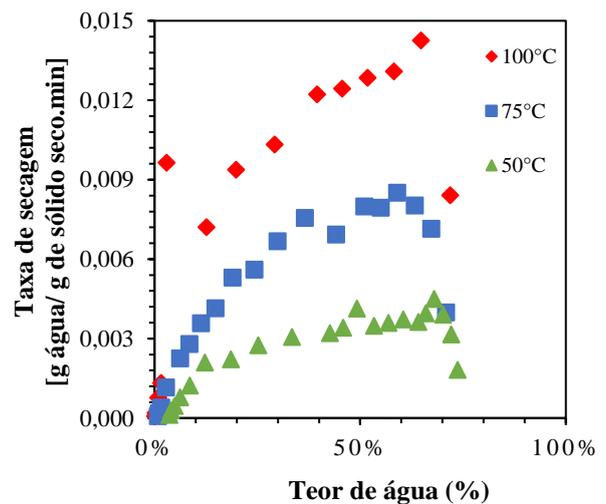
5.4 Taxa de Secagem

Os gráficos das taxas de secagem de cada condição experimental estão mostrados na Figura 24, a seguir. Analisando-os, é possível observar que, quanto maior a temperatura, maiores são os valores das taxas de secagem. Esse resultado é condizente, visto que o aumento da temperatura intensifica os fenômenos de transferência de calor e massa, de forma que o conteúdo de umidade seja perdido com uma velocidade maior.

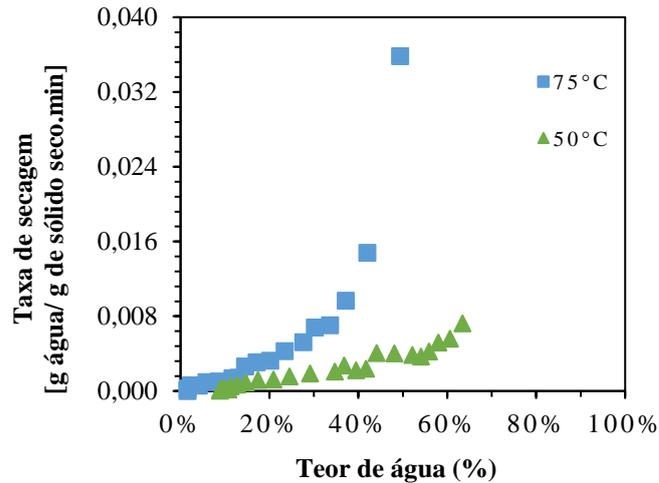
Figura 24: Taxa de secagem; (a) estufa 1,5 mm; (b) estufa 3,0 mm e (c) micro-ondas 3,0 mm



(a)



(b)



(c)

O aumento da espessura da batata-doce ocasionou a diminuição dos valores gerais das taxas de secagem, fato que está de acordo com o aumento do tempo de secagem em função da espessura observado na Figura 18, visto que a taxa leva em consideração esse tempo.

Na Figura 19 (a), é possível notar que, em todas as temperaturas, há um período de taxa crescente no início da secagem, que consiste no período de indução, como mostrado por Park *et al.* (2002). Além disso, apesar da pequena flutuação dos dados, é possível observar uma tendência constante após esse crescimento da taxa, seguido de um período decrescente, exatamente como é mostrado na literatura.

Os três períodos de secagem também são facilmente identificados na Figura 19 (b), seguindo a tendência crescente, constante e depois decrescente. Porém, isso não ocorre na secagem em micro-ondas, evidenciada pela Figura 19 (c), na qual as taxas de secagem seguem apenas uma tendência decrescente ao longo de todo o processo.

Essa divergência se explica pela diferença entre os mecanismos de aquecimento da estufa e do micro-ondas, sendo que no primeiro equipamento, a batata-doce é aquecida de fora para dentro, de forma que o calor trocado no primeiro momento é utilizado majoritariamente para aquecer o material, levando um tempo para que se inicie o processo de evaporação (PARK *et al.*, 2002).

