

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**CAMILA MORAES DE PAULA**

**OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DA CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE  
SOJA**

**LONDRINA**

**2022**

**CAMILA MORAES DE PAULA**

**OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DA CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE  
SOJA**

**OPTIMIZATION OF THE CONDITIONS OF DRYING KINETICS OF SOYBEAN  
GRAINS**

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

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Duenhas Machado  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Larissa Maria Gatti  
Fernandes

**LONDRINA**

**2022**



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

**CAMILA MORAES DE PAULA**

**OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DA CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE  
SOJA**

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

Data de aprovação: 06 de junho de 2022

---

Larissa Maria Gatti Fernandes  
Doutora em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Guilherme Duenhas Machado  
Doutor em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Fábio Álvares de Oliveira  
Doutor em Agronomia  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Soja

---

Joel Fernando Nicoletti  
Doutor em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**LONDRINA**

**2022**

Dedico este trabalho a minha família, aos meus amigos da Engenharia Química e aos meus professores do curso por todo apoio e cuidado durante a trajetória acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, por todo amor e dedicação incondicional durante esta longa jornada.

Aos meus amigos do curso do curso de Engenharia Química que foram minha segunda família e me acolherem em muitos momentos difíceis, como a pandemia e o período de aulas remotas.

Aos meus orientadores Prof.(a) Dr.(a) Larissa Maria Gatti Fernandes e Prof. Dr. Guilherme Duenhas Machado, por todo apoio fornecido durante o desenvolvimento deste estudo e por todos os conselhos durante a trajetória acadêmica.

A todos os meus professores por todo suporte prestado, por serem minha inspiração como profissionais e, principalmente, pela dedicação incomparável em fazer um curso de Engenharia Química avaliado com nota máxima.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Londrina, por toda estrutura fornecida para o desenvolvimento deste estudo e a Embrapa/Soja e toda equipe do Laboratório de Tecido Vegetal e Fertilidade do Solo pela oportunidade de desenvolver o estágio obrigatório.

Gostaria de destacar a minha gratidão a minha mãe, Sheile Regina de Moraes, que me apoiou incondicionalmente e minha coorientadora Larissa que é a minha maior referência como engenheira química.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta conquista.

“Had to have high, high hopes for a living  
Didn't know how, but I always had a feeling  
I was gonna be that one in a million  
Always had high, high hopes.”  
(PANIC! AT THE DISCO, 2018)

## RESUMO

O Brasil é o maior produtor de soja no mercado mundial. A proteína desta leguminosa é a propriedade de maior interesse comercial para a indústria já que ela é utilizada como matéria-prima para a fabricação de produtos de alimentação humana e animal. Desta forma, é imprescindível o desenvolvimento de estudos científicos na área de secagem e armazenamento de grãos de soja visando a manutenção da qualidade fisiológica destes. Aplicar calor sobre estas sementes é uma maneira eficaz de reduzir o teor e a atividade de água delas sendo, portanto, fundamental estabelecer uma temperatura e um tempo de operação ideal para realizar o processo sem a ocorrência de reações químicas indesejadas e a desnaturação proteica. A quantidade de água disponível em uma amostra exerce significativa influência no crescimento de bactérias e bolores. Sendo assim, o presente trabalho objetiva: (i) avaliar a secagem dos grãos de soja em três temperaturas de operação (65°, 85°C e 105°C) durante 6,5h e 24h; (ii) construir as curvas cinéticas de secagem e relacioná-las com os modelos da literatura; (iii) estimar o custo energético e operacional deste processo e calcular a economia gerada após reduzir o tempo de secagem; (iv) estabelecer uma metodologia padrão para realizar a secagem de grãos de soja. Constatou-se que os dados experimentais ajustaram-se muito bem em todos os modelos previstos, tendo  $R^2$  superiores a 0,98 em todos os casos. O procedimento experimental realizado em 6,5h pode reduzir os custos econômicos e energéticos da operação em até 73% nos três ensaios, não sendo impactante para a escolha da melhor condição operacional. Assim sendo, levando em consideração a influência de altas temperaturas na qualidade fisiológica dos grãos, indicou-se, após os testes, o uso da temperatura de 65°C durante 6 horas e 30 minutos para realizar a secagem.

Palavras-chave: Secagem; Curvas Cinéticas; Custo Operacional e Energético; Economia.

## ABSTRACT

Brazil is the largest soybean producer in the world market. The protein of this legume is the property of greatest commercial interest to the industry as it is used as a raw material for the manufacture of human and animal food products. Thus, it is essential to develop scientific studies in the area of drying and storage of soybeans, aiming at maintaining their physiological quality. Applying heat to these seeds is an effective way to reduce their water content and activity, so it is essential to establish an optimal temperature and operating time to carry out the process without unwanted chemical reactions and protein denaturation occurring. The amount of water available in a sample has a significant influence on the growth of bacteria and fungi. Therefore, the present work aims to: (i) evaluate the drying of soybeans at three operating temperatures (65°, 85°C and 105°C) during 6.5h and 24h; (ii) build drying kinetic curves and relate them to models in the literature; (iii) estimate the operational cost of this process and calculate the savings generated after reducing the drying time; (iv) establish a standard methodology for carrying out soybean drying. It was found that the experimental data fit very well in all predicted models, with  $R^2$  greater than 0.98 in all cases. The experimental procedure performed in 6.5 hours can reduce the economic and energy costs of the operation by up to 73% in the three tests, having no impact on the choice of the best operating condition. Therefore, taking into account the influence of high temperatures on the physiological quality of the grains, it was indicated, after the tests, the use of a temperature of 65°C for 6 hours and 30 minutes to perform the drying.

Keywords: Drying; Kinectics Curves; Operational and Energetic Costs; Economy.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Armazenamento de grãos na indústria .....	17
Figura 2 - Esquema do processo de secagem de um material sólido .....	18
Figura 3 - Gráficos do processo de secagem em alimentos .....	19
Figura 4 - Estufa de secagem e esterilização .....	21
Figura 5 - Secador de fluxo cruzado.....	21
Figura 6 - Secador de bandejas .....	22
Figura 7 - Matéria-prima utilizada no estudo de caso .....	23
Figura 8 - Estufa de secagem e esterilização .....	24
Figura 9 - Massa da Amostra (g) em função do tempo de operação (min) .....	28
Figura 10 - Comportamento da Massa de Água durante 6,5h de secagem.....	30
Figura 11 - Dados Experimentais e Modelos de Secagem a 65°C.....	31
Figura 12 - Dados Experimentais e Modelos de Secagem a 85°C.....	32
Figura 13 - Dados Experimentais e Modelos de Secagem a 105°C.....	32
Figura 14 - Distribuição tarifária do valor unitário do quilowatt no estado do Paraná .....	36
Figura 15 - Matriz SWOT .....	39
Gráfico 1 - Composição do grão de soja comercial .....	14
Gráfico 2 - Principais produtos fabricados a partir da soja.....	14

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Dados de tempo predefinidos para pesagem das amostras.....	25
Tabela 2 - Dados obtidos utilizando temperatura de 65°C.....	27
Tabela 3 - Dados obtidos utilizando temperatura de 85°C.....	27
Tabela 4 - Dados obtidos utilizando temperatura de 105°C.....	28
Tabela 5 - Valores de R <sup>2</sup> e erro experimental em cada temperatura .....	34
Tabela 6 - Parâmetros do Modelo de Page.....	34
Tabela 7 - Parâmetros do Modelo de Lewis .....	35
Tabela 8 - Parâmetros do Modelo de Brooker .....	35
Tabela 9 - Parâmetros do Modelo de Henderson e Henderson.....	35
Tabela 10 - Consumo e economia energética anual da operação de secagem .	37
Tabela 11 - Custo e economia anual da operação de secagem considerando bandeira convencional.....	37
Tabela 12 - Custo e Economia Anual da Operação de Secagem no horário fora de ponta .....	38
Tabela 13 - Custo e Economia Anual da Operação de Secagem no horário intermediário.....	38
Tabela 14 - Custo e Economia Anual da Operação de Secagem no horário de ponta .....	38
Quadro 1 - Modelos cinéticos de secagem de grãos de soja.....	20

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços
PIS	Programa de Integração Social
SENAR	Serviço Nacional de Aprendizagem Rural
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Constante do modelo de regressão por mínimos quadrados
$b$	Constante do modelo de regressão por mínimos quadrados
$c$	Constante do modelo de regressão por mínimos quadrados
$m_{\text{água}}$	Massa de Água, em gramas.
$m_{\text{sólidos}}$	Massa dos Sólidos, em gramas.
$m_{\text{sólidos+água}}$	Massa de sólidos mais massa de água, em gramas.
$n$	Constante dos modelos de Page, Henderson e Lewis
$t$	Tempo, em minutos.
EMR	Erro Médio Relativo, em porcentagem
$N$	Número
$Q$	Constante dos modelos de Brooker e Henderson
$V_{\text{calc}}$	Valor calculado
$V_{\text{exp}}$	Valor Experimental
$X_{\text{ad}}$	Umidade adimensional
$X_{\text{bs}}$	Umidade em base seca
$X_{\text{bu}}$	Umidade em base úmida
$X_{0,\text{bs}}$	Umidade inicial em base seca
$X_{\text{eq,bs}}$	Umidade de equilíbrio em base seca

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Hipóteses .....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Secagem.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2</b>	<b>Equacionamento e modelos cinéticos de secagem .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Equipamentos industriais.....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1</b>	<b>Matéria-prima .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2</b>	<b>Equipamento de secagem .....</b>	<b>23</b>
<b>4.3</b>	<b>Materiais utilizados .....</b>	<b>24</b>
<b>4.4</b>	<b>Procedimento experimental da operação de secagem .....</b>	<b>24</b>
<b>4.5</b>	<b>Procedimento experimental para aferição da corrente elétrica .....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>27</b>
<b>5.1</b>	<b>Ensaio de Secagem a 65°C, 85°C e 105°C .....</b>	<b>27</b>
<b>5.2</b>	<b>Modelos cinéticos de secagem de grãos de soja.....</b>	<b>31</b>
<b>5.3</b>	<b>Análise econômica e energética .....</b>	<b>36</b>
<b>5.4</b>	<b>Matriz S.W.O.T .....</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>40</b>
<b>6.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

