

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE E DO CONSUMO ENERGÉTICO NO
PROCESSO DE SECAGEM INTERMITENTE EM SEMENTES DE SOJA**

Camila Andressa Bissaro

Eng^a de Alimentos, UTFPR- CM, 2016

Orientador: Prof. Dr. Luiz Mário de Matos Jorge

Coorientador: Prof. Dr. Diogo Francisco Rossoni

Dissertação de Mestrado
submetida à Universidade
Estadual de Maringá, como
parte dos requisitos necessários
à obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia de Alimentos,
área de concentração:
Engenharia de Processos e
Produtos na Indústria de
Alimentos.

Maringá – PR – Brasil

Março de 2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Esta é a versão final da dissertação de Mestrado apresentada por Camila Andressa Bissaro
perante a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Engenharia de Alimentos em 16
de março de 2018.

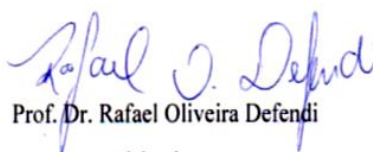
COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dr. Luiz Mário de Matos Jorge
Orientador



Prof. Dr. Diogo Francisco Rossoni
Coorientador



Prof. Dr. Rafael Oliveira Defendi
Membro



Prof.ª Dr.ª Rita de Cássia Bergamasco
Membro

Dedico aos meus pais e a todos que de alguma forma possam enriquecer-se com este estudo.

AGRADECIMENTOS

A **DEUS** pela dádiva da vida, pelo dom da inteligência e por nessa etapa de minha vida me ensinar que a paciência e a obediência são o caminho para a vitória.

A minha **FAMÍLIA**, em especial aos meus pais e minha irmã, que nunca falharam em suas funções, por tanto apoio, suporte financeiro e psicológico, ensinamentos e confiança. A minha avó Maria e aos meus tios que foram essenciais para a realização desse sonho, e ao meu querido cunhado Guilherme Palmieri. Essa vitória é inteiramente nossa.

Ao meu namorado Lucas Santos, por acolher-me nas dificuldades e vibrar nas minhas vitórias, por ensinar-me a nunca perder a minha essência e acreditar nas minhas capacidades. Insubstituível em mais essa conquista, sou eternamente grata a você e a sua família. Essa conquista é sua também.

Minha sincera gratidão aos meus orientadores, Dr. Luiz Mário e Dr. Diogo Rossoni, pela oportunidade concebida, por tanto ensinamento, confiança e enriquecimento nesse estudo. Além da contribuição essencial do Dr. Rafael Defendi, agradeço a paciência, disponibilidade e profissionalismo.

Ao Dr. Alessandro Lucca Braccini e ao seu orientando Me. Lucas Caiubi, por tamanha prontidão e aporte para a realização dos testes fisiológicos das sementes.

Aos verdadeiros amigos que fiz durante a vida e fizeram-se presentes, e aos novos, em especial ao Gustavo Matias, pela cumplicidade e contribuição durante essa caminhada.

Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro.

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE E DO CONSUMO ENERGÉTICO NO PROCESSO DE SECAGEM INTERMITENTE EM SEMENTES DE SOJA

AUTOR: CAMILA ANDRESSA BISSARO

ORIENTADOR: PROF. DR. LUIZ MÁRIO DE MATOS JORGE

COORIENTADOR: PROF. DR. DIOGO FRANCISCO ROSSONI

Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Alimentos; Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, BL. 13 - 07; CEP 87020-900 - Maringá – PR, Brasil, defendida em 16 de Março de 2018. 80 p.

RESUMO

A secagem de sementes constitui numa operação essencial na cadeia produtiva da soja, promovendo uma redução na umidade do produto a um nível seguro de armazenamento. Contrariamente à operação convencional, a secagem intermitente opera em condições transientes durante o processo de secagem, além de ser uma operação alternativa que visa melhorar o processo em termos de rendimento, gasto energético e qualidade do material seco. Neste contexto, realizaram-se experimentos de secagem de sementes de soja (Monsoy 6410 IPRO) em operação convencional e intermitente, em leito fixo em camada delgada, comparando-as em relação ao comportamento cinético, em termos de ajuste dos dados experimentais com modelos matemáticos empíricos, e análise do consumo energético das operações. Adicionalmente, a qualidade fisiológica das sementes secas de soja foram avaliadas em termos de germinação, vigor (comprimento de plântulas) e fissuras. Utilizou-se as temperaturas de ar de secagem de 50°C e 70°C, em ambas as operações, porém, a secagem intermitente consistiu-se em modular a temperatura e a vazão de alimentação em um período e amplitude específico, submetendo as sementes à ação do ar aquecido do secador (50 e 70 °C) a intervalos regulares de tempo (5,10 e 15 min), intercalados com a retirada das sementes e exposição ao meio ambiente (30°C), sem circulação de ar durante o mesmo intervalo de tempo, sucessivamente, até as sementes alcançarem uma umidade definida de armazenamento de 12%(b.s). O tempo de secagem efetivo foi reduzido sob operação intermitente, além de maior preservação na qualidade do material seco, influenciando diretamente na obtenção do melhor desempenho fisiológico das sementes em relação à operação convencional, exceto para a temperatura elevada do ar de secagem (70°C). Além disso, as modulações realizadas no processo intermitente, reduziram

significativamente o consumo de energia e o tempo efetivo do processo de secagem de sementes de soja.

Palavras chave: Secagem; intermitente; consumo energético; qualidade fisiológica; soja

ASSESSMENT OF QUALITY AND ENERGY CONSUMPTION IN THE PROCESS OF INTERMITTENT DRYING OF SOYBEAN SEEDS

AUTHOR: CAMILA ANDRESSA BISSARO

SUPERVISOR: Prof. Dr. LUIZ MARIO DE MATOS JORGE

COSUPERVISOR: Prof. Dr. DIOGO FRANCISCO ROSSONI

Master Thesis; Food Engineering Graduate Program; State University of Maringá; Av. Colombo, 5790, BL. 13 - 07; CEP 87020-900 - Maringá – PR, Brazil, presented on 16th March 2018. 80 p.

ABSTRACT

Seed drying constitutes an essential operation in the soybean production chain, promoting a reduction in the humidity of the product to a safe level of storage. Contrary to conventional operation, intermittent drying operates under transient conditions during the drying process, besides being an alternative operation that aims to improve the process in terms of yield, energy expenditure and quality of dry material. In this context, soybean seed (Monsoy 6410 IPRO) drying experiments were performed in conventional and intermittent fixed bed thin layer, comparing them in relation to the kinetic behavior, in terms of the adjustment of the experimental data with empirical mathematical models, and analysis of the energy consumption of the operations. Furthermore, the physiological quality of dried soybean seeds were evaluated in terms of germination, vigour (seedling length) and fissure. Drying air temperatures of 50°C and 70°C in both operations were used, however, intermittent drying consisted in modulating the temperature and feed rate over a specific period and amplitude, subjecting the seeds (50 and 70 °C) at regular intervals (5, 10 and 15 min), interspersed with seed withdrawal and exposure to the environment (30 °C) without air circulation during the same time interval, successively, until the seeds reach a defined storage humidity of 12% (d.b). The effective drying time was reduced under intermittent operation, as well as greater preservation in the quality of the dried material, directly influencing the better physiological performance of the seeds in relation to the conventional operation, except for the high temperature of the drying air (70°C). Moreover, the modulation performed in the intermittent process significantly reduced the energy consumption of soybean drying process.

Keywords: Drying; intermittent; energy consumption; physiological quality; soybean

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Percentuais de vigor e germinação da semente de soja na colheita em função do grau de umidade.....	22
Figura 2. Curva de secagem típica em condições constantes de secagem	24
Figura 3. Curva de taxa secagem típica para condições constantes de secagem.....	24
Figura 4. Tipos de Secagem Intermitente.....	30
Figura 5. Plântula normal de soja composta por todas estruturas essenciais	33
Figura 6. Plântula anormal de semente de soja	33
Figura 7. Modelo esquemático do secador de leito fixo.....	36
Figura 8. I- Esquema ilustrativo do secador de bandeja; II- Esquema utilizado para a secagem convencional e intermitente da semente de soja.....	37
Figura 9. Representação da secagem intermitente a 50°C no período de 5 minutos (representado pela letra p)	39
Figura 10. Representação da perturbação na vazão de secagem no período de 5 minutos (representado pela letra p)	39
Figura 11. Representação da secagem intermitente a 70 °C com tempo de perturbação de 5 minutos (representado pela letra p)	40
Figura 12. Representação do balanço de energia necessário para aquecer o ar do secador.	43
Figura 13. I - Contagem das plântulas normais que representam a PCG; II- Descarte das plântulas anormais (não viáveis); III- Sementes mortas.....	45
Figura 14. Curvas de secagem convencional da semente de soja a 30°C, 50°C e 70°C e vazão de alimentação de 1m.s ⁻¹	48
Figura 15. Curvas de secagem convencional de sementes de soja a 50°C e velocidade do ar de 1 e 2 m.s ⁻¹	50
Figura 16. Curvas de secagem intermitente da semente de soja a 50°C nos períodos de 5, 10 e 15 minutos, relacionados com as operações convencionais de 40°C e 50°C	51
Figura 17. Curvas de secagem intermitente da semente de soja a 70°C nos períodos de 5, 10 e 15 minutos, relacionados com as operações convencionais de 50°C e 70°C	53
Figura 18. Ajuste dos modelos de Midilli et al., Dois Termos e Aproximação de Difusão, respectivamente, para a temperatura do ar de secagem de 30°C.....	56
Figura 19. Ajuste dos modelos de Midilli et al., Dois Termos e Aproximação de Difusão, respectivamente, para a temperatura do ar de secagem de 50°C.....	56