Já as micro-ondas promovem o aquecimento uniforme da batata-doce, pois atinge todas as moléculas de água nela presentes, concomitantemente, gerando sua excitação e consequente aumento da temperatura. Isso também explica o fato de que, para o micro-ondas, os valores iniciais de taxa de secagem são significativamente mais elevados quando comparados com os da secagem em estufa nas mesmas condições.

5.5 Análise de Açúcares Redutores Totais (ART)

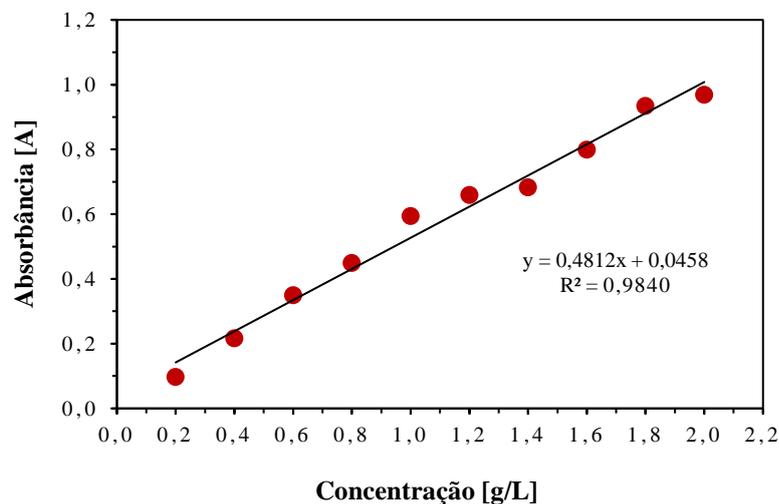
O primeiro passo para a realização da análise é a construção da curva padrão de glicose por meio da leitura das absorvâncias de cada solução feita. A Tabela 8 mostra os valores obtidos, com os quais foi construída a curva apresentada na Figura 25.

Tabela 8: Absorbâncias das soluções de glicose.

C [g/L]	ABS [A]
0,2	0,097
0,4	0,217
0,6	0,350
0,8	0,449
1,0	0,594
1,2	0,659
1,4	0,683
1,6	0,799
1,8	0,934
2,0	0,969

Fonte: Do autor (2023).

Figura 25: Curva padrão de glicose.



Fonte: Do autor (2023).

A curva apresentou um $R^2=0,9840$, o que consiste em um ajuste satisfatório para os dados experimentais. Os valores de absorvância ficaram entre 0,097 A e 0,969 A, de forma que a diluição realizada para cada hidrólise deve resultar em valores dentro desse intervalo.

A primeira diluição das hidrólises referentes à cada condição experimental foi feita sendo utilizados 5 mL de hidrolisado e o volume completado em balão volumétrico de 250 mL,

como mostra a Figura 26.

Figura 26: Diluições das hidrólises referentes às condições experimentais A, E, F, G, H, I.



Fonte: Do autor (2023).

Porém, essa diluição não foi suficiente para manter as concentrações dentro dos valores desejados, sendo adicionados mais 5 mL de água destilada em cada solução, tornando-as diluídas em 51 vezes. Com isso, obteve-se as absorbâncias apresentadas na Tabela 8, a seguir. A condição experimental B não foi analisada devido ao seu elevado tempo de geladeira, já que foi a primeira hidrólise a ser realizada, de forma que poderia comprometer a veracidade dos resultados.

Tabela 9: Absorbâncias e concentrações de açúcares redutores para cada condição experimental.

Condição Exp.	ABS [A]	C [g/L]
A	0,305	31,179
C	0,445	52,020
D	0,469	54,570
E	0,578	66,096
F	0,549	63,036
G	0,691	78,081
H	0,582	66,555
I	0,493	57,120

Legenda: A - *In natura*; C - Estufa, 75°C, 1,5 mm; D - Estufa, 50°C, 1,5 mm; E - Estufa, 100°C, 3,0 mm; F - Estufa, 75°C, 3,0 mm; G - Estufa, 50°C, 3,0 mm; H - Micro-ondas, 75°C, 3,0 mm; I - Micro-Ondas, 50°C, 3,0 mm.