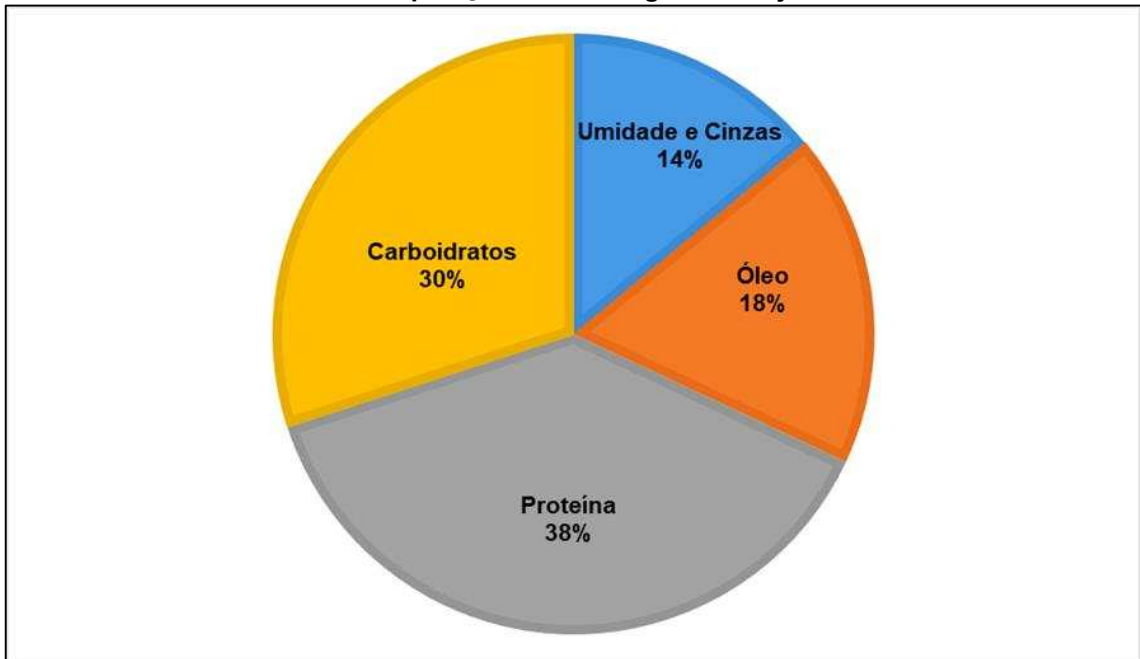
A soja, *Glycine max* (L.) Merrill, pertencente à família das Fabaceae, é uma espécie vegetal que produz grãos ricos em óleos e proteínas e uma das mais cultivadas em todo o mundo. É utilizada como matéria – prima de diversos produtos da alimentação animal e humana e, também, na produção de biodiesel. Possui uma grande viabilidade econômica e comercial e, ao longo dos anos teve um aumento significativo na produção, gerando um alto impacto no agronegócio. Originária do sudoeste asiático, a produção desta semente ocorreu de forma expansiva em meados do século XX devido às suas vastas aplicações industriais. O cultivo deste grão iniciou-se na China e, posteriormente, atingiu os países do Ocidente. (DEMARCHI, 2011)

Desde que foi introduzida no Brasil, mais especificamente no estado do Rio Grande do Sul, a soja teve uma intensa expansão da sua área produtiva. Uma pesquisa econômica mostrou que a safra de 1977 – 1978 correspondia a cerca de 497 mil hectares de área cultivada e, a safra de 2020-2021 atingiu cerca de 38,532 milhões de hectares de área cultivada. Sabe-se que a produção de soja aumentou cerca de 606% desde o início da implementação no território brasileiro, saindo de 9,7 milhões de toneladas, em 1977 para 68,7 milhões de toneladas na colheita de 2013-2014. A explicação mais contundente é a utilização deste grão como matéria – prima na fabricação de biodiesel. (JÚNIOR, 2019)

Conforme os dados da Companhia Nacional de Abastecimento, a produção de soja na safra de 2020/2021 foi de 135,91 milhões de toneladas, sendo 83,61 milhões de toneladas destinados à exportação. (CONAB, 2022)

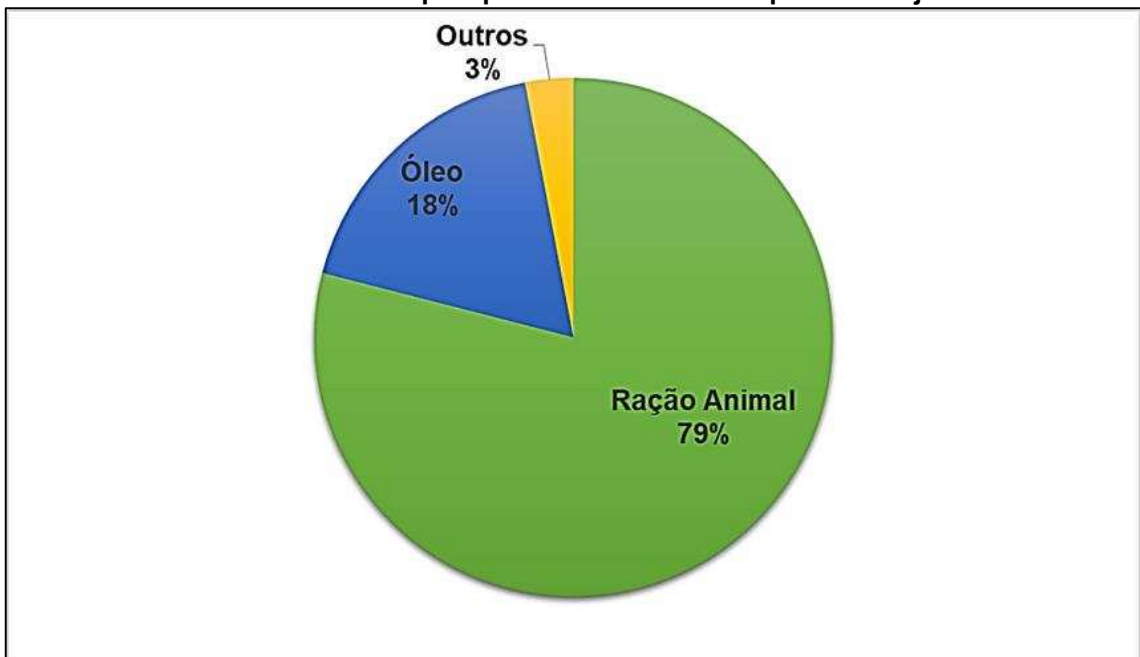
A composição química deste grão é influenciada por diversos fatores, como: a genética, devido à cultivar e ao ciclo de desenvolvimento, o tipo de solo, a época de semeadura e o clima da região. A proteína da soja é a constituinte de maior interesse comercial, uma vez que ela é a fonte de matéria-prima para a fabricação de farelo proteico para ração animal e, para preservar sua qualidade é imprescindível o desenvolvimento de técnicas de colheita, secagem e armazenamento que não comprometam as características nutricionais desta leguminosa e não promovam a desnaturação proteica. (SANTOS, 2013)

O Gráfico 1 representa a composição média do grão de soja comercial.

**Gráfico 1 - Composição média do grão de soja comercial**

Fonte: Kawaga (1995)

Já o Gráfico 2 mostra a porcentagem de produtos fabricados a partir desta leguminosa, de acordo com dados fornecidos pela organização não governamental WWF Brasil.

**Gráfico 2 - Principais produtos fabricados a partir da soja**

Fonte: Autora, adaptado WWF Brasil (2022)

Ainda, segundo WWF Brasil, o óleo de soja representa 25% de todo consumo de óleo vegetal no mundo.

O processo de secagem consiste em remover água do interior de um material sólido para o meio externo, tendo como força motriz a diferença de concentração. A modelagem matemática conhecida como cinética de secagem é um método amplamente utilizado e recomendado pela literatura científica para prever o comportamento dos fenômenos físicos (transferência de calor e massa) envolvidos nesta operação unitária. (BARROZO,2006)

O presente trabalho propôs o estudo da cinética de secagem de grãos de soja em diferentes temperaturas e tempos de operação a fim de promover condições ideais para o processo, tornando-o padronizado e, possivelmente, reduzindo os custos energéticos e econômicos inerentes à operação.



## 2 ESTUDO DE CASO

Segundo dados da literatura científica, a secagem é considerada a fase mais dispendiosa energeticamente às indústrias. A fim de suprir a diligência da sociedade por produtos qualificados, de baixo custo e com práticas ambientais corretas é importante otimizar as condições operacionais deste processo, sendo necessário investir no desenvolvimento de estratégias que minimizem os custos energéticos e econômicos. (LUZ, 2006).

A secagem é uma operação potencialmente nociva à qualidade dos grãos e a intensidade do prejuízo depende de alguns fatores como o teor de água inicial e final do produto, a temperatura e o tempo de operação, a taxa de secagem, o fluxo e a velocidade do ar aquecido, entre outros. (MIRANDA *et al*, 1999; BIAGI *et al*, 2002).

A Embrapa Soja aplica diversas metodologias distintas para reduzir o teor de umidade das amostras, sendo os procedimentos abaixo realizados no laboratório de Tecido Vegetal e Fertilidade do Solo e de Fisiologia e Tecnologia de Sementes, respectivamente.