Figura 20. Ajuste dos modelos de Midilli et al., Dois Termos e Aproximação de Difusão, respectivamente, para a temperatura do ar de secagem de 70°C.....	57
Figura 21. Histograma do resíduo versus frequência	59
Figura 22. Gráfico Q-Q Normal de resíduos	59
Figura 23. Representação da avaliação e contagem do teste de germinação. I) Avaliação das plântulas no 5 ^o dia após o início do teste (Primeira Contagem) -Secagem Convencional de 50°C. II) Contagem das plântulas normais no 5 ^o dia após o início do teste – Secagem I 50°C – 10 min. III) Representação da plântula normal, com todas características definidas (raiz primária e hipocótilo maior que 3 cm e presença de no mínimo 2 raízes secundárias). IV) Contagem das plântulas normais no 5 ^o dia após o início do teste – Secagem Intermitente 70°C – 10 min. V) Representação de plântulas anormais, descartadas da contagem final do teste de germinação.....	60
Figura 24. Medição da raiz primária e hipocótilo com o auxílio de uma régua milimétrica para se obter o comprimento total das plântulas normais.....	62
Figura 25. Porcentagem de sementes de soja que desenvolveu-se em plântulas normais, anormais e sementes mortas, conforme a operação de secagem estabelecida.....	65
Figura 26. Resultado do teste de fissura realizado para as condições experimentais estabelecidas	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Umidade recomendada para armazenagem de sementes	21
Tabela 2. Modelos matemáticos empíricos e semi-empíricos	41
Tabela 3. Tempo de secagem efetivo ou líquido (min.) das secagens convencionais e intermitentes nos períodos (5,10 e 15 min.) e temperatura de ar de secagem de 50°C e 70°C	54
Tabela 4. Valores dos parâmetros estatísticos das secagens convencionais (30, 50 e 70°C)	55
Tabela 5. Análise de variância para o consumo energético (kJ).....	57
Tabela 6. Consumo energético (kJ) das secagens convencionais e intermitentes no período (5,10 e 15 min) na temperatura de ar de secagem de 50°C e 70°C	58
Tabela 7. Análise de variância para o Teste de Germinação	61
Tabela 8. Médias estimadas de plântulas normais do Teste de Germinação, para a secagem convencional e intermitente nas temperaturas de 50 ⁰ C e 70 ⁰ C e períodos 5,10 e 15 min ..	61
Tabela 9. Análise de variância para o teste de vigor: plântula total, hipocótilo e raiz	63
Tabela 10. Médias estimadas para avaliar o comprimento de plântula total (raiz primária + hipocótilo) em cm/plântula, em relação ao fator temperatura e o fator tempo.....	63
Tabela 11. Médias estimadas para avaliar o comprimento do hipocótilo em cm/plântula, em relação ao fator temperatura e o fator tempo	64
Tabela 12. Médias estimadas para avaliar o comprimento da raiz em cm/plântula, em relação ao fator duplo (temperatura: tempo)	64

NOMENCLATURAS

A	Área de seção transversal de escoamento	m
$b.s$	Base seca	$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{sólido seco}}^{-1}$
$b.u$	Base úmida	$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{total}}$
Cp_{ar}	Calor específico do ar	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$\frac{dU}{dt}$	Variação de energia no sistema	kJ/s^{-1}
$G.L$	Grau de liberdade	Adimensional
Q	Calor	kJ
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor	kJ/s ou kW
$T_{o ar}$	Temperatura inicial do ar	°C
$T_{f ar}$	Temperatura final do ar	°C
$\widehat{\Delta H}$	Entalpia específica	kJ.kg^{-1}
$\dot{m}$	Vazão mássica	kg.s^{-1}
n	Número de observações da amostra	Adimensional
p	Número de parâmetro do modelo	
R	Taxa de Secagem das sementes de soja	$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{sólido seco}}^{-1}.\text{s}^{-1}$
t	Tempo de exposição no secador	s
Δt	Variação de tempo	s
ΔX	Variação de concentração de uma espécie	$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{sólido seco}}^{-1}$
v_{ar}	Velocidade de escoamento do ar	m.s^{-1}
$\dot{v}$	Vazão volumétrica	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
$\hat{y}_l$	Estimativa de y_i	
y_i	i-ésimo valor da resposta	
Y_s	Umidade contida no material em base seca	$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{sólido seco}}^{-1}$
Y_{se}	Umidade equilíbrio do material em base seca	$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{sólido seco}}^{-1}$
Y_{so}	Umidade inicial do material em base seca	$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{sólido seco}}^{-1}$
YR	Umidade relativa	Adimensional
Letras Gregas		
ρ_{ar}	Massa específica do ar	kg.m^{-3}

Subscrito

o Inicial
e Equilíbrio
f Final

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Justificativa do problema.....	16
1.2 Objetivos.....	18

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Armazenamento e Secagem de Sementes.....	20
2.2 Métodos de Secagem.....	22
2.3 Cinética de Secagem.....	23
2.4 Aplicação e Obtenção dos Dados de Cinética de Secagem.....	26
2.5 Modelos Matemáticos para Secagem em Camada Delgada.....	27
2.6 Secagem Intermitente.....	29
2.7 Análise Energética.....	31
2.8 Análises da Qualidade das Sementes de Soja.....	32

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 Secagem: Equipamentos e Materiais.....	36
3.2 Procedimento Experimental.....	37
3.3 Modelos Matemáticos para Secagem em Camada Delgada.....	41
3.4 Análise Energética do Processo de Secagem.....	43
3.5 Avaliações da Qualidade Fisiológica das Sementes.....	44
3.5.1 Teste de Germinação.....	45
3.5.2 Teste de Vigor.....	45

3.5.2.1 Primeira Contagem da Germinação (PCG).....	45
3.5.2.2 Comprimento de Plântulas.....	45
3.6 Teste de Fissura.....	46
3.7 Análise Estatística.....	46

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1 Cinética, Ajuste e Consumo Energético.....	48
4.2 Avaliações da Qualidade Fisiológica das Sementes.....	60

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES GERAIS.....	67
----------------------------------	-----------

CAPÍTULO 6

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
--	-----------

CAPÍTULO 7

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
---	-----------

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa do problema

O estudo da secagem de sementes de soja torna-se cada vez mais importante, pois baseia-se em aspectos como a competitividade sobre o mercado externo e interno, o meio ambiente, a qualidade sobre o produto final e o consumo de energia. Esses fatores estão interligados e podem sofrer constantes mudanças. Com isso, a pesquisa e a procura por soluções para esses componentes são cada vez mais intensas.

A soja é valorizada por apresentar em sua composição elevado teor de óleo e de proteína, além de propriedades benéficas para a saúde humana, tornando-se a semente oleaginosa de maior interesse mundial. O Brasil é responsável por uma alta porcentagem na produção e exportação de soja, sendo um dos maiores na escala mundial. Tal produção reflete em grande importância comercial para a economia brasileira (GALÃO *et al.*, 2014).

Estimativas da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, (ABIOVE, 2018), apontam para um recorde tanto na produção da oleaginosa quanto na exportação desses grãos. De acordo com a entidade, o Brasil deverá produzir 114,7 milhões de toneladas de soja neste ano (2018), ou seja, 2,3% maior que o registrado no ano passado (2017). No caso das exportações, deve ser observado um recorde de 68 milhões de toneladas embarcadas em 2018, contribuindo significativamente para o desempenho da Balança Comercial Brasileira.

Dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, (EMBRAPA, 2017) revelam que na safra de 2016/17, os EUA tiveram uma excelente produção de soja, como média nacional, podendo atingir um rendimento próximo aos 3.500 kg.ha⁻¹, em uma área aproximada de 33,8 milhões de ha. A produção total deve chegar aos 117 milhões de toneladas, segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - USDA. Porém, a produção brasileira está muito próxima da americana, um dado relevante, no entanto, é o estado do Paraná, que obteve uma produtividade média recorde de 3.714 kg. ha⁻¹, em uma área de 5,25 milhões de ha ou seja, a produtividade média no Paraná foi superior à produtividade média americana em mais de 200 kg por ha na safra de 2016/17.

Essa elevada produtividade da cultura da soja é fruto da utilização de tecnologia

adequada, juntamente com a crescente pesquisa científica para obtenção de novas cultivares de maior eficiência produtiva e menor suscetibilidade às condições adversas que influenciam na qualidade dessa cultura (SILVA *et al.*, 2016).

Outro aspecto importante, é a responsabilidade com a qualidade final do produto, a qual tem reflexo direto no valor agregado do produto, na concorrência e satisfação do mercado consumidor, que está cada vez mais exigente e crítico.

A produção de sementes de alta qualidade representa uma das principais prioridades para o sucesso da cultura da soja. Essa tarefa, no entanto, é mais complexa em relação a outras plantas cultivadas, pois as sementes de soja caracterizam-se por grande sensibilidade aos agentes mecânicos, patogênicos e às condições climáticas. Desta forma, situações ligeiramente desfavoráveis para outras espécies podem contribuir significativamente para acelerar o processo de deterioração da soja (MARCOS FILHO *et al.*, 1985).

Segundo Bailey (1974), o armazenamento é um processo de extrema importância para a cultura da soja, visto que não basta só produzir bem, com qualidade e produtividade elevadas, já que a produção pode estragar ou ficar comprometida devido a um processo inadequado de armazenamento. Este autor ainda acrescenta, que por mais que utiliza-se de um alto nível de tecnologia disponível na agricultura brasileira, as perdas qualitativas e quantitativas, provenientes do processo de armazenamento, ainda não são bem controladas e, durante o armazenamento as sementes são constantemente submetidas a fatores externos, os quais podem ser físicos, como temperatura e umidade; químicos, como fornecimento de oxigênio; e biológicos, como bactérias, fungos, insetos e roedores. Com isso, um armazenamento seguro mantém os aspectos qualitativos e quantitativos das sementes, desfavorecendo as condições adversas que influenciam na qualidade final do produto.

Outro fator relevante, é o aumento do consumo e exploração incontrolável de recursos naturais e minerais do planeta, os quais reduzem a sustentabilidade do modelo de desenvolvimento utilizado e conseqüentemente agravam a qualidade de vida mundial. Para reverter essa situação, é necessário pensar na sustentabilidade ambiental, com o enfoque de atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade de gerações futura, contribuindo para que sejam utilizados de forma consciente os recursos naturais, os quais são finitos (CiBiogás, 2014). Atualmente, as pesquisas vêm contribuindo amplamente para o uso racional desses recursos.

Com isso, um dos setores que retrata este problema é a indústria de processamento da

soja, a qual consome grande quantidade de energia com as operações de Destilação da Miscela, de Dessolventização/Tostagem e da Secagem da soja. Uma estratégia visando a redução de custos e a proteção do meio ambiente, é procurar estabelecer sempre as melhores condições de operação, sendo que um dos meios mais utilizados é a otimização e controle, o qual emprega sistemas computacionais com softwares especializados (LUZ, 2006).