Fonte: Do autor (2023).

Em uma primeira análise, já é possível observar que a condição experimental A (batata-doce *in natura*) apresentou a menor concentração de açúcares redutores, sendo de 31,179 g/L,

a qual é 28,6% menor do que a menor concentração obtida por meio da farinha. Esse resultado evidencia o fato de que hidrólises realizadas com batatas-doces que passaram por um processo de secagem, independente de qual seja, apresentam rendimentos melhores. A secagem provoca a ruptura das pontes de hidrogênio nas cadeias de amilose e amilopectina (RISSO, 2014).

Vale ressaltar, porém, que a moagem feita em liquidificador industrial não proporciona a mesma granulometria do que aquela realizada no moinho de facas, deixando partículas maiores e, conseqüentemente, diminuindo a área superficial disponível, o que também pode ter contribuído para a baixa concentração.

Em seu estudo, Risso (2014) também obteve a mesma conclusão, independentemente do método de secagem utilizado. O resultado de Schweinberger (2016), porém, não foi o mesmo, de forma que a batata-doce *in natura* apresentou teores maiores de açúcares redutores, fato que foi atribuído à aglomeração da farinha no processo de hidrólise, mesmo com alta rotação, dificultando sua dissolução.

As hidrólises realizadas com batatas-doces secas com 3,0 mm de espessura resultaram em concentrações maiores de açúcares redutores do que aquelas secas com 1,5 mm, mostrando que uma espessura muito pequena na secagem pode interferir negativamente. Uma explicação para tal fato é que, quanto menos espesso é o material, maior a facilidade de troca de calor em seu interior, de forma que a alta temperatura pode ocasionar a degradação das moléculas e diminuir a disponibilidade de sítios ativos para a atuação das enzimas na hidrólise.

Nas condições experimentais C e D (estufa com 1,5 mm) as quantidades de açúcares obtidas foram muito próximas, porém com valor menor para a secagem a 75°C, que consiste na condição C. Se forem analisadas as demais secagens em estufa, a temperatura de 75°C também apresentou menores concentrações de açúcares redutores se comparada tanto à secagem a 50°C quanto àquela feita a 100°C.

Observa-se, então, que não há uma tendência concreta de aumento da concentração de açúcares com a diminuição da temperatura, portanto cada temperatura deve ser analisada separadamente. É necessário considerar possíveis erros experimentais em relação ao processo de hidrólise, já que parâmetros como pH e temperatura são medidos de maneira visual por meio da fita medidora de pH e pelo botão de controle do banho termostático, respectivamente, como mostra a Figura 27.

Figura 27: Fita medidora de pH e controle de temperatura do banho termostático.



Fonte: Do autor (2023).

Risso (2014) analisou estrutura do amido nas diferentes condições de secagem por meio de microscopia eletrônica de varredura, notando que, nas secagens realizadas à 60°C, os grânulos de amido estavam dispostos em grumos. Além disso, por meio da análise de difração de raios X, o autor notou que essa condição apresentou diminuição das áreas amorfas do amido, atribuindo o fato à movimentação das cadeias de dupla hélice no interior das áreas cristalinas, tornando-as mais ordenadas. As menores quantidades de açúcares redutores nas secagens em estufa com temperatura de 75°C podem ser explicadas por essa diminuição de regiões amorfas e formação de grumos.

Em contrapartida, na secagem em micro-ondas, a concentração de açúcares redutores foi maior na condição experimental H, que representa a secagem feita à 75°C. Atrelada à divergência nos mecanismos de secagem dos secadores, o que pode ter contribuído para esse resultado é a grande diferença nos valores das taxas de secagem em relação à secagem na temperatura de 50°C. O experimento H atinge uma taxa de $0,0358 \text{ min}^{-1}$, ao passo que o experimento I atinge uma taxa de $0,0072 \text{ min}^{-1}$, representando apenas 20% da primeira. Essa diferença é significativamente maior do que as observadas nas secagens em estufa, podendo ter sido suficiente para surtir o efeito de quebrar os grânulos de amido, como ocorreu na secagem em micro-ondas realizada por Risso (2014).