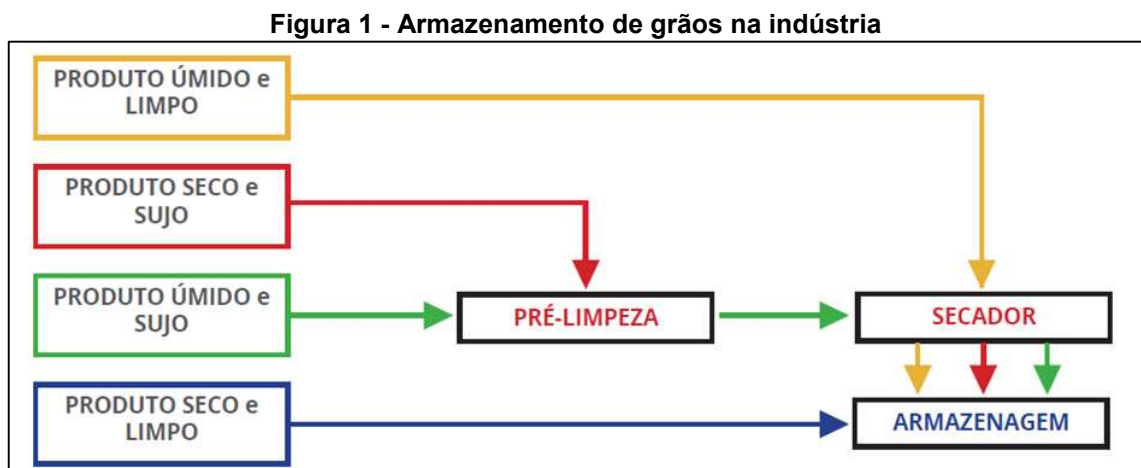
- I. Algumas amostras de folhas e de grãos de soja e de milho foram submetidas a secagem em estufas laboratoriais durante 24h a 65°C e 105°C para serem analisadas, posteriormente. Esta metodologia foi utilizada para avaliar a possibilidade de se excluir a secagem na menor temperatura, já que a umidade da soja foi reduzida a valores muito menores utilizando a maior temperatura. Não houve prejuízo fisiológico do material.
- II. Amostras de grãos de soja são submetidas a secagem em uma estufa ventilada, a 25°C, durante um certo período de tempo desconhecido até que se atinja a umidade desejada, que em geral, é em torno de 13% para o armazenamento.

Conhecidas estas duas metodologias, propôs-se este estudo de caso, visando otimizar o tempo de operação, a condição de calor aplicada e, conseqüentemente, o custo econômico e energético deste processo, além de propor uma metodologia padrão para a empresa. Realizou-se este experimento em três temperaturas distintas (65°C, 85°C e 105°C), durante 6,5h de secagem, conforme metodologia de RUIVO (2018) e, durante 24h, conforme a metodologia de GUILHERME (2018). Com os dados obtidos, foi possível construir as curvas cinéticas e relacioná-las com os modelos indicados na literatura, sendo possível prever qual deles melhor se ajusta

aos valores experimentais. Além disso, estimou-se também a economia gerada após realizar a secagem em um tempo menor.

Para cada ensaio, as amostras foram pesadas em balança analítica em intervalos de tempos predeterminados e submetidas à secagem até a massa permanecer constante ou apresentar variações mínimas, indicando o equilíbrio do processo e o encerramento da transferência de massa. Em seguida, o material foi colocado em estufa por 24h para a determinação da massa sólida dos grãos e secagem completa do material. (GUILHERME,2018)

Em grandes empresas do setor agrícola, após a etapa de colheita, os grãos de soja passam por um processo de secagem para que a umidade deles seja reduzida a valores aceitáveis para o armazenamento em silos (em torno de 9% a 13%). A Figura 1 mostra um esquema de armazenamento de grãos com sistema de secagem convencional, aplicado industrialmente.



Fonte: Coleção SENAR (2018)

## 2.1 Hipóteses

A hipótese mais adequada para a realização da secagem de soja utilizando a metodologia do Laboratório de Fisiologia e Tecnologia de Sementes é a de que o objetivo final da operação é atingido (umidade dos grãos = 13%), independentemente do tempo do processo ou da temperatura utilizada.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

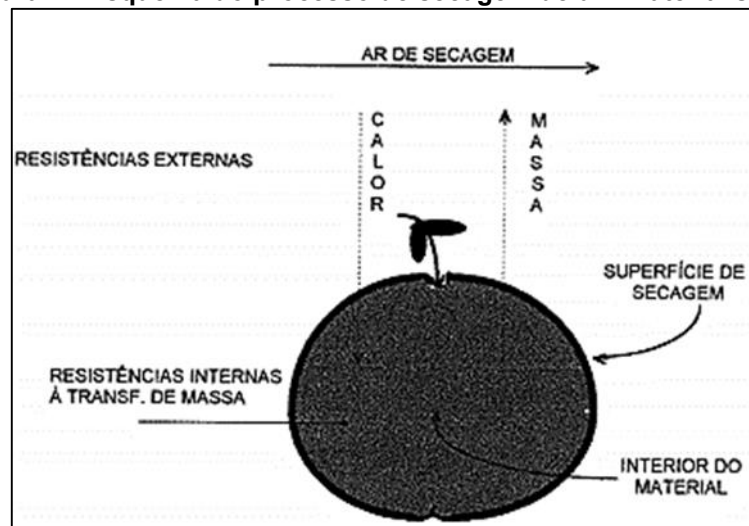
#### 3.1 Secagem

A secagem (ou desidratação) é um dos métodos mais eficientes para remover a umidade de um material e, conseqüentemente, promover o aumento de vida útil dos produtos. Este método confere estabilidade microbiana e bioquímica para uma dada matéria sólida, uma vez que os fenômenos químicos, físicos e biológicos dependem da disponibilidade de água. Ademais, também promove a redução do peso, do armazenamento e dos custos relacionados à logística comercial dos produtos, de modo a democratizar o acesso destes (TADINI *et al.*, 2016).

A desidratação é uma operação unitária envolvendo a transferência simultânea de calor e massa em um material, onde a água ou qualquer outro líquido é removido de maneira completa ou parcial. A transferência de massa deste processo está relacionada com a difusão da água no interior do sólido para a superfície, enquanto a transferência de calor ocorre na superfície deste sólido, onde também há a presença de uma água que sofrerá vaporização. (MARTINS *et al.*, 2020).

Desta forma, quando o calor necessário para evaporar a água é fornecido, ocorrem transferências simultâneas de calor e massa. A Figura 2 exemplifica o esquema desta operação.

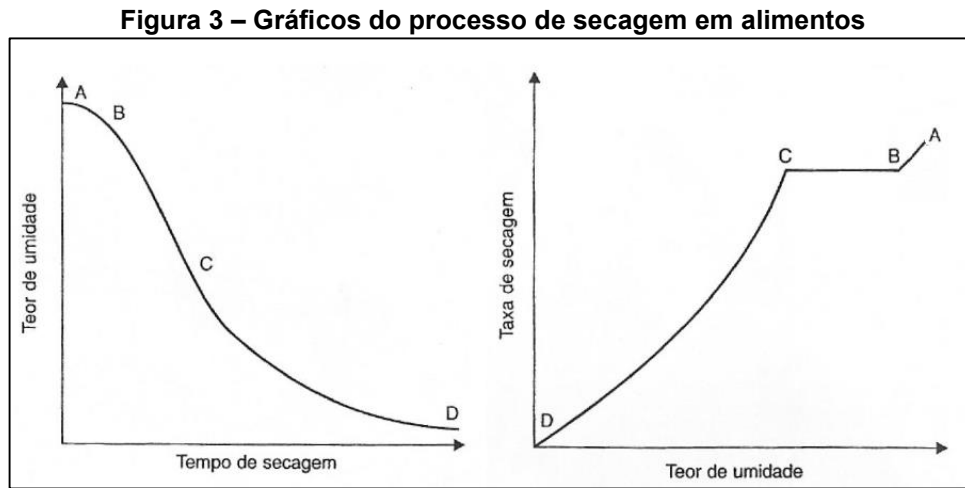
Figura 2 - Esquema do processo de secagem de um material sólido



Fonte: Gabas (1998)

A cinética de secagem, ou em outras palavras, a rapidez com que um material sólido perde umidade, depende de alguns fatores, tais como a característica da matriz

do material, a temperatura, a umidade relativa e a velocidade do ar. Na Figura 3, observa-se uma curva típica de secagem. (CELESTINO, 2010).



Fonte: Fellows adaptado,2006

Por meio da análise da Figura 3, percebe-se que o trecho AB representa o primeiro período da secagem, momento em que tanto a temperatura do sólido como a taxa de secagem aumentam. Depois, tem-se o segundo trecho (BC) no qual a taxa de secagem é constante, sendo que este estágio é mantido até o ponto em que a umidade presente no interior do sólido seja baixa. Por fim, tem-se o trecho CD, onde ocorre o decréscimo na taxa de secagem. A secagem persiste até que a umidade de equilíbrio seja alcançada, sendo este o momento em que a pressão de vapor da água no sólido é igual a pressão de vapor da água no ar. (FOUST *et al.*, 1982). A operação, no entanto, deve ser cuidadosamente executada, levando em consideração estudos desenvolvidos na área, uma vez que a aplicação de temperaturas intensas pode afetar a qualidade e a estrutura física dos grãos. (RESENDE,2010)

### 3.2 Equacionamento e modelos cinéticos de secagem

O teor de umidade de um determinado material sólido pode ser medido após a execução do experimento.

A umidade em base úmida do grão de soja foi calculada a partir da equação 1, conforme mostrado abaixo.

$$X_{bu}(t) = \frac{m_{sólidos+água}(t) - m_{sólidos}}{m_{sólidos+água}(t)} = \frac{m_{água}(t)}{m_{sólidos+água}(t)} \quad (1)$$

Já através da equação 2, pôde-se estimar o teor de umidade em base seca.

$$X_{bs}(t) = \frac{X_{bu}(t)}{1 - X_{bu}(t)} \quad (2)$$

E, finalmente, pela equação 3, foi possível prever a umidade adimensional.

$$X_{ad}(t) = \frac{X_{bs}(t) - X_{eq,bs}}{X_{0,bs} - X_{eq,bs}} \quad (3)$$

A secagem de grãos de soja segue um comportamento que pode ser previsto por vários modelos cinéticos, no entanto, neste estudo, utilizou-se quatro ajustes encontrados na literatura científica e uma regressão por mínimos quadrados, feita pelo software Excel. As equações 4 a 8 do quadro 1 representam os modelos e suas respectivas equações.