Biagi *et al.*, (2002), argumentam que o processo de secagem depende de uma alta demanda de energia calorífica e mecânica para o aquecimento e movimentação do ar, além do custo da operação ser significativo, devido à complexidade de energia necessária para o processo. Silva *et al.*, (2000), complementam que operar em temperaturas altas pode consumir 60% ou mais do total de energia usada na produção de produtos agrícolas.

Uma hipótese para redução dos custos do processo de secagem é a redução do gasto energético do processo, que pode ser alcançada pelo uso da operação intermitente, a qual opera com as condições do ar, como temperatura e vazão, em regime não estacionário, ao contrário da operação tradicional que opera com o ar em condições fixas em regime permanente. A secagem com entradas transientes pode beneficiar o processo de secagem potencializando os transportes de massa e de energia envolvidos no processo (DEFENDI *et al.*, 2016).

De acordo com Chua *et al.*, (2003), o regime intermitente é favorável para produtos onde o processo de secagem pode ser controlado por meio dos transportes difusivos interno que cada material a ser seco contém, como é o caso da soja. Quando opera-se com entradas transientes durante o processo de secagem, tal ação pode causar uma potencialização no transporte de massa e de energia no sistema, acelerando o processo.

Apesar dos avanços nas pesquisas, o estudo sobre a operação intermitente na secagem de sementes de soja é recente na literatura. Romero *et al.*, (2010) e Defendi (2013), são alguns dos autores que realizaram um estudo teórico no qual mostraram que a secagem intermitente de soja com modulações na temperatura pode ser mais eficiente e gastar menos energia que a secagem convencional.

Neste contexto, esse estudo visa explorar uma alternativa afim de preservar a qualidade fisiológica das sementes secas de soja destinadas ao armazenamento e na avaliação do consumo energético no processo de secagem.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste estudo é, avaliar o efeito que a secagem intermitente em leito fixo de camada delgada, com modulações na temperatura do ar de secagem e na vazão de alimentação em um período e amplitude específicos, podem proporcionar na qualidade da semente de soja e no consumo energético, em relação à operação convencional de secagem.

Outros objetivos inerentes a este objetivo central, relacionando as operações de secagem convencionais e as intermitentes, são:

- Analisar o levantamento da cinética de secagem de sementes de soja em camada delgada;
- Ajustar os dados experimentais obtidos no comportamento cinético das secagens, por meio de diferentes modelos matemáticos;
- Verificar e comparar o tempo de secagem efetivo em ambos métodos de secagem;
- Verificar para quais condições operacionais estabelecidas, ocorre o menor consumo de energia durante a operação de secagem;
- Avaliar a qualidade fisiológica das sementes secas, em termos de germinação, vigor e fissura;
- Avaliar o efeito que as condições experimentais propostas causam no desenvolvimento das sementes em: plântulas normais, anormais e mortas.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica abrangente, onde os principais temas abordados são: o armazenamento e a secagem de sementes de soja, os métodos de secagem utilizados, o comportamento cinético dos dados experimentais, além dos modelos matemáticos utilizados para as secagens convencionais em camada delgada, a secagem intermitente, o consumo energético necessário para as operações de secagens e as análises relacionada com a qualidade fisiológica das sementes de soja.

2.1 Armazenamento e Secagem de Sementes

Após a colheita, a soja é necessariamente armazenada de 6 a 8 meses, devido a sua produção ser sazonal e as demandas industriais serem contínuas (ZHAO *et al.*, 2014). A armazenagem pode ser considerada como o processo de acondicionar o produto, associada a uma sequência de operações, tais como limpeza, secagem, tratamento fitossanitário, transporte, classificação, dentre outros, com o intuito de preservar as qualidades físicas e químicas desde a colheita até o abastecimento (ELIAS, 2003).

Vale ressaltar que durante o armazenamento, as sementes não melhoram sua qualidade, no máximo a mantém. Logo, somente as boas práticas de armazenamento conservam a qualidade física e fisiológica das sementes (BAUDET e VILLELA, 2000). Höfs *et al.*, (2004), complementam que o armazenamento influencia as sementes, em relação ao potencial germinativo, a emergência e o desenvolvimento em plântulas normais, designado por vigor, o qual é inversamente proporcional ao processo de deterioração.

A deterioração é um somatório de diversos tipos de alterações que podem ocorrer durante o armazenamento, são elas: bioquímicas, fisiológicas (microrganismos, insetos, fungos), físicas (temperatura, teor de umidade, danos mecânicos), citológicas e sanitárias, sendo extremamente importante o controle e a minimização desses fatores. Essas alterações, ocorrem inicialmente na maturidade fisiológica da semente e evolui gradativamente, provocando a queda da qualidade, além da mudança na composição química, culminando na morte da semente (MARCOS FILHO, 2005).

Sementes com alto teor de umidade, apresentam baixa resistência mecânica, já na saturação, apresentam baixa elasticidade, porém em ambos os casos acarretam perdas

qualitativas. Portanto, o ponto ideal de colheita varia de produto para produto (BIAGI e BERTOL, 2002). Segundo Weber (2005), é intolerável o armazenamento das sementes sem ocorrer o rebaixamento da umidade original da colheita para um nível de umidade segura, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Umidade recomendada para armazenagem de sementes

Produto	Teor de umidade (% em base úmida)		
	Umidade colheita	Até 1 ano	Mais de 1 ano
Amendoim	15-18	8	7
Arroz em casca	18-20	13	12
Feijão	16-18	13	12
Milho	24-32	13	12
Soja	15-18	12	11
Sorgo	28-32	12	11
Trigo	18-20	13	12

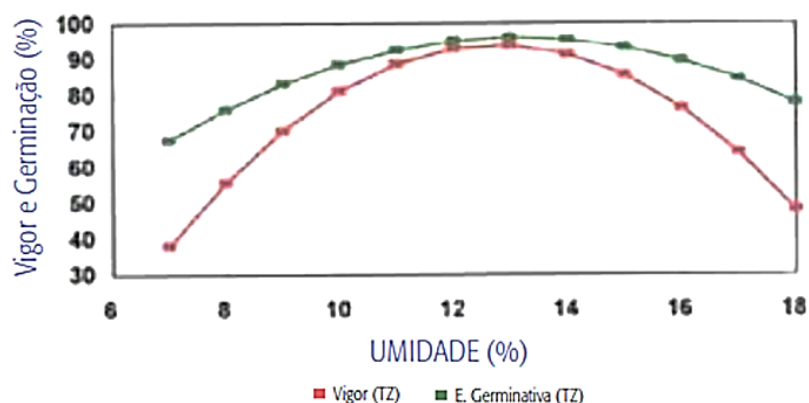
Fonte: Lazzari (1993)

De acordo com Puzzi (2000), o teor de umidade é o principal fator que determina a qualidade da semente estocada, além de ser o fator que mais evolui durante o armazenamento das sementes. Em valores baixos de umidade, as reações enzimáticas e as taxas de respiração, responsáveis pelo metabolismo das sementes e consequentemente a deterioração dessas, diminuem. Segundo Moreano *et al.*, (2011), a semente que suportou chuvas durante a pré-colheita e apresenta esse tipo de dano, perderá a sua germinação e o seu vigor em índices acentuados durante a armazenagem, devido principalmente à evolução dos índices desse fator.

Krzyzanowski *et al.*, (1997), recomendam que a umidade da semente esteja entre 13 e 15% (b.u). Semente com 12% ou menos, tenderá a apresentar danos mecânicos imediatos, caracterizados por fissuras, rachaduras e quebras. Semente com conteúdo acima de 15% é mais suscetível aos danos mecânicos latentes, caracterizados por amassamentos e abrasões. A Figura 1, representa o comportamento da umidade em relação a germinação e vigor das sementes de soja nessa faixa de umidade recomendada.

O controle do teor de umidade pode ser efetuado a partir da técnica de secagem, o qual tornou-se uma etapa essencial na cadeia produtiva da soja. O processo de secagem objetiva a retirada parcial da água do material, por meio de dois processos que ocorrem simultaneamente: a transferência de calor do ar para o material (semente) e a transferência de massa (água) do material para o ar (FOUST, 1982). A remoção da umidade deve ser

realizada de modo que as sementes alcancem o equilíbrio com o ar do ambiente onde será armazenada (SILVA *et al.*, 2000).



Fonte: Krzyzanowski *et al.*, (1997)

Figura 1. Percentuais de vigor e germinação da semente de soja na colheita em função do grau de umidade

A secagem é uma das técnicas mais utilizada e antiga para a conservação dos alimentos, pois tende a aumentar o *shelf-life* do produto, visto que muitos microrganismos como fungos e bactérias, não conseguem se multiplicar sem a presença de água. Além de contribuir para a redução dos custos de transporte e facilitar a mobilidade, devido à diminuição de volume do material (GEANKOPLIS, 1993).

Porém, a secagem excessiva pode contribuir para a deterioração do produto e o desperdício de energia, promovendo, a perda da cor, do cheiro, da estabilidade do valor nutricional e da textura, os quais influenciam na qualidade e no custo do produto final (LUZ, 2006).

Com isso, a secagem está diretamente relacionada com a qualidade do produto, quando mal conduzida pode causar a deterioração ou reduzir a qualidade, tornando-o mais susceptível à quebra ou diminuindo o rendimento nas etapas de processamento (REGINATO *et al.*, 2014).

2.2 Métodos de Secagem

A secagem das sementes pode ser feita de forma natural ou artificial. A secagem natural é caracterizada pela utilização da energia solar e eólica, afim de reduzir o teor de umidade da matéria. A vantagem desse método de secagem é que o material a ser seco quase não sofre risco de danificação mecânica e térmica, mas a eficiência está diretamente relacionada com às condições psicrométricas do ar ambiente, tornando-se um obstáculo para

a secagem natural (PUZZI, 2000).

Silva *et al.*, (2000), complementam que uma das grandes desvantagens da secagem natural no campo é que esta ocupa uma grande área por um vasto período de tempo, retardando as operações de preparo do solo para novo cultivo. Além disso, o produto fica sujeito ao ataque de pragas e ao tombamento de plantas que contribuem para acarretar grandes perdas e qualidade das sementes. Desta forma, geralmente a secagem natural não é capaz de levar as sementes a níveis ideais de umidade para armazenagem (BIAGI *et al.*, 2002).