Comparando-se, em termos gerais, a secagem em micro-ondas e estufa, aquela que resultou em maior concentração final de açúcares redutores foi a realizada em estufa, com temperatura de 50°C e espessura de 3,0 mm. Por outro lado, no trabalho de Risso (2014), o melhor secador em termos de rendimento de açúcar foi o micro-ondas. Porém, o equipamento utilizado na secagem desse autor foi um micro-ondas comercial que funciona com potência constante, podendo atingir temperaturas de 100°C, sendo muito diferente do utilizado no presente trabalho. Neste último, o mecanismo *on/off* do micro-ondas permite que a temperatura seja controlada, o que não ocorre no micro-ondas convencional, de forma que o material não

atinge temperaturas diferentes daquelas utilizadas na estufa.

Um fator importante, que pode ser uma fonte potencial de erros, é a dificuldade de padronização das espessuras das batatas-doces utilizadas, já que o corte foi feito manualmente e, como visto, espessuras maiores resultam em concentrações maiores de açúcares redutores. Além disso, as batatas-doces utilizadas para as hidrólises foram secas separadamente daquelas secas para a construção da curva de cinética e, ainda, possuíam formato arredondado e maior, como foi mostrado na Figura 10.

5.6 Análise Energética

Para fazer a comparação entre os gastos dos equipamentos, foi tomada como base as secagens à 75°C e 50°C com 3,0 mm. Foram considerados os tempos de equilíbrio obtidos para cada condição experimental. Com isso, obteve-se os resultados mostrados nas Tabelas 10, 11, 12 e 13, a seguir.

Tabela 10: Análise energética da secagem em estufa à 75°C e 3,0 mm.

Etapa	t.i. [min]	t.f. [min]	i [A]	U [V]	P [kW]	Gasto [kWh]
<i>Start-up</i>	0	12	10	225	2,25	0,450
Estabilização	12	50	9,6	225	1,08	0,684
Ensaio	50	230	8	225	0,45	1,350
Massa de inicial de material [kg]						0,02866
Energia Específica Total [KWh/kg]						86,6713

Legenda: t.i.: tempo inicial; t.f.: tempo final; i: corrente elétrica; U: diferença de potencial; P: potência elétrica.

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 11: Análise energética da secagem em estufa à 50°C e 3,0 mm

Etapa	t.i. [min]	t.f. [min]	i [A]	U [V]	P [kW]	Gasto [kWh]
<i>Start-up</i>	0	12	10	225	2,25	0,450
Estabilização	12	50	9,6	225	1,08	0,684
Ensaio	50	380	8	225	0,45	2,475
Massa de inicial de material [kg]						0,02989
Energia Específica Total [KWh/kg]						120,7427

Legenda: t.i.: tempo inicial; t.f.: tempo final; i: corrente elétrica; U: diferença de potencial; P: potência elétrica.

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 12: Análise energética da secagem em micro-ondas à 75°C e 3,0 mm.

t.on [h]	P [kW]	Gasto [kWh]	M [kg]	Energia Específica Total [kWh/kg]
2,9072	1,5	4,3608	0,05382	81,0256

Legenda: t.on: tempo de funcionamento; P: potência elétrica; M: massa inicial de material.

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 13: Análise energética da secagem em micro-ondas à 50°C e 3,0 mm.

t.on [h]	P [kW]	Gasto [kWh]	M [kg]	Energia Específica Total [kWh/kg]
5,6047	1,5	8,4071	0,05496	152,9667

Legenda: t.on: tempo de funcionamento; P: potência elétrica; M: massa inicial de material.

Fonte: Do autor (2023).

Analisando os resultados obtidos, foi possível perceber que, para a temperatura de 75°C, o gasto energético foi maior na secagem em estufa, ao passo que, para a temperatura de 50°C o maior gasto foi para o micro-ondas. Além disso, quanto maior a temperatura, menor é o gasto para ambos os equipamentos, já que os tempos de secagem são menores.