**Quadro 1 - Modelos cinéticos de secagem de grãos de soja**

<b>Modelo</b>	<b>Equação</b>
Page	$X_{ad}(t) = \exp(-k * t)^n$ (4)
Henderson e Henderson	$X_{ad}(t) = Q * \left[ \exp(-k * t) + \frac{1}{9} * \exp(-9 * k * t) \right]$ (5)
Brooker	$X_{ad}(t) = Q * \exp(-k * t)$ (6)
Lewis	$X_{ad}(t) = \exp(-k * t)$ (7)
Regressão por Mínimos Quadrados	$X_{ad}(t) = a * t^2 - b * t + c$ (8)

Fonte: Autora (2022)

O erro médio relativo foi calculado utilizando a equação 9.

$$EMR (\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|V_{calc} - V_{exp}|}{V_{calc}} \quad (9)$$

### 3.2.1 Equipamentos Industriais

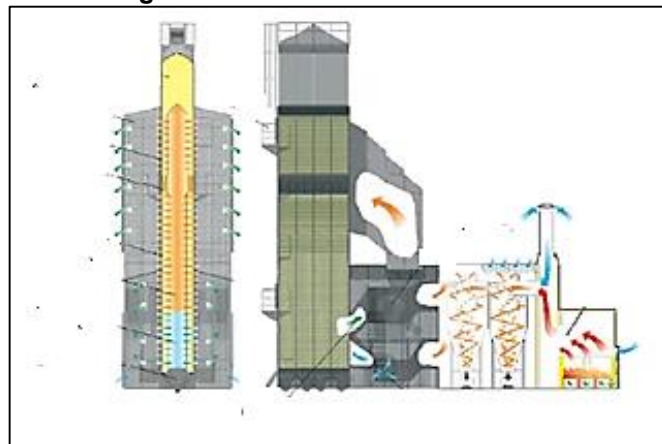
Entre os equipamentos mais comumente usados para realizar a secagem de grãos pode-se citar as estufas de esterilização, como mostrado na figura 4, e os secadores industriais (figuras 5 e 6).

**Figura 4 - Estufa de secagem e esterilização**



Fonte: AGLAB (2022)

**Figura 5 - Secador de fluxo cruzado**



Fonte: Revista Cultivar (2015)

**Figura 6 - Secador de bandejas**



Fonte: UFRGS (2022)

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Matéria-prima

O material utilizado no processo de secagem foram grãos de soja colhidos em março de 2021, cultivar BRS 1061 IPRO, com umidade inicial entre 6% e 12%. As amostras foram gentilmente cedidas pela Embrapa Soja onde também foi desenvolvido o estágio curricular obrigatório. A figura 7 ilustra os grãos de soja dentro das placas de Petri antes da execução do experimento.

**Figura 7 - Matéria-prima utilizada no estudo de caso**



Fonte: Autora (2022)

### 4.2 Equipamento de secagem

A estufa utilizada na operação é da marca Nova Instruments, modelo NI 1514, da categoria Secagem e Esterilização. É composta internamente por aço inox 430 e externamente por aço carbono 1020 com tratamento anticorrosivo e acabamento em tinta eletrostática texturizada. O equipamento atinge até 200°C e é monitorado por um controlador eletrônico microprocessado contido na parte frontal do painel. A potência máxima de operação é de 1500W, sendo as correntes nominais 30A e 15A para as tensões de 127 V e 220 V, respectivamente. Em relação às dimensões, a estufa possui 50 cm de largura, 52 cm de altura e 40 cm de profundidade. (NOVA INSTRUMENTS, 2022) A figura 8 mostra uma fotografia da estufa disponível no laboratório de Engenharia Química III, situado no Bloco K, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Londrina.



**Figura 8 - Estufa de secagem e esterilização**



Fonte: Autora (2022)

### **4.3 Materiais utilizados**

Além da matéria – prima fornecida pela empresa, também foi necessário o uso de alguns materiais adicionais, tais como:

- Placas de Petri;
- Papel toalha;
- Cronômetro;
- Balança Analítica;
- Higrômetro;
- Multímetro Digital;
- Caneta de Marcação;
- Cabos para transmissão de carga.

### **4.4 Procedimento experimental da operação de secagem**

As placas de Petri foram numeradas de 1 a 10 e pesadas em uma balança analítica com precisão de duas casas decimais. Em seguida, tarou-se a balança e inseriu-se os grãos de soja no suporte, mantendo a massa destes próxima a 50 gramas. Anotou-se os valores tanto do recipiente quanto das massas dos grãos em uma planilha do Excel e colocou-se todas as amostras pesadas dentro da estufa de secagem previamente aquecida a 65°C. Após tempos predeterminados, retirou-se as amostras da estufa (com auxílio de papel toalha), pesou-as, anotou-se as massas

obtidas e retornou-as a secagem até que esta completasse o tempo total. As massas foram coletadas conforme os tempos predeterminados da tabela 1. Repetiu-se este procedimento para as temperaturas de 85°C e 105°C.

Antes de iniciar a experiência, a umidade dentro das estufas a 65°C e 85°C foi medida com o auxílio de um higrômetro, assim como a temperatura e a umidade da sala. A umidade dentro da estufa a 105°C não foi possível de ser estimada devido à alta temperatura. Todos os dados obtidos foram anotados em uma planilha no Excel.

**Tabela 1 - Dados de tempo predefinidos para pesagem das amostras**

<b>Tempo Inicial</b>	<b>Tempo Final</b>	<b>Intervalo de Leitura</b>	<b>Número de Leituras</b>
0 min	30 min	5 minutos	6
31 min	91 min	15 minutos	4
92 min	152 min	30 minutos	2
153 min	213 min	60 minutos	1
214 min	274 min	60 minutos	1
275 min	335 min	60 minutos	1
336 min	396 min	60 minutos	1

**Fonte: Autora (2022)**

Após o tempo 6h e 30 minutos de secagem, o experimento foi interrompido, uma vez que já era possível observar a tendência dos grãos em não perder mais água.

A última parte do experimento consistia em deixar as amostras de soja secarem por 24 horas dentro das estufas nas temperaturas de operação preestabelecidas (65°C, 85°C e 105°C) e, após este período, pesar suas massas e anotar na planilha. Esta etapa da experiência foi útil para determinar a massa seca das amostras, ou seja, a massa apenas dos sólidos já que toda água foi evaporada.

#### **4.5 Procedimento experimental para aferição da corrente elétrica**

Realizou-se a medição da corrente elétrica da estufa a fim de se calcular a potência do equipamento e, posteriormente o consumo energético. Para isso, utilizou-se um multímetro digital da marca Hikari, modelo HM 2080.

Primeiramente, conectou-se o fio de ligação da estufa à fonte de energia, com o auxílio de cabos. Em seguida, conectou-se as pontas de provas do multímetro à fonte de energia. Após verificar se todas as conexões estavam adequadas, ligou-se a estufa, ajustou-a a 65°C e ligou-se o multímetro. Notou-se que ele começou a fazer a medição da corrente elétrica, que variou até que a temperatura da estufa

estabilizasse. Após chegar a 65°C, monitorou-se a atividade do multímetro e gravou-se as medições da corrente elétrica por cerca de 10 minutos. Para os cálculos, fez-se uma média das correntes elétricas durante este tempo. Repetiu-se esta etapa para as temperaturas de 85°C e 105°C.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Ensaios de Secagem a 65°C, 85°C e 105°C

Após a realização dos três ensaios, foram obtidos os valores médios de massas das amostras em função do tempo, bem como a massa de água e as umidades em base seca, base úmida e adimensionais (calculadas pelas equações 1, 2 e 3, respectivamente). Os dados obtidos podem ser observados nas tabelas 2, 3 e 4.

**Tabela 2 - Dados obtidos utilizando temperatura de 65°C**

t (min)	Massa Total (g)	Massa de Água (g)	X <sub>bu</sub> (t)	X <sub>bs</sub> (t)	X <sub>ad</sub> (t)
0	50,2170	3,1330	0,0624	0,0665	1,0000
5	50,0900	3,0060	0,0600	0,0638	0,9430
10	50,0260	2,9420	0,0588	0,0625	0,9142
15	49,9630	2,8790	0,0576	0,0611	0,8859
20	49,8980	2,8140	0,0564	0,0598	0,8568
25	49,8410	2,7570	0,0553	0,0586	0,8312
30	49,7530	2,6690	0,0536	0,0567	0,7916
45	49,6290	2,5450	0,0513	0,0541	0,7360
60	49,4950	2,4110	0,0487	0,0512	0,6758
75	49,3460	2,2620	0,0458	0,0480	0,6089
90	49,2580	2,1740	0,0441	0,0462	0,5694
120	49,0780	1,9940	0,0406	0,0423	0,4885
150	48,9190	1,8350	0,0375	0,0390	0,4172
210	48,6010	1,5170	0,0312	0,0322	0,2744
270	48,3490	1,2650	0,0262	0,0269	0,1612
330	48,1580	1,0740	0,0223	0,0228	0,0754
390	47,9900	0,9060	0,0189	0,0192	0,0000

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 3 - Dados obtidos utilizando temperatura de 85°C**

t (min)	Massa Total (g)	Massa de Água (g)	X <sub>bu</sub> (t)	X <sub>bs</sub> (t)	X <sub>ad</sub> (t)
0	50,4857	3,5200	0,0697	0,0749	1,0000
5	50,3414	3,3757	0,0671	0,0719	0,9577
10	50,2329	3,2671	0,0650	0,0696	0,9259
15	50,1243	3,1586	0,0630	0,0673	0,8941
20	50,0457	3,0800	0,0615	0,0656	0,8711
25	49,9543	2,9886	0,0598	0,0636	0,8444
30	49,8657	2,9000	0,0582	0,0617	0,8184
45	49,6314	2,6657	0,0537	0,0568	0,7498
60	49,4457	2,4800	0,0502	0,0528	0,6954
75	49,2671	2,3014	0,0467	0,0490	0,6431
90	49,0971	2,1314	0,0434	0,0454	0,5933
120	48,7014	1,7357	0,0356	0,0370	0,4774
150	48,3429	1,3771	0,0285	0,0293	0,3724
210	47,8129	0,8471	0,0177	0,0180	0,2172
270	47,4543	0,4886	0,0103	0,0104	0,1121
330	47,2457	0,2800	0,0059	0,0060	0,0510
390	47,0714	0,1057	0,0022	0,0023	0,0000

Fonte: Autora (2022)