A secagem de sementes mediante a ventilação forçada (artificial) promove mudanças nas condições do ar de secagem, com o intuito de retirar do produto o máximo de água possível, porém sem alterar as características qualitativas do material. No caso, o ar é aquecido e o material úmido é submetido em um secador à ação de uma corrente de ar, promovendo a transferência de calor e massa simultaneamente. Com isso, a secagem artificial permite reduzir rapidamente o teor de umidade das sementes recém-colhidas. Por outro lado, a secagem demanda muita energia mecânica para movimentação do ar e energia térmica para seu aquecimento, o que eleva o custo do processo. Porém, é amplamente adotada por razões de produtividade agrícola, ou até mesmo de disponibilidade de mão-de-obra (BIAGI e BERTOL, 2002).

O aumento da eficiência na colheita requer uma secagem mais rápida, com a adoção de temperaturas de secagem e vazões de ar mais elevadas. Entretanto, temperaturas altas reduzem a germinação e o vigor das sementes, podendo alterar suas características químicas e físicas. Esses danos causados nas sementes, estão relacionados com as condições da operação de secagem, além do conteúdo de água e da qualidade iniciais da semente, aliada aos aspectos genéticos (CHEN e BURRIS, 1991).

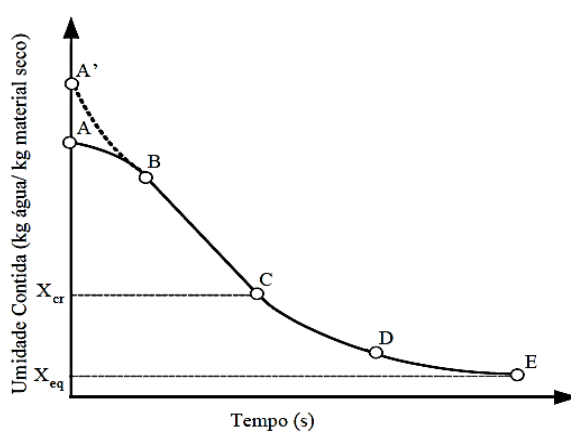
Qualquer sistema que envolve a movimentação das sementes, pode acarretar danos mecânicos a elas, com isso, é recomendado o uso de secadores de leito fixo. Neste tipo de secador, a semente permanece estática e o ar de secagem é forçado a passar através das sementes até que a umidade desejada seja atingida (SOUZA *et al.*, 2015).

2.3 Cinética de Secagem

Os estudos sobre a secagem sempre iniciam de comportamentos conhecidos ou típicos, por meio de métodos experimentais para a obtenção de dados, ou ainda, com a simulação

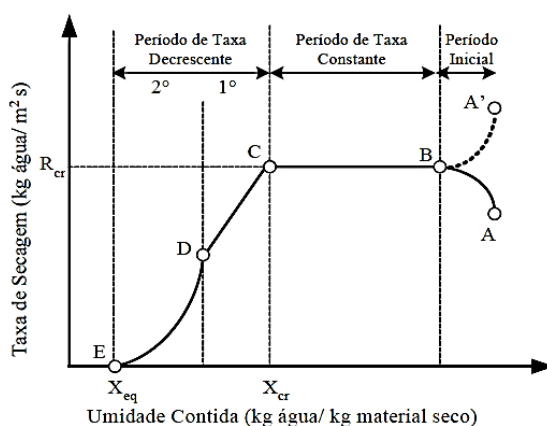
dos mesmos. Com isto, a cinética de secagem, as isothermas de equilíbrio, os mecanismos de transferência de massa e de calor constituem a base para entender o fenômeno (LUZ, 2006).

Segundo Foust *et al.*, (1982), a cinética de secagem tende a admitir o comportamento de um material sólido quando submetido à secagem, sob condições de temperatura e umidade relativa fixas. Esse comportamento tende a seguir um padrão, sendo representado por duas curvas: a curva de secagem (Figura 2), que permite conhecer o tempo gasto para secar a amostra, as umidades inicial e final do material; e a curva de taxa de secagem (Figura 3), que permite verificar com mais detalhes as variações de umidade, velocidade de secagem e noção da estrutura do material em estudo.



Fonte: Foust *et al.*, (1982)

Figura 2. Curva de secagem típica em condições constantes de secagem



Fonte: Foust *et al.*, (1982)

Figura 3. Curva de taxa de secagem típica para condições constantes de secagem

Foust *et al.*, (1982) complementam que os períodos do processo de secagem podem ser representados por segmentos de curva, conforme as Figuras 2 e 3; os segmentos AB e A'B das curvas, são responsáveis por representarem o período inicial de secagem, o

segmento BC representa o período de taxa constante, os pontos entre C e D representa o primeiro período de taxa decrescente, e o segmento DE da curva representa o segundo período de taxa decrescente. Ainda de acordo com estes autores, é possível uma descrição mais detalhada das diferentes fases da secagem, conforme descrito a seguir:

I) Período inicial de secagem

Neste período, as fases sólida e gasosa envolvidas tendem a aproximarem à uma condição de equilíbrio entre as suas temperaturas, podendo comportar-se de acordo com as curvas AB ou A'B, conforme nas Figuras 2 e 3, respectivamente. No primeiro caso (AB), o sólido recém entrou em contato com o meio secante e possui uma temperatura mais baixa que a dele, sendo representado pelo ponto A, mas no instante que entra em contato com o fluido, absorve calor sensível, promovendo um aumento na sua taxa de evaporação, até chegar no ponto B. No segundo caso (A'B), o meio secante está a uma temperatura mais baixa que a do sólido e absorve calor sensível deste, fazendo com que a taxa de secagem do sólido diminua até chegar em B.

Em B, a temperatura da superfície da amostra entra num valor de equilíbrio com a temperatura do fluxo do ar-vapor. Porém, alguns sólidos podem não apresentar o período inicial, podendo ser ignorado em algumas análises.

II) Período de taxa de secagem constante

É o período caracterizado pelo segmento BC da curva, em que a taxa de secagem permanece constante com a diminuição da umidade no sólido. Em B, o sólido está saturado de água e a secagem ocorre como se fosse a evaporação de uma massa de líquido, ou seja, esse filme de água é completamente não ligada e não apresenta nenhum tipo de resistência, com isso, não há influência direta do sólido na taxa de secagem, conforme GEANKOPLIS, 1993.

Além disso, as temperaturas do interior do sólido umidificado tendem a ser iguais à temperatura de bulbo úmido do meio secante e, estas permanecem estáveis, bem como as taxas de secagem, até chegar ao ponto C, chamado de ponto crítico da curva em que o material sólido apresenta um teor de umidade crítico (FOUST *et al.*, 1982)

III) Primeiro período de taxa decrescente

Este período é caracterizado pelo segmento CD da curva das Figuras 2 e 3, em que

no ponto C, à superfície fica mais “pobre” em líquido, pois a velocidade do movimento do líquido para a superfície é menor que a velocidade com que a massa é transferida da superfície, tal fato se deve a temperatura da superfície se elevar, enquanto a taxa de secagem cai rapidamente com o tempo, até secar completamente no ponto D (GEANKOPLIS, 1993; TREYBAL, 1980).

IV) Segundo período de taxa decrescente

Este período é caracterizado pelo segmento DE da curva das Figuras 2 e 3, onde em teores de umidade mais baixos que os do ponto D, toda a evaporação ocorre a partir do interior do sólido e com isso a evaporação ocorre lentamente na superfície, começando no ponto D e terminando em E; sendo E denominado de umidade de equilíbrio e constitui a menor umidade atingível quando um material sólido passa pelo processo de secagem sob condições constantes de pressão e temperatura.

Neste período, o calor de evaporação é transferido para o sólido por meio da zona de vaporização e o movimento da umidade se faz de dentro do sólido em direção ao gás. De acordo com Treybal (1980), esse movimento da umidade deve-se a gradientes de concentração de umidade entre a superfície e a parte interna do sólido.

Dependendo do material sólido, pode ser que este período não exista ou pode haver somente um período de taxa decrescente, pois esta taxa depende das propriedades físicas do sólido. A quantidade de umidade evaporada é pequena, mas o tempo pode ser grande quando considerado desde o ponto crítico (LUZ, 2006).

2.4 Aplicação e Obtenção dos Dados de Cinética de Secagem

A cinética de secagem é determinada experimentalmente e diante disso, é possível avaliar o comportamento do material sólido no secador, além de obter dados de transferência de massa, tais como umidade inicial, final e de equilíbrio, de transferência de calor envolvidos na evaporação, dado físico-químico do material sólido (LUZ, 2006). Além disso, o conhecimento da cinética de secagem sob várias condições de processo é extremamente importante, tanto para o projeto de secadores, como para a modelagem do processo de secagem (XIA e SUN, 2002).

A obtenção dos dados de cinética de secagem, é alcançado por meio dos ensaios experimentais, utilizando secadores em escala laboratorial, onde a amostra úmida recebe o

fluxo de ar quente e em intervalos de tempos pré-determinados, as massas da amostra são pesadas, possibilitando calcular as suas respectivas umidades. Com esses dados, é possível plotar o gráfico da umidade do sólido em função do tempo, e conforme a Figura 2, pode-se analisar o comportamento cinético. Derivando ponto a ponto da curva de secagem (Figura 2), e utilizando a Equação 2.1, pode-se plotar esses dados em um gráfico em função da umidade do sólido, e a curva de taxa de secagem é obtida conforme a Figura 3. Tal curva facilita a visualização do comportamento do sólido durante o processo de secagem (FOUST *et al.*, 1982).

$$R_n = \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Em que R_n é a taxa de secagem ($\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{sólido seco}}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), ΔX é a variação de concentração de uma espécie ($\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{sólido seco}}^{-1}$) e Δt a variação em um determinado intervalo de tempo (s).

2.5 Modelos Matemáticos para Secagem em Camada Delgada

Em estudos relacionados aos sistemas de secagem, o dimensionamento, a otimização e a determinação da viabilidade de sua aplicação comercial, podem ser realizados por meio de simulações matemáticas. Para isso, é necessário a utilização de modelos matemáticos que possam representar satisfatoriamente a perda de água durante o processo de secagem do produto (BERBERT *et al.*, 1995), contribuindo para obter as melhores condições e desempenho da operação, além do menor custo.

Boeri e Khatchatourian (2012), observaram que para leitos em camada delgada, a área superficial de sementes de soja disponível em contato com o ar é maior em comparação à área de leitos empacotados (camada espessa), devido a dispersão das sementes. Com isso, as transferências de massa e de energia entre a semente e o ar são diferentes entre leitos de camada delgada e leito de camada espessa, uma vez que a área superficial pode impactar nas taxas de secagem (MEISAMI-ASL *et al.*, 2010). No entanto, uma camada espessa é constituída por um conjunto de camadas delgadas (KASHANINEJAD *et al.*, 2007).