De acordo com Silveira (2007), no Brasil, 1 tonelada de batata-doce resulta em aproximadamente 160 L de etanol. Considerando-se que a massa específica do etanol é de 789 kg/m³, ou seja, 0,789 kg/L, tem-se que a massa de etanol correspondente a 1 kg de batata-doce é de 126,24 kg. Com isso, na Tabela 14, a seguir, estão os cálculos de gasto energético por kg de etanol produzido.

Tabela 14: Energia específica total em termos de kg de etanol produzido.

Equipamento	T [°C]	Energia específica total [MJ/kg etanol]
Estufa	75	2471,615
	50	3443,233
Micro-Ondas	75	2310,615
	50	4362,168

Fonte: Do autor (2023).

De acordo com a resolução ANP nº 758, de 23/11/2028, o etanol anidro deve possuir Poder Calorífico Inferior (PCI) de 28,26 MJ/kg. Então, para que o processo de secagem fosse vantajoso, o valor da energia específica total deveria ser menor ou igual ao valor anterior, tornando-o inviável em termos de balanço energético para todos os casos.

6 CONCLUSÕES

Portanto, por meio de todos os estudos realizados, é possível concluir que o processo de secagem de batata-doce é diretamente influenciado pelos parâmetros: temperatura, espessura e tipo de secador.

Observou-se que, à medida que a temperatura aumenta, diminui-se o tempo de secagem da batata-doce até que essa atinja o equilíbrio, de forma que a secagem mais rápida ocorreu à 100°C. O aumento da espessura, por outro lado, ocasionou o aumento do tempo de secagem, sendo que as secagens mais rápidas foram aquelas realizadas com 1,5 mm. Em relação ao tipo de secador, fixando-se a temperatura e a espessura, a estufa proporcionou uma secagem mais rápida do que o micro-ondas, devido à diminuição gradual do conteúdo de água no alimento, que ocasiona a perda de eficiência das micro-ondas.

O modelo que melhor representou os dados experimentais foi o de Midilli, com um R² médio de 0,9949, seguido dos modelos de Page Modificado e Page. Porém, entende-se que, pela complexidade do modelo de Midilli, além da pequena diferença entre os valores de R² em relação ao modelo de Page, o ajuste deve ser feito por Page. O modelo que apresentou o pior ajuste foi de o Newton, com R² médio de 0,9651, não sendo representativo.

Foi possível constatar que, quanto maior a temperatura, maiores são as taxas de secagem, além de que os valores dessa taxa são maiores para o secador de micro-ondas. O aumento da espessura faz com que a velocidade de secagem seja menor. Notou-se, também, que o perfil da curva de taxa de secagem é diferente para os dois tipos de secadores, sendo que, na estufa, esta apresenta os períodos crescente, constante e decrescente, ao passo que, para o micro-ondas, ela apenas decresce.

Concluiu-se, também, que hidrólises realizadas com a farinha de batata-doce, independentemente da condição de secagem, resulta em maiores quantidades de açúcares redutores se comparada com aquelas feitas com a batata-doce *in natura*. O aumento da espessura de secagem também interferiu na concentração de açúcares redutores, obtendo valores maiores para a espessura de 3,0 mm.

Em relação ao tipo de secador e à temperatura, não foi possível encontrar uma tendência concreta, porém observou-se que, para a estufa, a temperatura de 50°C foi a mais promissora, tendo maior rendimento de açúcares redutores, ao passo que para o micro-ondas a melhor temperatura foi a de 75°C. De forma geral, a melhor condição experimental foi a secagem realizada em estufa à 50°C com 3,0 mm de espessura, resultando em um mosto com concentração de 78,081 gAR/L.