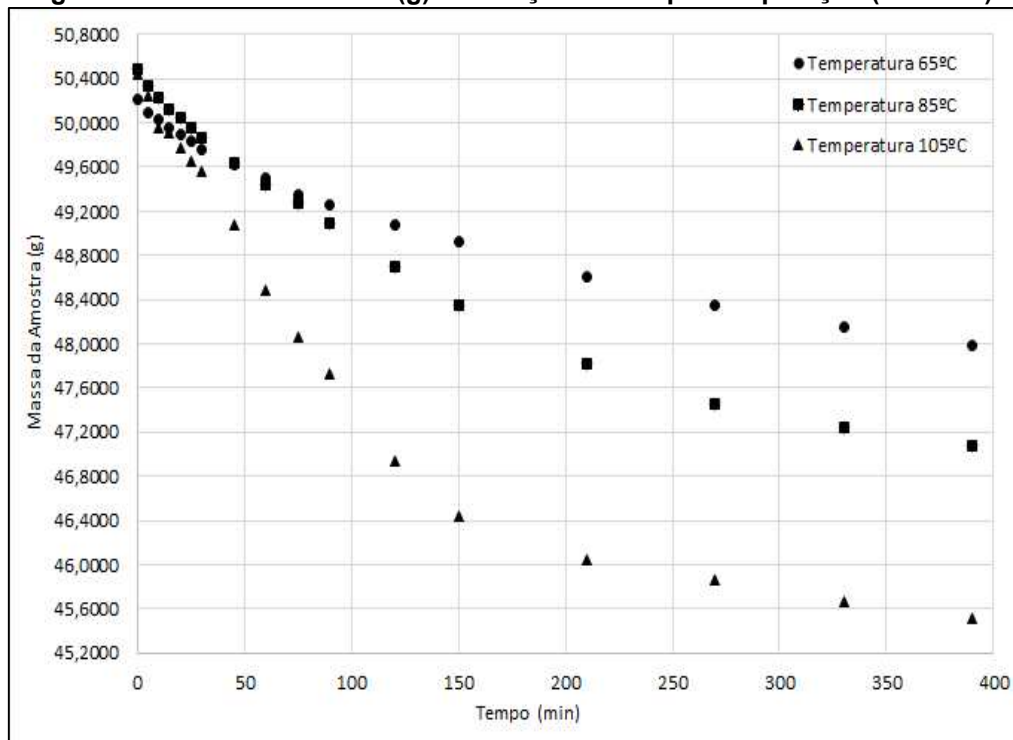
Tabela 4 - Dados obtidos utilizando temperatura de 105°C

t (min)	Massa Total (g)	Massa de Água (g)	X <sub>bu</sub> (t)	X <sub>bs</sub> (t)	X <sub>ad</sub> (t)
0	50,4414	5,7671	0,1143	0,1291	1,0000
5	50,2414	5,5671	0,1108	0,1246	0,9593
10	49,9486	5,2743	0,1056	0,1181	0,8998
15	49,9114	5,2371	0,1049	0,1172	0,8922
20	49,7729	5,0986	0,1024	0,1141	0,8641
25	49,6471	4,9729	0,1002	0,1113	0,8385
30	49,5629	4,8886	0,0986	0,1094	0,8214
45	49,0829	4,4086	0,0898	0,0987	0,7238
60	48,4900	3,8157	0,0787	0,0854	0,6033
75	48,0671	3,3929	0,0706	0,0759	0,5173
90	47,7271	3,0529	0,0640	0,0683	0,4482
120	46,9414	2,2671	0,0483	0,0507	0,2884
150	46,4414	1,7671	0,0381	0,0396	0,1868
210	46,0500	1,3757	0,0299	0,0308	0,1072
270	45,8586	1,1843	0,0258	0,0265	0,0683
330	45,6700	0,9957	0,0218	0,0223	0,0299
390	45,5229	0,8486	0,0186	0,0190	0,0000

Fonte: Autora (2022)

A figura 9 representa o comportamento da massa das amostras em função do tempo de operação, sendo estes dados extraídos das tabelas 2, 3 e 4.

Figura 9 - Massa da Amostra (g) em função do tempo de operação (minutos).



Fonte: Autora (2022)

Inicialmente, as amostras das sementes possuíam, aproximadamente 50,4g de massa, sendo esta composta de matéria seca e água. Após a aplicação de calor,

notou-se uma diminuição de massa destas; no entanto, o que estava sendo perdido era a massa de água presente inicialmente no grão por dois fenômenos que ocorreram simultaneamente: a transferência de água superficial das sementes para o ar e o movimento de água do interior para a superfície das sementes. (VILLELA,1991; MORAES, 2000).

Assim, a figura 9 apresenta um comportamento coerente, onde nota-se as três curvas de declínio de massa em função do tempo de operação, para três temperaturas distintas. As três funções apresentam comportamento semelhante, tendo perdas significativas até 200 minutos (3h20 min) seguidas de perdas menos significativas e uma tendência de equilíbrio até o fim do experimento, após 390 minutos (6h30 min).

Conforme sugere o estudo do autor FERNANDES *et al* (2014), a maior temperatura de operação (105°C) também foi responsável por remover a maior quantidade de água do grão, sendo possível observar o brusco declínio de massa da amostra até 200 minutos de secagem, seguida de uma tendência de estabilização. O mesmo artigo sugere um comportamento menos discrepante entre a menor temperatura e a temperatura intermediária, assim como pôde ser observado no gráfico.

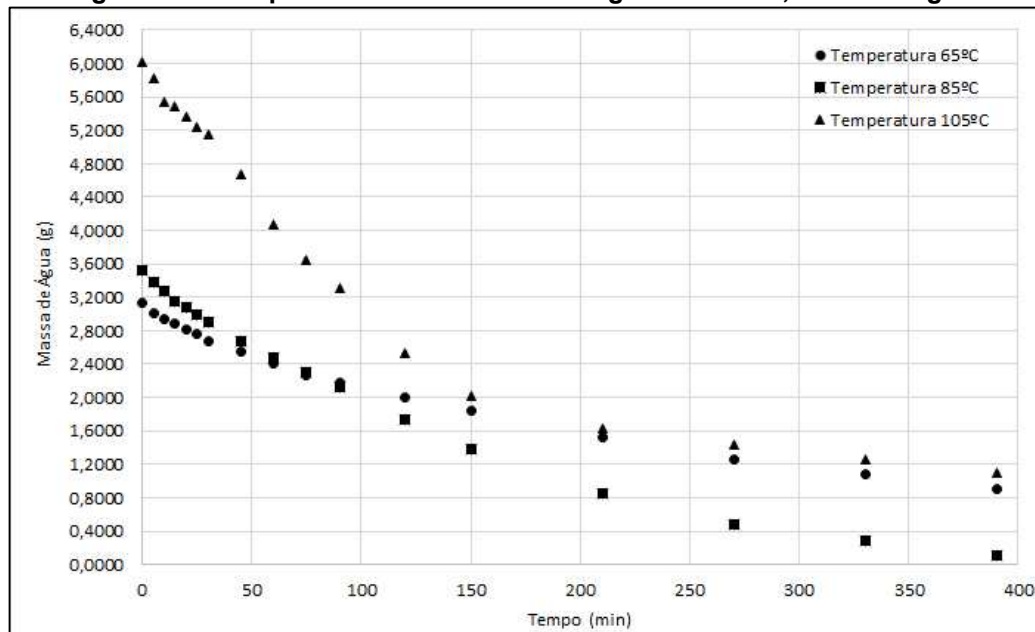
De maneira geral, observou-se que o aumento da temperatura resultou em uma diminuição do tempo de secagem, evidenciando a maior rapidez na retirada de água. Este fato ocorreu devido ao aumento da disponibilidade de energia para a vaporização da massa líquida. (FERNANDES *et al*, 2014)

Embora o experimento mostre que a maior temperatura apresentou um melhor desempenho, é importante ressaltar que, quando se trata de secagem de grãos, os estudos científicos sugerem a utilização de temperaturas menores, uma vez que o uso de temperaturas elevadas pode alterar a fisiologia das sementes, resultando na desnaturação da proteína, a qual é a propriedade de maior interesse comercial para a indústria. (RESENDE, 2010)

A origem da deterioração fisiológica produzida por elevadas temperaturas é a desestruturação das membranas celulares da soja por alterações nos lipídeos que as constituem. (DANIELL *et al*, 1969). Os prejuízos térmicos às sementes de soja promovem, entre outras alterações, a ruptura em ligações peptídicas proteicas e outros componentes celulares. (HERTER e BURRIS, 1989).

A figura 10 representa o comportamento da massa de água das tabelas 2, 3 e 4 em função do tempo de operação.

**Figura 10 - Comportamento da Massa de Água durante 6,5h de secagem**



Fonte: Autora (2022)

As umidades iniciais dos grãos variaram entre 6% e 12% para o mesmo cultivar. Esta variação está associada a quantidade de água distinta que foi removida para uma mesma base de grãos. O ideal seria padronizar a secagem a 105°C por 24 horas para se obter a massa sólida dos grãos.

No gráfico da figura 10 é possível observar a mesma tendência de declínio presente no gráfico da figura 9, mas agora para a massa de água. Nota-se também a mesma variação brusca de massa para a maior temperatura até 150 minutos de operação. A partir deste ponto, nota-se variações menores de massa, seguida de uma tendência de estabilização.

Diferentemente do que se esperava, as curvas das temperaturas de 65°C e 105°C comportaram-se de maneira semelhante após 150 minutos de secagem, enquanto que a curva da temperatura de 85°C comportou-se de maneira discrepante das outras duas e promoveu a maior variação de massa de água. Este fato também está associado ao controle de temperatura do equipamento que não foi muito efetivo durante a realização da experiência.