Complementando, Mancini (1996), definiu camada delgada como “*um leito de sementes de espessura tal que, ao ser percolado pelo gás, as condições de umidade e temperatura da fase fluida não sofram variações, isto é, as variações nas propriedades da*

fase fluida são menores do que a sensibilidade dos equipamentos de medida, podendo considerar-se que todo o leito de sementes está sujeito às mesmas condições de umidade e temperatura de gás de secagem”. Ou seja, segundo este autor, quando opera-se em camada delgada, é possível considerar que todo o leito está sob mesma temperatura e umidade, ou melhor, sob condições homogêneas. Essas condições possibilitam não apenas um maior controle sobre as condições operacionais, mas também possibilitam avaliar separadamente os efeitos inerentes a temperatura, vazão e umidade do gás sobre o coeficiente de transferência de massa (ELIAS, 2003).

Atualmente a literatura especializada apresenta diferentes modelos matemáticos apropriados para descrever a secagem de produtos agrícolas em camada delgada durante um intervalo de tempo, podem ser descritos pelos métodos teóricos, semi-teóricos e empíricos. Nos métodos teóricos consideram-se as condições externas sob as quais a operação ocorre como também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos. Os semi-teóricos são modelos que estão fundamentados na Lei de Newton para resfriamento aplicado para transferência de massa presumindo-se que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de água se restrinja apenas à superfície do produto. Por fim, o método empírico consiste em formar grupos físicos adimensionais que podem ser facilmente investigados por experimentos de laboratórios e se baseia nas condições externas, como temperatura, razão da mistura e velocidade do ar de secagem (ALMEIDA *et al.*, 2006).

Pesquisas relacionadas ao estudo da cinética de secagem em camada delgada, vem sendo cada vez mais realizadas em diversos produtos agrícolas, como sementes, grãos, frutos e em algumas espécies de plantas, com importância econômica. Tal aplicação, leva em conta o produto e as condições do processo de secagem, os quais diferentes modelos se ajustam a cada situação específica (MARTINAZZO *et al.*, 2007; FARIA *et al.*, 2012; MADUREIRA *et al.*, 2011; MENEGETTI *et al.*, 2012; MORAIS *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2012; PEREZ *et al.*, 2013 e VENTURINI *et al.*, 2012).

Alexandre *et al.*, (2009), estudaram a secagem de abacaxi em fatias sem talo, operando em um secador de leito fixo, com 1,0 cm de espessura de camada e velocidade do ar de secagem de $1,4 \text{ m.s}^{-1}$. As cinéticas de secagem obtidas, foram ajustadas pelos modelos matemáticos de Page, Henderson e Pabis e Lewis. Ambos os modelos utilizados ajustaram-se bem aos dados experimentais, podendo ser aplicados na predição da secagem de abacaxi em fatias, porém o melhor resultado encontrado foi para o modelo matemático de Page.

Panchariya *et al.*, (2002) ajustaram várias equações aos dados experimentais da secagem de chá preto com faixas de temperatura de 80 a 120°C e faixa de velocidade de fluxo de ar de 0,25 a 0,65 m.s⁻¹ utilizando diferentes modelos semi-teóricos como os modelos de Lewis, Page, Page Modificado, Dois Termos e Henderson & Pabis, com base nas proporções da diferença entre os teores de umidade inicial e final, e o teor de umidade de equilíbrio. Concluíram que o modelo de Lewis reproduziu melhor os dados experimentais de secagem em camada delgada para o chá preto.

Por sua vez, Demir *et al.*, (2004) ao avaliarem diferentes modelos matemáticos para a secagem forçada de louro (*Laurus nobilis L.*) em temperaturas de ar de 40, 50 e 60°C, umidade relativa de 5, 10 e 15% e velocidade do fluxo de ar fixo de 1,5 m.s⁻¹, em relação à secagem natural (sob o sol), concluíram que o modelo de Page foi que melhor descreveu o processo, enquanto Doymaz *et al.*, (2006), analisaram o efeito da temperatura na taxa de secagem de folhas de aneto (*Anethum graveolens L.*) e de salsinha (*Petroselinum crispum L.*) em velocidade constante de 1,1 m. s⁻¹ e temperatura de ar de secagem de 50, 60 e 70 °C, utilizando os modelos matemáticos de Lewis, Henderson & Pabis, Page e Midilli *et al.*, por fim concluíram que o modelo de Midilli *et al.* foi o que descreveu satisfatoriamente as curvas de secagem em camada delgada das folhas de aneto e salsinha.

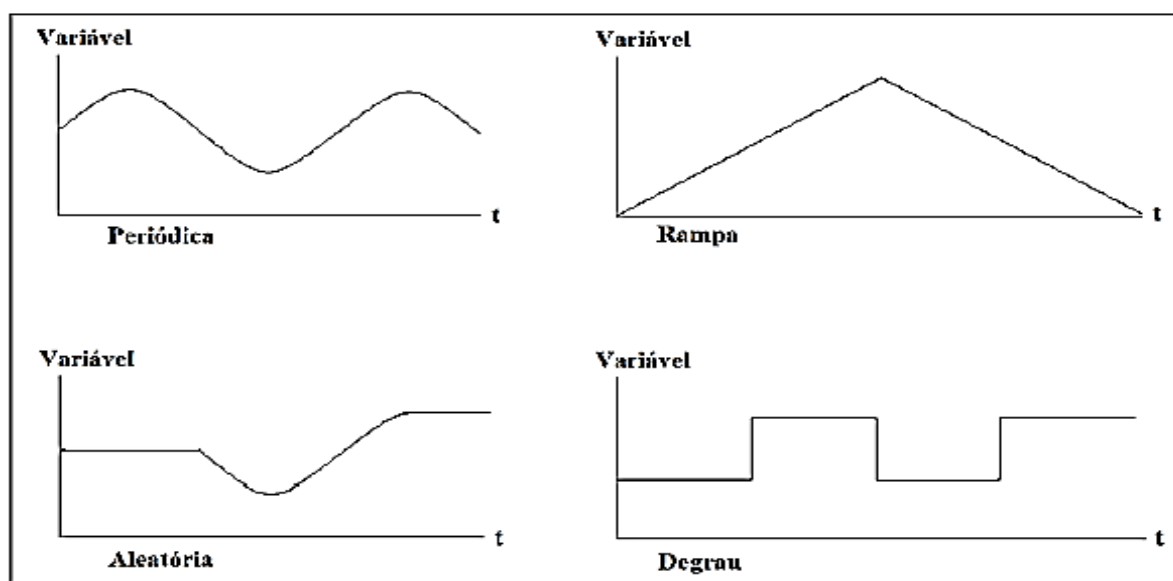
2.6 Secagem Intermitente

Um método para minimizar as condições adversas causadas pela secagem convencional, é realizar o processo em condições intermitente (SILVA, 2015). Este modo de secagem opera sob o fornecimento variável de entradas de calor durante a secagem, ou sob a exposição de materiais úmidos em condições de secagem que variam no tempo (PUTRANTO *et al.*, 2011). Desta forma, a secagem intermitente pode ser realizada por meio do controle do fornecimento de energia térmica, através da variação da vazão do ar, temperatura do ar, umidade ou pressão de operação, ou até mesmo pela variação do modo de entrada de energia (por exemplo, convecção, condução, radiação ou micro-ondas) (KUMAR *et al.*, 2014).

Contrariamente à operação convencional, a secagem intermitente opera com entradas transientes das condições do ar. Tal secagem é caracterizada pela submissão da semente à ação do ar aquecido na câmara de secagem a intervalos regulares de tempo, intercalados com períodos de exposição ao meio ambiente. Este último período, permite a redistribuição da umidade no interior das sementes reduzindo os gradientes hídrico e térmico (ELIAS, 2002).

Em operação intermitente, as condições do ar podem ser moduladas de várias formas, como em perturbações degraus ou no formato senoidal. Pode-se também modular algumas condições do ar como a temperatura, vazão, pressão e umidade, as quais são propriedades que impactam nas taxas de secagem, na qualidade do material a ser seco e no consumo energético do processo (DEFENDI, 2015). A Figura 4, ilustra alguns tipos de modulações referentes à secagem intermitentes.

Um dos principais objetivos da secagem intermitente é minimizar os gastos energéticos, além de alcançar e manter a melhor qualidade dos produtos (PUTRANTO *et al.*, 2011). De acordo com CHUA *et al.*, (2003), o regime intermitente é favorável para produtos onde o processo de secagem pode ser controlado por meio dos transportes difusivos internos, que cada material a ser seco contém, como é o caso da soja. Quando opera-se com entradas transientes durante o processo de secagem, tal ação pode causar uma potencialização no transporte de massa e de energia no sistema.



Fonte: Defendi (2015)

Figura 4. Tipos de Secagem Intermitente

Segundo Holowaty *et al.*, (2012), a secagem intermitente produz dois efeitos: o aumento de qualidade, pois evita a ocorrência de rachaduras no material e o aumento da taxa de secagem quando a aplicação do calor é reiniciada. Este método já foi aplicado com sucesso na secagem de arroz, banana, goiaba, batatas e trigo (AQUERRETA *et al.*, 2007; CHUA *et al.*, 2000a, b, 2003; CNOSSE *et al.*, 2003; NISHIYAMA *et al.*, 2006; SHEI e CHEN, 2002; THOMKAPANICH *et al.*, 2007; TUYEN *et al.*, 2009).

Kowalski e Szadzińska (2014), estudaram a secagem convectiva de cerejas (*Prunus cerasus L.*) em condições estacionárias e intermitentes, previamente pré-tratadas com desidratação osmótica seguido por ultrassom. O efeito da mudança da temperatura do ar e do pré-tratamento osmótico na cinética de secagem e na qualidade do material foram investigados. Verificaram que a secagem intermitente de cerejas precedida por desidratação osmótica acompanhado de ultrassom contribui para um menor tempo de secagem, melhor preservação da cor e menor atividade da água.

Chua *et al.*, (2000 a, b), destacam os benefícios potenciais da variação na temperatura do ar de secagem intermitente em relação a qualidade do produto. Chua *et al.*, (2000a) evidenciaram que a seleção adequada na temperatura do ar de secagem intermitente promove melhoria em relação ao ácido ascórbico contidos em goiaba (*Psidium Guajava*), aumentando em até 20% em comparação às secas sob condição isotérmica. Chua *et al.*, (2000b) demonstraram também que a temperatura do ar de secagem intermitente pode reduzir a variação geral da cor de amostras de batata, goiaba e banana em 87%, 75% e 67%, respectivamente.