Por fim, foi possível concluir que o gasto energético relativo ao processo de secagem é muito grande, não compensando a energia futuramente gerada pelo combustível produzido. Ainda, observou-se que o aumento de temperatura reduz o gasto energético, já que o tempo de secagem também diminui.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com a finalidade de aprimorar os resultados e conclusões obtidos recomenda-se:

- i. Padronizar as batatas-doces utilizadas quanto ao cultivar e teor de água inicial;
- ii. fazer o corte das batatas-doces de forma mais precisa, utilizando um gabarito sólido (de madeira, por exemplo);
- iii. realizar todas as secagens em dias com umidade abaixo de 60%;
- iv. testar as secagens em mais temperaturas para que seja possível concluir sobre a tendência da quantidade de açúcares redutores com essa mudança de temperatura;
- v. realizar as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de raios X para cada condição experimental, a fim de observar as mudanças estruturais causadas pelas secagens;
- vi. utilizar o procedimento da EMBRAPA para teste de DNS sem a substância fenol, por ser mais simples;
- vii. controlar melhor os parâmetros da hidrólise, pH e temperatura, com o auxílio de termômetros e um medidor de pH digital;
- viii. utilizar solução tampão na hidrólise;
- ix. realizar a análise de Açúcares Redutores Totais (ART) com o mosto mais recente, de forma que não fique muitos dias armazenados na geladeira;
- x. realizar a centrifugação do mosto logo após a hidrólise, a fim de facilitar a armazenagem;
- xi. fazer os testes em duplicatas para maior exatidão dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Y. V.; OLIVEIRA, M.A.G; GUERRA, S. M. **Energia, sociedade e meio ambiente**. Brasil: Palmas, 2010.
- BARROS, P. de S.; BLUM, R. P. **Produção de etanol a partir do resíduo da batata proveniente da indústria alimentícia**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.
- BARROS, S. N. S. **Modelagem matemática e cinética de secagem da batata-doce (Ipomoea batatas (L.) Lam.)**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.
- BNDES. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Organização BNDES e CGEE, Rio de Janeiro, 2008.
- BRAGA, B. *et al.* **Introdução à Engenharia Ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. Pearson Prentice Hall, 2ª edição, 2005.
- BRASIL. **Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014**. Dispõe sobre a adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel comercializado com o consumidor final; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 8.723, de 28 de outubro de 1993; revoga dispositivos da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005; e dá outras providências.
- BRITO, T. de B. **Modelagem matemática de curvas típicas de secagem de frutas tropicais**. Trabalho de Conclusão do Curso de Química Tecnológica do Instituto de Química da Universidade de Brasília, 2022.
- CASTRO, L. A. S. de; TREPTOW, R.; BECKER, A. **Potencialidade da cultivar de batata-doce BRS-Cuia como matéria prima para a produção de etanol**. Simpósio Estadual de Agroenergia, IV reunião técnica de agroenergia-RS.
- CASTRO, Luis Antônio Suita de; TREPTOW, Rosa; BECKER, Andrea. **Potencialidade da cultivar de batata-doce brs-cuia como matéria prima para a produção de etanol**. Simpósio Estadual de Agroenergia – IV Reunião Técnica de Agroenergia, 2012.
- CECCHI, H.M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos**. 2ª edição, Editora da UNICAMP, Campinas, 2003.
- CINELLI, B. A. **Produção de etanol a partir da fermentação simultânea à hidrólise do amido granular de resíduo agroindustrial**. Dissertação de Mestrado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.
- DUVERNAY, W.H.; CHINN, M. S.; YENCHO, G. C. **Hydrolysis and fermentation of sweetpotatoes for production of fermentable sugars and etanol**. *Industrial Crops and Products* 42 p. 527–537, 2013.
- EMBRAPA. **Protocolo para determinação de açúcares totais em hortaliças pelo método de DNS**. Comunicado técnico 85, 2013.

EMBRAPA. **Sistema de Produção de Batata-Doce**. Embrapa Hortaliças Sistema de Produção, 9, 2021.

GASA S. **Thin-layer modelling of sweet potato slices drying under naturally-ventilated warm air by solar-venturi dryer**. *Heliyon* 8 e08949, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08949>

GOMES, M. S. D. *et al.* **Simulação do processo de fermentação alcoólica do bioetanol a partir do resíduo de batata-doce (*Ipomoea batatas* L. (lam.))**. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(2): 191-202., 2019.