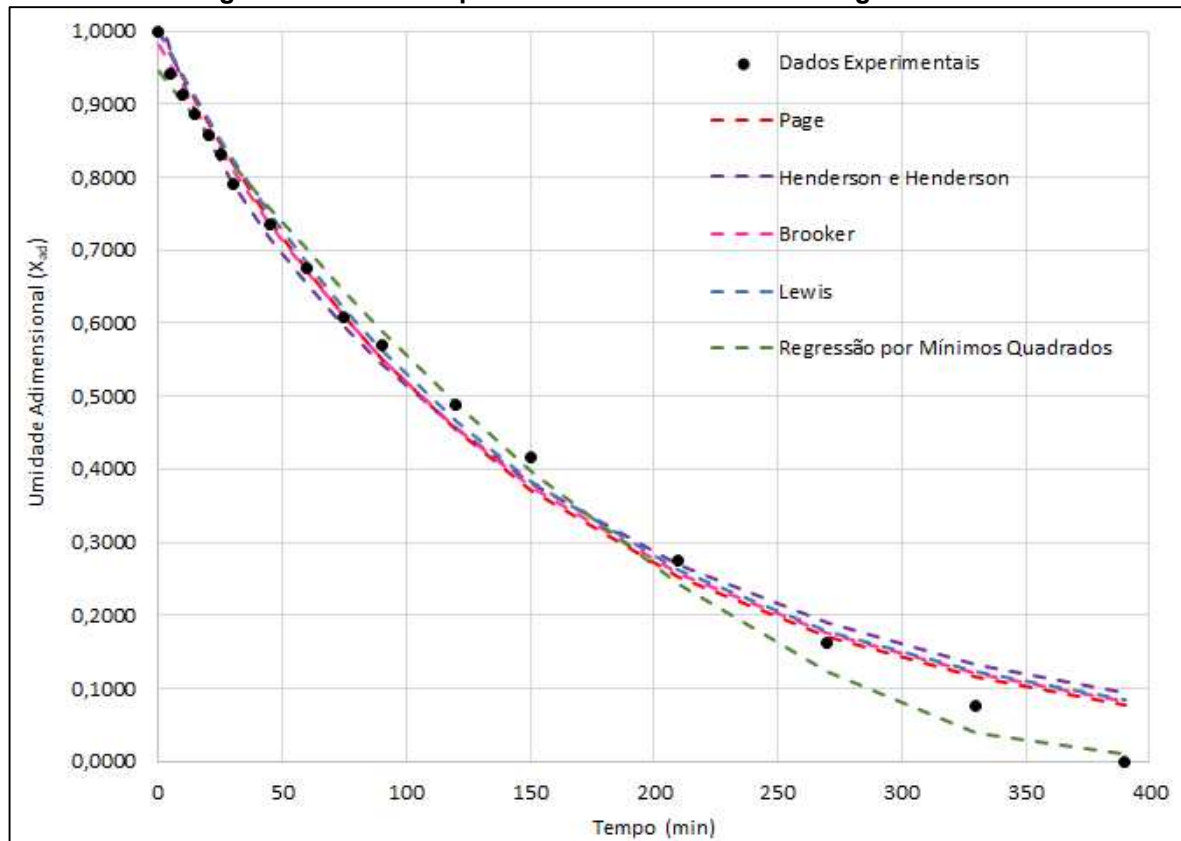
Apesar das adversidades durante a realização dos três ensaios, pôde-se observar a tendência de estabilização da massa de água durante a operação, mostrando que a metodologia escolhida foi eficiente e de acordo com aquilo que era previsto pela literatura científica. Também foi verificado que não é preciso secar a soja em 24h para obter um material livre de umidade.

## 5.2 Modelos cinéticos de secagem de grãos de soja

A partir dos dados apresentados nas tabelas 2, 3 e 4 foi possível construir as curvas da cinética de secagem dos grãos de soja e ajustá-las aos modelos das equações 4 a 8. Também foi possível encontrar valores de  $R^2$  e erro médio relativo gerado em cada ajuste.

As figuras 11, 12 e 13 expressam o comportamento da umidade adimensional em função do tempo e como estes dados se ajustam aos modelos escolhidos nas temperaturas de 65°C, 85°C e 105°C, respectivamente.

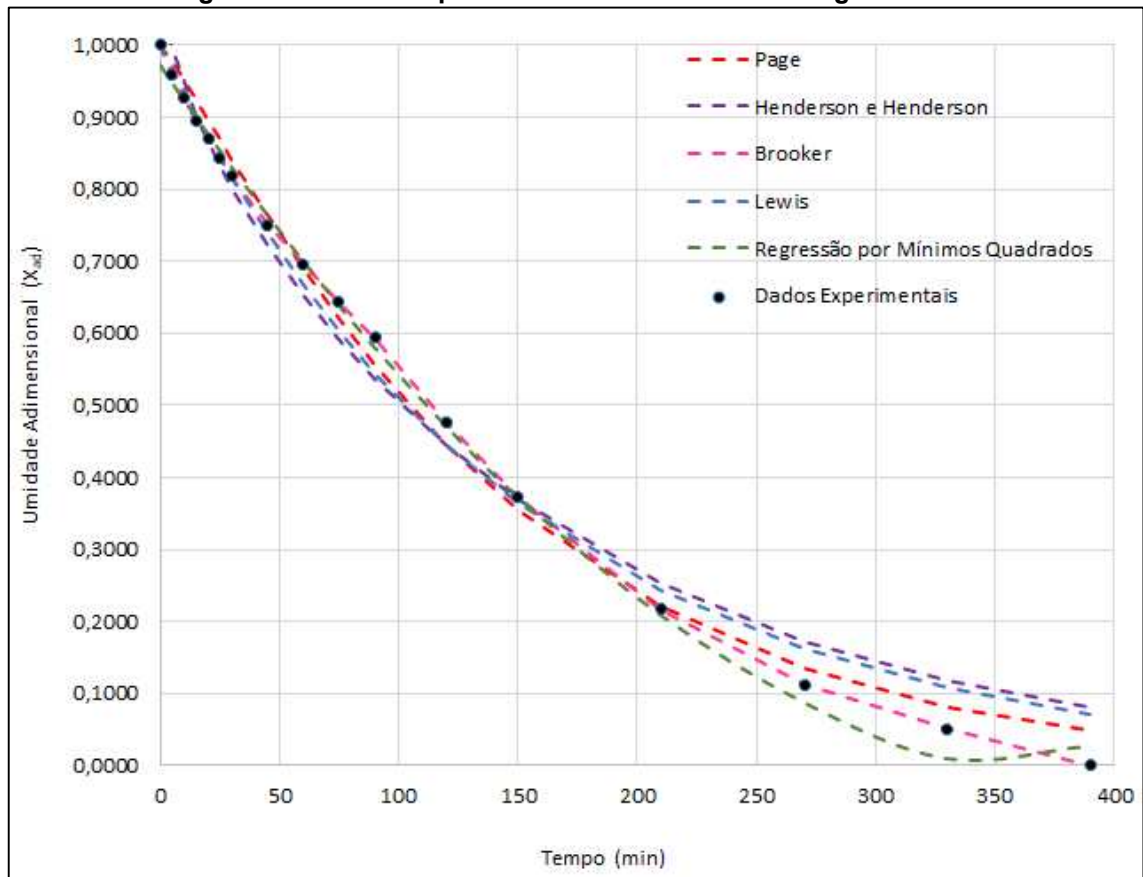
Figura 11 - Dados Experimentais e Modelos de Secagem a 65°C



Fonte: Autora (2022)

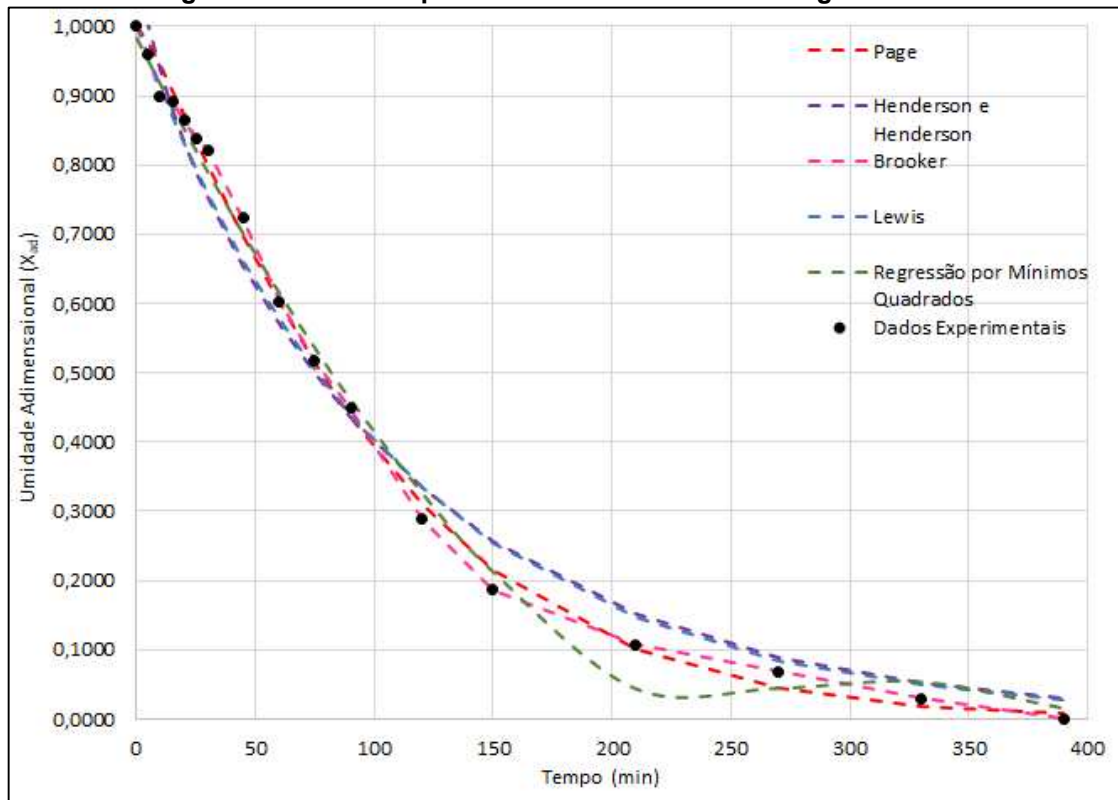


Figura 12 - Dados Experimentais e Modelos de Secagem a 85°C



Fonte: Autora (2022)

**Figura 13 - Dados Experimentais e Modelos de Secagem a 105°C**



Fonte: Autora (2022)

Através de uma análise das figuras 11, 12 e 13 é possível observar que todos os modelos comportaram-se de maneira muito similar nos primeiros 100 minutos de operação e, mostraram algumas discrepâncias após este período. Apesar disso, pelo comportamento do gráfico, é possível perceber a mesma tendência para todos os ajustes nas três temperaturas utilizadas no experimento.