Recentemente, a secagem intermitente de alguns produtos agrícolas tem sido estudada por um número significativo de pesquisadores (KOWALSKI e PAWLOWSKI, 2011; MENEGHETTI *et al.*, 2012; OLIVEIRA e ROCHA, 2007; PUTRANTO *et al.*, 2011; RAMALLO *et al.*, 2010). Além disso, diversos pesquisadores observaram uma melhoria na preservação da qualidade do alimento seco em relação aos resultados obtidos em secagem contínua (BON e KUDRA, 2007; CHIN e LAW, 2010; CHONG e LAW, 2011; FARKAS e RENDIK, 1997; KOWALSKI e SZADZIŃSKA, 2014; ONG *et al.*, 2012; PAN *et al.*, 1999; THOMKAPANICH *et al.*, 2007).

2.7 Análise Energética

Ramallo *et al.*, (2010) desenvolveram um estudo de secagem intermitente em erva-mate, e conseguiram aumentar em algumas condições operacionais o desempenho do aquecedor em regime intermitente, no qual os níveis de umidade do material seco foram de 10 a 12% menores do que os obtidos em operação convencional. Outro estudo envolvendo a secagem desse mesmo produto, foi o de Holowaty *et al.*, (2012) os quais conseguiram economizar em 10% o consumo energético do processo.

Pan *et al.*, (1998) estudaram secagem contínua e intermitente de fatia de abóbora a 100°C em um secador de leito fluidizado vibrado. Eles demonstram que a economia de

energia foi significativa, pois a intermitência permitiu o tempo necessário para acumular a umidade na superfície a ser removida, o que provocou o aumento subsequente da taxa de secagem. Thomkapanich *et al.*, (2007) conseguiram uma redução de 65% do consumo de energia em secagem intermitente de banana, em comparação com os resultados de operação contínua.

Defendi *et al.*, (2015) realizaram um estudo com secagem intermitente em grãos de soja em leito fixo, e observaram que a modulação da temperatura do ar na entrada do secador pode aumentar as taxas de secagem e reduzir o consumo de energia em comparação com os resultados obtidos usando operação convencional, onde as propriedades do ar na entrada do secador são constantes. Os autores complementam a importância em reduzir o consumo de energia no processo de secagem, uma vez que os custos envolvidos são expressivos.

2.8 Análises da Qualidade das Sementes de Soja

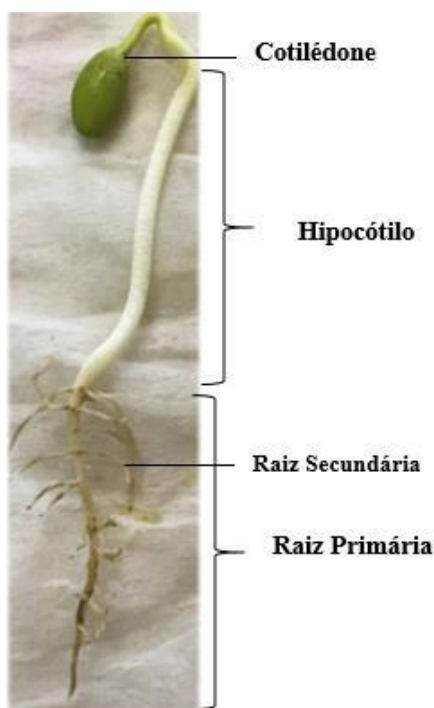
Devido à grande importância que a soja representa como fonte de alimento e por se tratar de uma cultura promissora, uma crescente busca para incrementar a produção da soja no Brasil vem ocorrendo devido ao aumento na área plantada e/ou rendimento por área. Neste contexto, existe a necessidade da utilização de sementes de alta qualidade na implantação das lavouras para o sucesso de um empreendimento agrícola (SANTOS *et al.*, 2017).

Segundo Marcos Filho (2005), o principal objetivo da área de tecnologia de sementes é desenvolver e aprimorar procedimentos para a produção, comercialização e utilização de lotes de sementes de alta qualidade, afim de avaliar o potencial fisiológico das sementes de maneira a expressar melhor desempenho em condições de campo. O autor complementa, que devido à importância do estabelecimento rápido e uniforme desses testes, a avaliação do potencial fisiológico deve identificar de maneira consistente os lotes com maiores probabilidades de se desenvolverem em campo, levando em conta a ampla variação de condições ambientais que podem estar sujeitas. Os resultados obtidos em laboratório, ilustram geralmente o que é verificado em campo.

As sementes podem desenvolver-se em plântulas normais, plântulas anormais ou em sementes mortas, conforme as prescrições contidas nas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009):

Plântula Normal: É classificada como a plântula que apresenta potencial para continuar

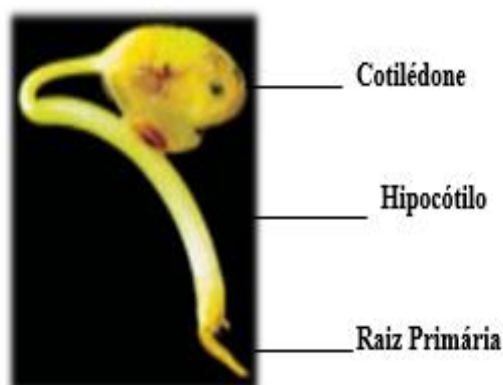
seu desenvolvimento e dar origem a plantas normais, quando desenvolvidas em condições favoráveis. De acordo com Nakagawa *et al.*, (1999), é de suma importância definir o tamanho de plântula normal. Segundo o autor, podem ser consideradas plântulas normais as que apresentarem raiz primária e hipocótilo maior que 3 cm e presença, de, no mínimo, 2 raízes secundárias, conforme a Figura 5.



Fonte: Autora

Figura 5. Plântula normal de soja composta por todas estruturas essenciais

Plântula Anormal: Não apresentam potencial para continuar seu desenvolvimento e dar origem a plântula normal, mesmo crescendo em condições favoráveis, pois não desenvolveram as estruturas essenciais para sua sobrevivência, conforme a Figura 6.



Fonte: Marcos Filho (2005)

Figura 6. Plântula anormal de semente de soja

Semente Morta: São as sementes que no final do teste não germinam, ou seja, não apresentam nenhum sinal de início de germinação, e geralmente, apresentam-se amolecidas devido ao ataque de microrganismos.

O teste de germinação tem sido amplamente empregado na avaliação da qualidade de diferentes lotes de sementes. Entretanto esse teste é realizado em condições controladas de umidade, temperatura, iluminação e aeração. Dessa maneira, nem sempre uma alta porcentagem de germinação em laboratório resulta em um excelente desempenho no campo. Isso é devido à ocorrência da diversidade de condições ambientais em que as sementes estão sujeitas no campo e que podem afetar em maior ou menor escala o estabelecimento inicial da cultura, não informando sobre os vários aspectos da qualidade fisiológica das sementes, pois estas podem germinar e não ter potencial para emergir e tornar-se uma planta normal em campo (HAMPTON e TEKRONY, 1995).

Byrum e Copeland (1995), questionam a legalidade desse teste para predizer o desempenho das sementes no campo, onde as condições nem sempre são favoráveis, e sugerem a complementação do teste de germinação com os testes de vigor, tornando-se então indispensáveis, pois permitem avaliar com maior precisão o desempenho dos lotes de sementes no campo.

O termo “vigor” é utilizado para sementes, e inclui as características que determinam o potencial para emergência rápida e uniforme, bem como o desenvolvimento de plântulas normais. Com isso, esse conceito enfatiza o potencial de desempenho das sementes sob diversas condições ambientais, permitindo diferenciar a germinação do vigor (MCDONALD JUNIOR, 1980).

Entre os diversos testes de vigor de sementes, os comitês de vigor da Associação Internacional de Análise de Sementes (ISTA) e da Associação de Analistas Oficiais de Semente (AOSA) consideram mais adequados os testes de crescimentos de plântulas, envelhecimento acelerado, classificação do vigor das plântulas, teste de frio, teste de tetrazólio e condutividade elétrica (LIMA, 2015).

Esses testes avaliam o vigor das sementes de diferentes lotes baseando em aspectos que podem estar relacionados à fisiologia, a processos metabólicos ou, até mesmo, a características físicas das sementes. Contudo a eficiência dos testes de vigor está relacionada com a escolha adequada do método, em função dos objetivos pretendidos, visto que nem sempre o teste mais indicado para avaliar o potencial de emergência das plântulas em campo

é também o mais adequado para detectar diferenças entre lotes de sementes de determinada espécie (MARCOS FILHO *et al.*, 1999).

Apesar de geralmente a diferença entre o vigor de plântulas serem visíveis, ainda existe a necessidade da utilização de valores numéricos para distinguir as plântulas consideradas vigorosas das que não são. Uma opção para obter esses valores numéricos é a avaliação do comprimento médio de plântulas normais, no qual quanto maior for o valor do comprimento médio, mais vigorosa é a amostra. Essa avaliação envolve a mensuração do comprimento da plântula normal ou de suas partes (hipocótilo e raiz primária), que surgem após o teste de germinação realizado sob condições controladas, para não causar nenhuma variação que possa influenciar no vigor (LIMA, 2015). Nesse estudo optou-se por avaliar o vigor por meio do teste de comprimento de plântulas.

Schuab *et al.*, (2002), estabeleceram a metodologia da taxa de crescimento das plântulas na avaliação do vigor de sementes de soja. Foram avaliados dez lotes por meio dos testes de emergência de plântulas em campo, de germinação, de envelhecimento acelerado, de frio, de tetrazólio (1-3 e 1-5), de condutividade elétrica, de comprimento de plântula, de biomassa seca das plântulas e da taxa de crescimento das plântulas. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e de correlação e as médias foram comparadas por meio do teste de agrupamento de Scott-Knott. Com isso, permitiu concluir que a taxa de crescimento das plântulas apresentou correlação significativa (valor- $p < 0,01$) com todos os testes avaliados. Além disso, a taxa de crescimento das plântulas é eficiente na avaliação do vigor das sementes de soja.