GONÇALVES, M. F. V. **Tratamento térmico do amido de batata-doce (*Ipomoea batatas* L.) sob baixa umidade em micro-ondas**. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, 29(2): 270-276, abr.-jun. 2009.

GÜLDEN, J. S. **Roadmap Tecnológico: Etanol de batata-doce**. Trabalho de Diplomação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2019.

GUPTA, R. *et al.* **Microbial α -amylases: a biotechnological perspective**. *Process Biochemistry* 00, p. 1-18, 2003.

JÚNIOR V. C. de A. *et al.* **Características produtivas e qualitativas de ramas e raízes de batata-doce**. *Horticultura Brasileira* 30: 584-589, 2012.

JÚNIOR, P. C. A.; 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.

KAREL, M.; LUND, D. **Physical Principles of Food Preservation: Revised and Expanded** (2nd ed.). CRC Press, 2003. <https://doi.org/10.1201/9780203911792>

KEEY, R.B. **Drying: principles and practice**. Oxford, 1972.

LÁZARI, Thiago Magalhães de; ABREU, Yolanda Vieira de. ***Estudo sobre as vantagens e desvantagens do uso da gasolina, etanol e a mistura dos dois combustíveis em motores flex fuel***. *Energia, Economia e Rotas Tecnológicas – Textos Selecionados*, Palmas-TO, 2010.

MACHADO, C. M. M.; ABREU, F. R. e. **Produção de álcool combustível a partir de carboidratos**. *Revista de Política Agrícola*, Ano XV – Nº 3, 2006.

MAGALHÃES, K. B.; RODRIGUES, W.; SILVEIRA, M. A da. **Análise custo-benefício social da cadeia produtiva de etanol de batata-doce no Estado de Tocantins**. *Custos e Agronegócio online* - v. 8, n. 1 – Jan/Mar - 2012.

MARCINKOWSKI, E. de A. **Estudo da cinética de secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2006.

MARCOCCIA, R. **A participação do etanol brasileiro em uma nova perspectiva na matriz energética mundial**. Dissertação de mestrado, Programa de Interunidades de Pós-Graduação

em Energia PIPGE, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2007.

MARTINAZZO, A. P. *et al.* **Análise e descrição matemática de cinética de secagem de folhas de capim-limão.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.11, n.3, p.301–306, 2007.

MASIERO, S. S. **Microusinas de etanol de batata-doce: viabilidade econômica e técnica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2012.

MASSAROTO, J. A. **Características agrônomicas e produção de silagem de clones de batata-doce.** Tese de doutorado, Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2008.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering.** 7. ed. Boston, MA: McGraw-Hill/ /Engineering/Math, 2004.

MONTEIRO, R. L. *et al.* **Secagem de batata-doce em micro-ondas a vácuo com controle da temperatura pela manipulação da potência.** XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), São Paulo, 2018.

NETO, A. C. G. **Aptidões de genótipos de batata-doce para consumo humano, produção de etanol e alimentação natural.** Pesq. agropec. bras., Brasília, v.46, n.11, p.1513-1520, nov. 2011.

NUNES, J. S. *et al.* **Descrição cinética de secagem de polpa de jaboticaba usando modelos empíricos.** Revista Verde de Agroecologia, v. 9, n. 1, p. 20 -26, jan-mar, 2014. ISSN 1981-8203.

OLIVEIRA, A. P de *et al.* **Produção e teor de amido da batata-doce em cultivo sob adubação com matéria orgânica.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.17, n.8, p.830–834, 2013.

OLIVEIRA, D. C. de. **Caracterização e potencial tecnológico de amidos de diferentes cultivares de mandioca (Manihot esculenta Crantz).** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2011.

OLIVEIRA, L. M. SERRA, J. C. V. MAGALHÃES, K. B. **Estudo comparativo das diferentes tecnologias para produção de etanol.** Revista Geoambiente on-line, Jataí-GO, 2013. DOI: 10.5216/revgeoamb.v0i19.26058.