Verifica-se também que os dados ajustaram-se de maneira muito parecida nas temperaturas de 65°C e 85°C. Nestes dois ensaios, é possível ver que a umidade é reduzida pela metade em tempos próximos de 100 minutos de operação, seguida de variações significativas entre 100 minutos e 300 minutos e uma tendência de estabilização entre 300 minutos e 390 minutos de secagem. Já no terceiro ensaio, utilizando uma temperatura de 105°C, notou-se que a umidade adimensional foi reduzida a 50% em um tempo menor, cerca de 75 minutos. Entre 75 minutos e 270 minutos notou-se uma redução ainda expressiva da umidade, seguida de uma tendência de equilíbrio a partir de 270 minutos.

Alguns estudos científicos, como o de MILANE *et al* (2015), avaliam a influência da temperatura de secagem na qualidade de grãos de soja e, sugerem que

a unidade adimensional das amostras diminui à medida que se eleva a temperatura de operação, similar ao que ocorre neste estudo de caso.

A tabela 5 apresenta uma síntese do  $R^2$  e do erro médio relativo encontrado em cada modelo nas temperaturas de operação de 65°C, 85°C e 105°C.

**Tabela 5 - Valores de  $R^2$  e erro experimental em cada temperatura**

Modelo	T = 65°C		T = 85°C		T = 105°C	
	$R^2$	EMR (%)	$R^2$	EMR (%)	$R^2$	EMR (%)
Regressão por Mínimos Quadrados	0,9930	16,1559	0,9973	37,7951	0,9947	22,9025
Brooker	0,9920	10,6830	0,9939	13,5050	0,9922	13,8922
Page	0,9910	11,0097	0,9903	13,4367	0,9973	15,2164
Lewis	0,9904	11,1177	0,9901	11,6194	0,9899	15,5669
Henderson e Henderson	0,9885	11,6727	0,9830	15,3312	0,9839	17,2394

**Fonte: Autora (2022)**

O autor MÖHLER (2014) fez uma avaliação de secagem de soja em secadores industriais que resultou em valores de  $R^2$  na faixa de 0,9120 a 0,9970, com erros médios relativos entre 0,73% a 3,48%, com diferentes valores de velocidade de ar. Apesar das condições operacionais um pouco distintas, este estudo de caso obteve resultados semelhantes para  $R^2$ , diferindo apenas nos valores de EMR. Os parâmetros estimados para cada modelo também foram comparados e os resultados podem ser observados na tabela 6, assim como o erro médio relativo.

**Tabela 6 - Parâmetros do Modelo de Page**

Temperatura (°C)	$K_{exp}$	$K_{calc}$	EMR (%)	$n_{exp}$	$n_{calc}$	EMR (%)
65	0,026	0,006	299,688	0,739	0,995	25,699
85	0,019	0,004	408,772	0,915	1,120	18,318
105	0,034	0,004	809,196	0,833	1,204	30,820

**Fonte: Autora (2022)**

**Tabela 7 - Parâmetros do Modelo de Lewis**

Temperatura (°C)	$K_{exp}$	$K_{calc}$	EMR (%)
65	0,0095	0,0064	48,4375
85	0,0088	0,0067	30,5028
105	0,0175	0,0067	159,5226

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 8 - Parâmetros do Modelo de Brooker**

Temperatura (°C)	$K_{exp}$	$K_{calc}$	EMR (%)	$Q_{exp}$	$Q_{calc}$	EMR (%)
65	0,0069	0,0059	16,9492	0,9665	0,9823	1,6085
85	0,0122	0,0068	79,4118	0,9820	1,0080	2,5794
105	0,0156	0,0097	60,8247	0,9946	1,0340	3,8104

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 9 - Parâmetros do Modelo de Henderson e Henderson**

Temperatura (°C)	$K_{exp}$	$K_{calc}$	EMR (%)	$Q_{exp}$	$Q_{calc}$	EMR (%)
65	0,0069	0,0068	1,4706	0,9202	0,8866	3,7898
85	0,9198	0,9447	2,6352	0,0137	0,0063	117,6283
105	0,9209	0,9696	5,0200	0,0135	0,0089	52,3210

Fonte: Autora (2022)

A análise das tabelas 5 a 9 permite inferir que o modelo de Henderson e Henderson, apesar de não ter o melhor  $R^2$  (0,9885) pode ser considerado o melhor ajuste na secagem a 65°C pois os parâmetros calculados e experimentais foram bem próximos, tendo um erro tolerável (EMR<5%).

Na sequência, para os ajustes a 85°C e 105°C, percebeu-se que o modelo mais adequado aos dados foi o de Brooker, que tem  $R^2 = 0,9939$  e  $R^2 = 0,9922$  para cada temperatura, respectivamente. Nos dois casos, o parâmetro k da equação de Brooker encontrado neste estudo diferiu muito do valor de referência do estudo de MÖHLER (2014), tendo erros relativos na faixa de 60%<EMR<80%, considerados muito altos. A explicação mais plausível para estas diferenças é a de que as condições de operação deste estudo de caso muito diferiram da experiência do autor MÖHLER (2014).

Ainda, a regressão por mínimos quadrados teve o maior valor de  $R^2$  nos dois primeiros ensaios (65°C e 85°C) e o segundo maior  $R^2$  no terceiro ensaio (105°C). Apesar disso, este método não pode ser comparado com outros estudos pois a maioria deles utilizava os modelos prescritos nas equações 4 a 8. É importante ressaltar que os modelos de Page, Lewis, Brooker e Henderson – Henderson descrevem o comportamento cinético de grãos de soja de forma geral e, por isso, há uma relativa discrepância entre o que se obteve neste estudo e o que foi demonstrado em outros experimentos.

### 5.3 Análise econômica e energética

Nos três ensaios, após aferir a corrente elétrica da estufa, foi possível estimar a potência utilizada e, posteriormente fazer o cálculo de custo do processo e a análise energética e econômica. Para estimar os dados financeiros levou-se em consideração os valores disponíveis no site da COPEL conforme as bandeiras tarifárias branca e convencional cobradas no estado do Paraná. Os dados de tarifas de quilowatt hora estão representados na Figura 15 para três períodos distintos.

Figura 94 - Distribuição tarifária do valor unitário do quilowatt no estado do Paraná

		TE (R\$/kWh)	TUSD (R\$/kWh)	
Convencional	Sem imposto	0,28890	0,26991	
	Com imposto	0,42991	0,40165	
<b>Fora de Ponta</b>				
Branca	Sem imposto	0,27536	0,21477	
	Com imposto	0,40976	0,31960	
	<b>Intermediário</b>			
	Sem imposto	0,27536	0,42883	
	Com imposto	0,40976	0,63814	
	<b>Ponta</b>			
	Sem imposto	0,43787	0,64288	
	Com imposto	0,65159	0,95667	

Fonte: COPEL (2022)

O site oficial da Companhia informa que:

- Os impostos que incidem sobre o consumo elétrico são: ICMS, PIS e CONFINS;
- As siglas TUSD e TE representam a tarifa de uso do sistema e a tarifa de energia, respectivamente e, são apresentadas de forma unificada na fatura para melhor entendimento do consumidor.

Para os cálculos de custo e consumo adotou-se um modelo de fábrica que opera de 2<sup>a</sup> a sábado, 24 horas por dia, durante 11 meses do ano.

Na tabela 10 tem-se uma síntese do consumo energético da operação, bem como da economia gerada ao reduzir o tempo de secagem.

Na tabela 11 tem-se uma síntese do custo anual da operação, bem como da economia gerada ao reduzir o tempo de secagem, considerando a bandeira tarifária convencional.

**Tabela 10 - Consumo e economia energética anual da operação de secagem**

Temperatura (°C)	Consumo anual ideal (kW)	Consumo anual real (kW)	Economia (kW)	Economia (%)
65	2393,4768	8837,4528	6443,9760	72,9167
85	2510,508	9269,568	6759,0600	72,9167
105	2865,3768	10579,8528	7714,4760	72,9167

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 11 - Custo e economia anual da operação de secagem considerando bandeira convencional**

Temperatura (°C)	Custo anual ideal (R\$)	Custo anual real (R\$)	Economia (R\$)	Economia (%)
65	1990,42	7349,23	5358,81	72,9167
85	2087,74	7708,57	5620,83	72,9167
105	2382,85	8798,21	6415,36	72,9167

Fonte: Autora (2022)

Nas tabelas 12, 13 e 14 tem-se uma síntese do custo anual da operação, bem como da economia gerada ao reduzir o tempo de secagem, considerando a bandeira tarifária branca, em três períodos de tempo distintos (fora de ponta, intermediário e de ponta).

**Tabela 12 - Custo e Economia Anual da Operação de Secagem no horário fora de ponta**

Temperatura (°C)	Custo anual ideal (R\$)	Custo anual real (R\$)	Economia (R\$)	Economia (%)
65	1746,04	6446,92	4700,88	72,9167
85	1831,42	6762,15	4930,73	72,9167
105	2090,29	7718,00	5627,71	72,9167

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 13 - Custo e Economia Anual da Operação de Secagem no horário intermediário**

Temperatura (°C)	Custo anual ideal (R\$)	Custo anual real (R\$)	Economia (R\$)	Economia (%)
65	2492,09	9201,56	6709,47	72,9167
85	2613,94	9651,47	7037,53	72,9167
105	2983,43	11015,74	8032,31	72,9167

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 14 - Custo e Economia Anual da Operação de Secagem no horário de ponta**

Temperatura (°C)	Custo anual ideal (R\$)	Custo anual real (R\$)	Economia (R\$)	Economia (%)
65	3849,43	14213,28	10363,85	72,9167
85	4037,65	14908,25	10870,60	72,9167
105	4608,39	17015,58	12407,19	72,9167

Fonte: Autora (2022)

Em síntese, os cálculos feitos estimaram uma economia anual de 72,92% aproximadamente para o consumo energético e o custo operacional nos três ensaios, conferindo a este estudo viabilidade econômica e aplicabilidade. Sendo assim, o aspecto econômico deste processo não será decisivo na escolha das melhores condições operacionais.