O Teste de Fissuras, também conhecido como Teste do Hipoclorito de Sódio para sementes de soja, pode ser usado para determinar rapidamente o percentual de dano mecânico (ruptura de tegumento) das sementes (Krzyzanowsk *et al.*, 2004). Segundo, este autor, a colheita é a fase considerada mais crítica na cadeia produtiva da soja, pois os impactos causados pelos mecanismos de trilha durante a colheita são a maior fonte de danos mecânicos à semente. Além da colheita, a operação de beneficiamento também pode causar danos mecânicos, devido à utilização de equipamentos inapropriados e ou desajustados. Estes autores acrescentam, que esse teste é de simples execução, e pode ser empregado no momento da recepção da semente na Unidade de Beneficiamento de Semente (UBS), como também aplicado na linha de beneficiamento para avaliação de danos mecânicos ocasionados pelos equipamentos de transporte.

CAPÍTULO 3

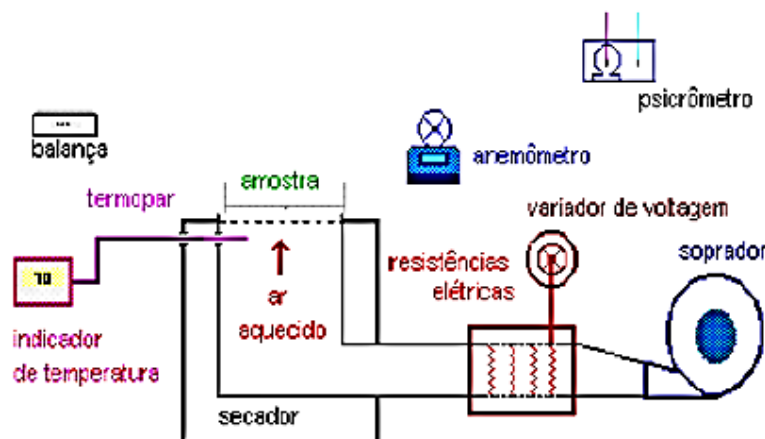
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as metodologias utilizadas para cumprir os objetivos pretendidos. Para a obtenção dos dados experimentais, tais como a comparação da cinética de secagem convencional e intermitente, a utilização de diferentes modelos matemáticos para ajustar os dados das secagens convencionais, a análise energética nos processos de secagem, e posteriormente, a utilização dos materiais secos para avaliar a qualidade, por meio dos testes de germinação, vigor e fissuras.

3.1 Secagem: Materiais e Equipamentos

Neste estudo foram utilizadas sementes de soja transgênica da cultivar Monsoy 6410 IPRO (adaptada principalmente no sul, sudeste e centro oeste do Brasil), as quais foram fornecidas pela Coamo Agroindustrial Cooperativa.

A secagem convencional e intermitente foi realizada no módulo de secagem do Laboratório de Engenharia Química II do DEQ/UEM (Figura 7). O secador utilizado é composto de um soprador que fornece ar, cuja vazão é ajustada por um “dumper”, o qual passa através de quatro resistências elétricas acionadas separadamente (uma de 2500 W, a segunda de 2200 W outras duas de 3000 W) e reguladas por um variador de voltagem (VARIAC), uma bandeja retangular de dimensões de 43 por 42 cm e uma mesa de suporte para a bandeja.

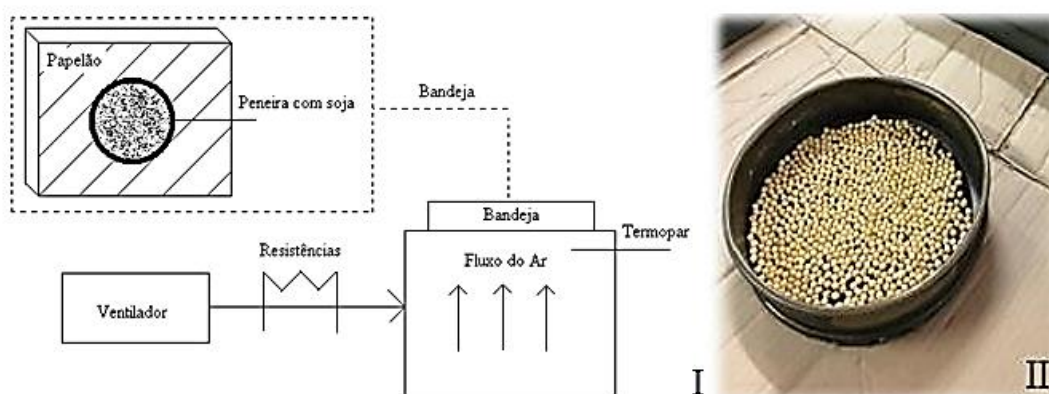


Fonte: Adaptado Motta Lima (2008)

Figura 7. Modelo esquemático do secador de leito fixo

Além disso, a velocidade e temperaturas do ar de secagem foram medidas, respectivamente, com um anemômetro digital (precisão: $0,1 \text{ m.s}^{-1}$) e por meio de um termopar inserido dentro do fluxo de ar no interior do secador, acoplado a um indicador digital de temperatura (precisão: $0,5^\circ\text{C}$), além de uma balança semi-analítica (leitura mínima de $0,01 \text{ g}$), um cronômetro e uma estufa que opera a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Foi necessário um papelão (Figura 8) com mesmas dimensões que a bandeja, com um furo circular no meio de mesmo raio da peneira circular utilizada, de característica Tyler 9 – abertura 2 mm e diâmetro de 20 cm , o qual foi utilizado para colocar as amostras do lote de semente de soja da cultivar Monsoy 6410 IPRO. O ar é proveniente do ambiente e segue até a peneira, por meio do tubo que liga o ventilador e a mesa que dá suporte à bandeja. As resistências dentro do tubo são usadas para aquecer o ar no processo de secagem (Figura 8-I). A soja é colocada dentro da peneira, alocada no centro do papelão sobre a bandeja, a fim de que o fluxo de ar passe apenas dentro da peneira, conforme a Figura 8-II.



Fonte: I- Defendi (2015); II: Autora

Figura 8. I- Esquema ilustrativo do secador de bandeja; II- Esquema utilizado para a secagem convencional e intermitente da semente de soja

3.2 Procedimento Experimental

As amostras de semente de soja transgênica Monsoy 6410 IPRO foram utilizadas na secagem convencional e intermitente, em leito fixo em camada delgada. Em ambas as operações trabalharam-se com velocidade fixa do ar de 1 m.s^{-1} , umidade inicial de $20\% \text{ (b.s)}$, em duplicata e em sequência randômica.

Para a secagem convencional, as amostras foram submetidas a três níveis de temperatura do ar de secagem (30 , 50 e 70°C). Já a secagem intermitente, consistiu-se em modular a

temperatura do ar de secagem e a vazão de alimentação em um período e amplitude específico, submetendo as sementes à ação do ar aquecido do secador a intervalos regulares de períodos de 5,10 e 15 min., intercalados com a retirada das sementes e exposição ao meio ambiente (30°C), sem circulação de ar durante o mesmo tempo, sucessivamente até uma umidade definida de armazenamento de 12% (b.s).

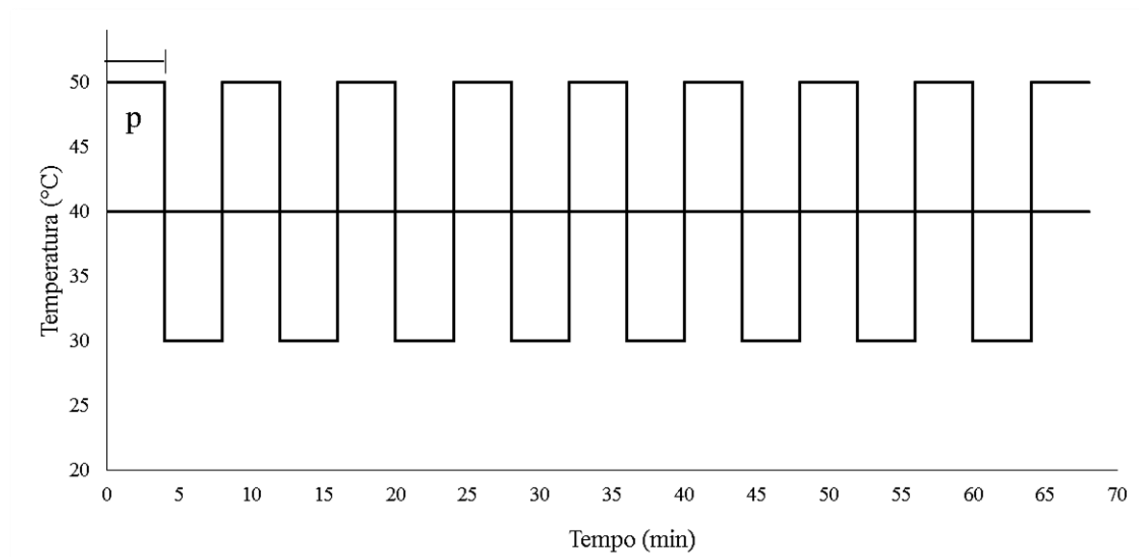
O procedimento experimental foi adaptado conforme proposto por Defendi (2015), consistindo nos seguintes passos:

1. Primeiramente, ajustou-se a velocidade e a temperatura do ar a ser trabalhada sobre a peneira;
2. Na determinação das condições ambientes (temperatura e umidade) do ar alimentado ao secador, foi utilizado um psicrômetro do tipo temperatura de bulbo seco/bulbo úmido;
3. Para atingir a condição de umidade inicial $Y_{s0} = 0,20$, foi necessário realizar a cinética de hidratação. Por meio do ajuste do modelo matemático de Peleg. Obteve-se o tempo de hidratação de, aproximadamente, 1,07 minutos para obter a umidade de 20% (b.s);
4. Uma parcial de soja hidratada, utilizou-se o método do peso seco constante em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, por 24 horas, para se determinar o teor de umidade inicial;
5. O restante da soja hidratada cobriu-se a superfície da peneira com uma monocamada de, aproximadamente, 115g de soja e mediu-se a massa do sistema peneira mais soja;
6. Colocou-se a peneira com soja sobre a bandeja e o papelão, conforme a Figura 8- II e foi acionado o cronômetro, dando início a secagem da mesma;
7. Pesou a massa de soja mais a peneira, a cada 1 minuto, em balança semi-analítica (precisão: 0,01g);
8. O procedimento foi finalizado, quando a amostra apresentou massa constante;
9. Para as secagens intermitentes, além de realizar todos os itens anteriores, a semente foi submetida à ação do ar aquecido a intervalos regulares de tempo, intercalados com períodos de secagem em temperatura ambiente (30°C), sem escoamento de ar.