PARK, K.J.; BIN, A.; BROD, F.P.R. **Drying of pear 'd'Anjou' with and without osmotic dehydration.** Journal of Food Engineering, v.56, p.97-103, 2002.

RAMALHO, W. J. C. R. **Análise da cinética de secagem da batata-doce (Ipomoea batatas L.) por diferentes técnicas de secagem.** Trabalho de conclusão de curso, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

RAY R. C.; TOMLINS, K. I. **Sweet potato: post harvest aspects in food, feed and industry.** Food Science Research and Technology, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2010.

RISSO, R. dos S. **Etanol de batata-doce: otimização do pré-processamento da matéria-**

prima e da hidrólise enzimática. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2014.

ROCHA, T. de S. **Estudo das características estruturais de amidos: efeito do ‘annealing’, da hidrólise ácida e da hidrólise enzimática.** Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, - São José do Rio Preto, 2010.

RODRIGUES, J. J. et al. **Análise cinética de secagem solar em amostras de batata doce.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.4, p. 43122-43130 apr 2021. DOI:10.34117/bjdv7n4-668

ROSSETO, R. E. *et al.* **Panorama do etanol brasileiro.** Edição Especial, II Seminário de Engenharia na Agricultura, Acta Iguazu, V. 6, n. 5, p. 13-22, 2017.

SANTOS, G. R. dos *et al.* **A agroindústria canavieira e a produção de etanol no Brasil: características, potenciais e perfil de crise atual.**

SANTOS, J. C. dos *et al.* **Estudo da cinética de secagem de batata-doce (*Ipomoea batatas*).** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.14, n.4, p.323-328, 2012.

SCHWEINBERGER, C. M. **Inovação e otimização no processo de produção de etanol a partir de batata-doce.** Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2016.

SILVA, L. M. da *et al.* **Ajustes de modelos matemáticos que descrevem a cinética de secagem de batata-doce (*Ipomoea batatas*) em secador convectivo a 60°C.** Revista caribeña de las ciencias sociales, Miami, v.12, n.1, p. 487-493, 2023. ISSN 2254-7630. DOI: 10.55905/rcssv12n1-029.

SILVEIRA, M.A. (Coord.). **Cultura da batata-doce como fonte de matéria-prima para o etanol.** Palmas: UFTO, 2007.

SINGH, N. *et al.* **Morphological, thermal and rheological Properties of starches from different botanical sources.** Food Chemistry 81, p. 2019-231, 2003.

SMITH, J. M., VAN NESS, H. C., ABBOT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química.** Editora LTC, 7ª. Ed. 2007.

SOUZA, M. T. D. de *et al.* **Caracterização físico-química e centesimal de batata-doce roxa orgânica e Brazlândia roxa convencional (*Ipomoea batatas* L.).** 2º Simpósio Nacional Sobre Inovação em Engenharia e Ciência de Alimentos – 2ºINECA, 2019.

SOUZA, T. de L. **Processo de secagem solar e transferência de massa em amostras de mandioca.** Brazilian Journal of Development., Curitiba, v. 6, n. 11, p.86647-86657 nov. 2020. DOI:10.34117/bjdv6n11-186

TABORDA, L. W. **Avaliação da viabilidade técnica e economia da produção de etanol em planta ploto a partir de batata-doce (*Ipomoea batatas*).** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Tecnologia, Santa Maria-RS, 2014.

VIANA, K. M. *et al.* **Extração e estudo da cinética de secagem da fécula de batata-doce.** Natural Resources, v.8, n.1, p.1-8, 2019. Disponível em: <http://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2018.001.0001>

VIEIRA, F.C. **Efeito do Tratamento com calor e Baixa Umidade Sobre as Características Físicas e Funcionais dos amidos de Batata-doce (*Ipomoea batatas*) e de Gengibre (*Zingiber officinale*).** Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de alimentos) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ZAMBRANO, M. V. *et al.* **Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review.** Trends in food Science & Technology (88), p. 484-496, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.006>