#### 5.4 Matriz S.W.O.T

Para realizar uma avaliação estratégica, ilustrou-se uma matriz SWOT. Esta ferramenta é útil na avaliação dos ambientes externos e internos de uma empresa e, neste estudo de caso, identificou-se os pontos fortes e fracos de se realizar a secagem dos grãos de soja em um tempo de operação inferior, assim como as oportunidades e ameaças associadas a mudança do parâmetro de processo.

Figura 105 - Matriz SWOT



Fonte: Autora (2022)



## 6 CONCLUSÃO

Em síntese, o experimento pode ser considerado bem sucedido e aplicável tanto na EMBRAPA quanto em outras empresas do segmento agrícola. Os dados experimentais obtidos ajustaram-se muito similarmente aos modelos previstos pelos autores Page, Brooker, Lewis e Henderson e, também pela regressão por mínimos quadrados sendo o valor de  $R^2$  superior a 0,98 em todos os casos. Uma avaliação mais precisa considerando  $R^2$  e EMR (do modelo e dos parâmetros) considera que os melhores resultados foram: i) o modelo de Henderson para 65°C, com  $R^2 = 0,9885$  e  $1,4706 < EMR < 11,6727$  e ii) o modelo de Brooker para 85°C e 105°C, com  $R^2 = 0,9939$ ,  $2,0000 < EMR < 80,0000$  e  $R^2 = 0,9932$  e  $5,0000 < EMR < 52,0000$ , respectivamente. Os valores discrepantes observados para os parâmetros podem ser explicados pelas diferenças de operação do estudo de MÖHLER(2014) e este experimento, sendo que no primeiro caso, a secagem foi realizada em secadores industriais, com variação na velocidade de ar e temperaturas ligeiramente distintas e, no segundo caso, utilizou-se apenas uma estufa de secagem, sem circulação forçada de ar. O custo operacional e energético também foi estimado levando em consideração as bandeiras tarifárias aplicadas no estado do Paraná e, os resultados obtidos variaram de acordo com os tempos de operação, 6,5h e 24h. A economia calculada após a redução do tempo de secagem foi idêntica nos três casos (72,92%) sendo, portanto, o aspecto econômico um fator não decisivo para escolha das melhores condições de operação. Ademais, alguns estudos na área de secagem indicam o uso de temperaturas de operação reduzidas pois elas mantêm a qualidade desejada do grão sendo, portanto, a temperatura de 65°C a melhor escolha para o processo já que é a mais baixa. A proposta de otimizar as condições de cinética de secagem de grãos de soja foi cumprida com sucesso e mostrou-se economicamente viável se aplicada industrialmente.

### 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar mais testes experimentais para conferir a eficácia desta metodologia e identificar oportunidades de otimização.
- Executar o experimento em temperaturas mais baixas como 45°C e 25°C e avaliar se os dados obtidos são similares aos resultados deste experimento.

- Avaliar o consumo energético com mais precisão, uma vez que os valores encontrados neste estudo de caso foram uma média de várias aferições ao longo de um certo tempo.
- Estudar maneiras mais eficientes de se controlar a temperatura de operação da estufa uma vez que esta atingiu até 1°C a mais do que era ajustado no sensor de temperatura. O uso de sensores mais tecnológicos ou em maiores quantidades também atenuaria a discrepância no controle interno de calor do equipamento.
- Desenvolver estudos na área de sorção para avaliar o quanto a umidade da soja seria recuperada após um certo tempo, impactando diretamente na forma de armazenamento dos grãos.
- Fazer ensaios de armazenamento com os grãos para verificar se as condições estabelecidas pela literatura científica são de fato atendidas em casos reais e como otimizá-las.
- Promover ensaios que avaliem a qualidade nutricional dos grãos após a secagem.

## REFERÊNCIAS

- AG Produtos para Laboratório. **Estufa de Secagem e Esterilização**. Disponível em: <[aglab.com.br/plus/modulos/catalogo/verProduto.php?cdcatalogoproduto=360](http://aglab.com.br/plus/modulos/catalogo/verProduto.php?cdcatalogoproduto=360)> Acesso em 15 de maio de 2022.
- BARROZO, M. A. S. *et al.* **The use of the orthogonal collocation method on the study of the drying kinetics of soybean seeds**. Journal of Stored Products Research, v. 42, n. 3, p. 348–356, 2006.
- BIAGI, J. D.; BERTOL, R., 2002. **Secagem de Grãos**. In: Seminário Armazenamento e Preparo de Grãos, Piracicaba - SP, 2002.
- CELESTINO, S. M. C. **Princípios de Secagem de Alimentos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, Planaltina-DF, 2010.
- COLEÇÃO SENAR – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Armazenamento com Sistema de Secagem Convencional**. 2018.
- CONAB. **Acompanhamento safra brasileira. Grãos. Safra 2020/21.12º Levantamento**. 2021
- COPEL. **Tarifas de Energia Elétrica**. Disponível em:<:[www.copel.com/site/copel-distribuicao/tarifas-de-energia-eletrica/#grupoA?utm\\_source=taxas-tarifas&utm\\_medium=grupoA&utm\\_campaign=menu-lateral](http://www.copel.com/site/copel-distribuicao/tarifas-de-energia-eletrica/#grupoA?utm_source=taxas-tarifas&utm_medium=grupoA&utm_campaign=menu-lateral)> Acesso em 09 de maio de 2022.
- DANIELL, J.W.; CHAPPELL, W.E.; COUCH, H.B. **Effect of sublethal and lethal temperatures on plant cells**. Plant Physiology, v.44, p.1684-1689, 1969.
- DEMARCHI, M. **Análise da conjuntura agropecuária safra 2011/12**. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento Departamento de Economia Rural, 2011.
- FELLOWS, P. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e práticas**, 2º edição. Porto Alegre: Artmed, 2006.
- FERNANDES, H. P.C, CORADI, P.C., HELMICH, C. J. **Influência do teor de água inicial na cinética de secagem de grãos de soja**. XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campo Grande – MS, 2014.

- FERREIRA, V. S. **Cinética de Secagem e Caracterização Física e Química dos Grãos de Soja**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde – GO, 2022
- FOUST, A. S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. **Princípios das operações unitárias**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.
- GABAS, A. L. **Secagem de Uva Itália em Leito Fixo**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.
- GUILHERME, G. L. **Modelagem da secagem de grãos de soja utilizando modelos de contornos móveis**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão – PR, 2018.
- JÚNIOR, A. O. **Diagnóstico da Produção de Soja na Macrorregião Sojícola 1**. Embrapa Soja, 2019.
- HERTER, U.; BURRIS, J.S. **Effect of drying rate and temperature on drying injury of corn seed**. Canadian Journal of Plant Science, v.69, n.3, p.763-774, 1989.
- KAGAWA, A. (Ed.). **Standard table of food composition in Japan**. Tokyo: University of Nutrition for women, 1995.
- LUZ, G. R. **Avaliação de estratégias de operação e de controle da secagem industrial do farelo de soja**. Universidade Estadual de Maringá, Maringá – PR, 2006.
- LUZ, G. R. **Modelagem Matemática e Análise do Secador Rotativo de Farelo de Soja**. Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR, 2006.
- MARCINKOWSKI, A. E. **Estudo da cinética de secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada da soja**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2006.
- MARTINS, *et al.* **Drying: a review**. The Journal of Engineering and Exact Sciences, v. 6, n. 4, 2020.
- MILANE, L. V, *et al.* **Influência da Temperatura do Ar de Secagem e dos Teores de Água Iniciais na Qualidade de Grãos de Soja**. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul – MS, 2015.

- MIRANDA, L.C.; SILVA, W.R.; CAVARIANI, C. **Secagem de sementes de soja em silo com distribuição radial do fluxo de ar**. I. Monitoramento físico. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.34, n.11, p. 2097-2108, 1999.
- MÖHLER, C. B. **Avaliação das características de cinética de secagem de grãos de Soja**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2010.
- MORAES, M.L.B de. **Comportamento da pressão estática e da frente de secagem em uma coluna de sementes de arroz**. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, 2000.
- NOVA INSTRUMENTS. **Estufa de Secagem e Esterilização**. Manual de Instruções e Termo de Garantia, 2022.
- PANIC! AT THE DISCO. **High Hopes**. Disponível: < <https://www.lettras.mus.br/panic-at-the-disco/high-hopes/traducao.html>> Acesso em 30 de maio de 2022.
- PEREIRA, T. L. L, *et al.* **Modelagem matemática da secagem de grãos de soja**. XLII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campo Grande – MS, 2014
- PINHO, M. S. **Secagem intermitente: velocidade de secagem, desempenho energético e qualidade de sementes de soja**. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, 2009.
- RESENDE, O.; FERREIRA, L.U.; ALMEIDA, D. P. **Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*)**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.12, n.2, p.171-178, 2010.
- Revista Cultivar. **Secador de Fluxo Contínuo**. Edição 153, Cultivar Máquinas, 2015. Disponível em <<https://revistacultivar.com.br/artigos/como-armazenar-corretamente>> Acesso em 28 de maio de 2022.
- RUIVO, T. D. **Secagem de soja: determinação da difusividade e da porosidade do grão**. Universidade Estadual de Maringá, Maringá – PR, 2018.
- SANTOS, C. D. **Avaliação das melhores condições de secagem de grãos visando à manutenção do teor de proteínas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2013.
- SILVA, P. L. **Cinética de secagem e propriedades termodinâmicas dos grãos de soja**. Instituto Federal Goiano, Ceres – GO, 2019.

TADINI, *et al.* **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**. LTC, 1ª Edição. Rio de Janeiro, 2016.

UFGRS. **Secador do tipo bandeja**. Disponível em: <[www.ufrgs.br/alimentus1/objetos/veg\\_desidratados/c\\_bandeja.html](http://www.ufrgs.br/alimentus1/objetos/veg_desidratados/c_bandeja.html)> Acesso em 10 de maio de 2022.

VILELA, F.A. **Efeitos de secagem intermitente sobre a qualidade de sementes de milho**. Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 1991.

WWF Brasil. **Soja**. Disponível em: <[www.wwf.org.br/natureza\\_brasileira/reducao\\_de\\_impactos2/agricultura/agr\\_soja/](http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/agricultura/agr_soja/)> Acesso em 15 de maio de 2022.