Para melhor entendimento, a Figura 9 representa o esquema de modulação realizado para a temperatura do ar de secagem em operação intermitente, especificamente a operação de temperatura de ar de 50°C, no período de 5 minutos (representado pela letra p), sendo

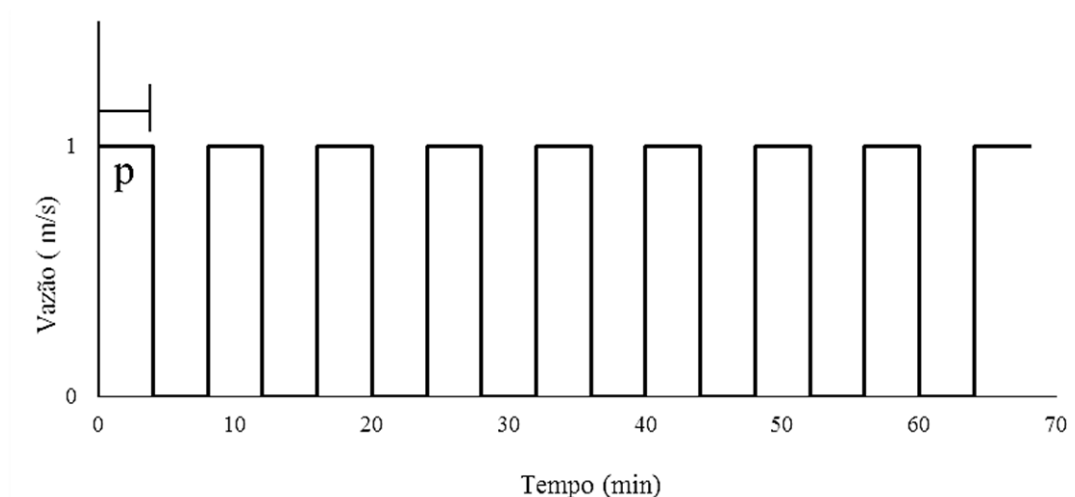
procedido da mesma forma para os demais períodos (10 e 15 min.) e também para as secagens intermitentes de 70°C.

Paralelamente as modulações realizadas na temperatura do ar de secagem, a secagem intermitente consistiu em modular a vazão de alimentação na mesma amplitude e períodos, como ilustrado na Figura 10, especificamente no período de 5 minutos.



Fonte: Autora

Figura 9. Representação da secagem intermitente a 50°C no período de 5 minutos (representado pela letra p)



Fonte: Autora

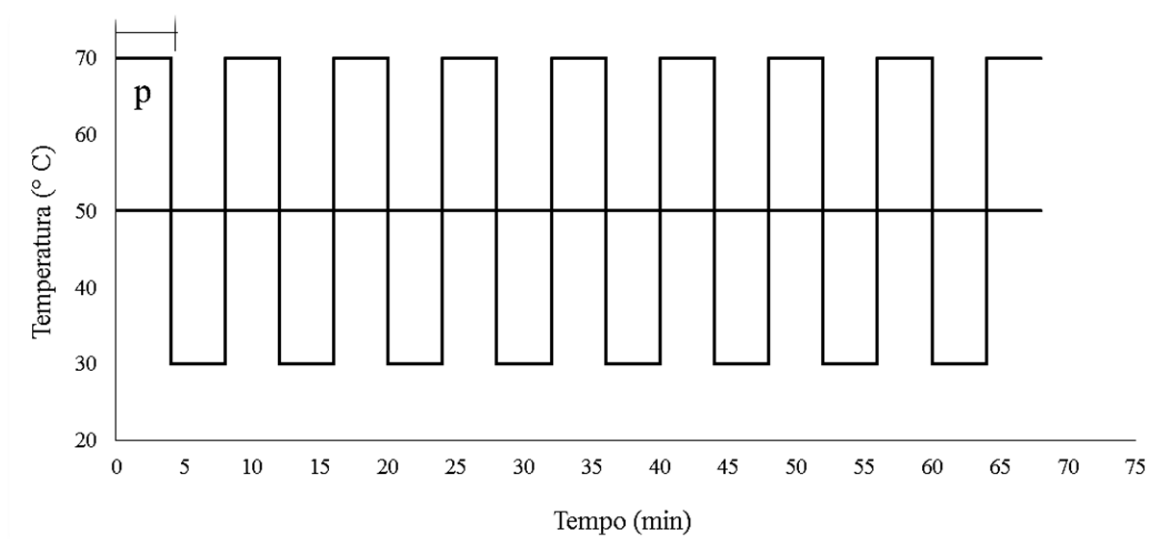
Figura 10. Representação da perturbação na vazão de secagem no período de 5 minutos (representado pela letra p)

As operações intermitentes, iniciam-se sempre nas condições fixas do secador, com o mesmo operando em regime permanente em uma dada temperatura e ar escoando a 1 m.s^{-1} .

Posteriormente, a semente foi exposta ao meio ambiente a temperatura de 30°C, sem circulação de ar durante o mesmo período, sucessivamente, conforme as Figuras 9 e 10, no caso da temperatura do ar de secagem de 50°C.

Os experimentos foram realizados em pares, sendo que para cada operação intermitente uma operação convencional na temperatura média da amplitude era realizada, ou seja, para as secagens intermitentes de 50°C, a amplitude foi sempre de 20°C; com isso, utiliza-se a temperatura média dessa amplitude como sendo a temperatura de ar de secagem (40°C) para a operação convencional, conforme a Figura 9.

O mesmo ocorre para a secagem intermitente com a temperatura do ar de 70°C e a intervalos regulares de períodos (5,10 e 15 min.). Porém nesse caso, a amplitude foi de 40°C utilizando então a temperatura média dessa amplitude como sendo a temperatura de ar de secagem de 50°C para operação convencional a ser comparada, conforme a Figura 11.



Fonte: Autora

Figura 11. Representação da secagem intermitente a 70 °C com tempo de perturbação de 5 minutos (representado pela letra p)

Em virtude de intercalar a temperatura do ar de secagem (50°C ou 70°C) e vazão de secagem (1m.s^{-1}) para uma temperatura mais fria (30°C) e sem circulação de ar, obtém-se modulações em formato de degrau para as secagens intermitentes, conforme as Figuras 10 e 11.

Normalmente, a cinética de secagem é determinada experimentalmente e possibilita analisar o comportamento do material sólido no secador, obter dados de transferência de

massa, tais como umidade inicial, final e de equilíbrio, de transferência de calor envolvidos na evaporação, obter dados físico-químicos e, até mesmo, obter dados para análises em projetos.

3.3 Modelos Matemáticos para Secagem em Camada Delgada

Os modelos matemáticos utilizados nos ajustes das curvas de secagem em camada delgada, para as secagens convencionais, estão apresentados na Tabela 2. A unidade do tempo foi tomada em segundos.

YR é a razão de umidade, dada por:

$$YR = \frac{(Y_s - Y_{se})}{(Y_{so} - Y_{se})} \quad (3.1)$$

Onde Y_{so} é o teor de umidade inicial do material. Habitualmente, estas expressões empíricas são ajustadas para cada condição de secagem (temperatura do ar, velocidade e umidade) e em alguns casos expressões adicionais são incrementadas para acrescentar a influência da temperatura nas curvas de secagem (DEFENDI, 2015).

Tabela 2. Modelos matemáticos empíricos e semi-empíricos

Modelo	Equação
Newton	$YR = \exp(-kt)$
Page	$YR = \exp(-kt^n)$
Henderson e Pabis	$YR = a \exp(-kt)$
Logarítmico	$YR = a \exp(-kt) + c$
Dois Termos	$YR = a \exp(-k_o t) + b \exp(-k_1 t)$
Aproximação da Difusão	$YR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$
Midilli <i>et al.</i>	$YR = a \exp(-kt^n) + bt$

Fonte: Meisami-Asl *et al.*, (2010)

A escolha de um bom modelo para representar o processo em estudo não pode levar em consideração apenas o bom ajuste aos dados, mas como também a capacidade em descrever adequadamente a população em estudo, de forma que vários critérios podem ser utilizados com esse objetivo. Alguns dos critérios mais utilizados na literatura para a seleção de modelos não lineares empregado nesse estudo, serão descritos a seguir:

EQM – Erro Quadrático Médio: é descrito pelos desvios do modelo, considerando a diferença entre os valores preditos e os valores experimentais (VIEIRA *et al.*, 2008). É

calculado pela seguinte forma:

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} = \frac{SQE}{n} \quad (3.2)$$

Em que y_i é o i-ésimo valor da resposta; $\hat{y}_i$ é a estimativa de y_i e n o número de observações da amostra. Desta forma, o somatório da diferença do experimental do calculado, é designado de Soma dos Quadrados do Resíduo do modelo (SQE).

Raiz de EQM: produz o Desvio Quadrático Médio, considerada uma boa medida de precisão. É descrito pela Equação 3.3, como:

$$\text{Raiz de EQM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} = \sqrt{\frac{SQE}{n}} \quad (3.3)$$

AIC- Critério de Informação de Akaike: Akaike (1973), sugeriu a utilização do Critério de Informação de Akaike (Akaike Information Criterion). Este critério é baseado na Divergência de Kullback e Leibler (1951), o qual é uma medida da “distância” entre o modelo identificado e um teórico “modelo real”. É definido como:

$$AIC = n \ln\left(\frac{SQE}{n}\right) + 2p \quad (3.4)$$

Em que p é o número de parâmetro do modelo

BIC- Critério de Informação Bayesiano: é um modelo proposto por Schwarz (1978), e representado pela Equação 3.5:

$$BIC = n \ln\left(\frac{SQE}{n}\right) + p \ln n \quad (3.5)$$

O critério da Informação BIC de Schawarz (1978) é semelhante ao modelo proposto por Akaike (1974), porém em estrutura Bayesiana.

Os índices analisam a bondade do ajuste do modelo e o número de parâmetros necessários para se obter esse grau de ajuste. Índices que apresentam valores baixos, indicam um melhor modelo, ou seja, aquele com menos parâmetros e que ainda fornece um ajuste adequado aos dados (MISCHAN e PINHO, 2014).

3.4 Análise Energética do Processo de Secagem

O consumo energético do processo de secagem das sementes de soja, seja em operação convencional ou intermitente, pode ser calculada em função do calor necessário para aquecer o ar que será utilizado para evaporar a água contida nas sementes. O balanço de energia no ar de secagem, é representado conforme a Figura 12.

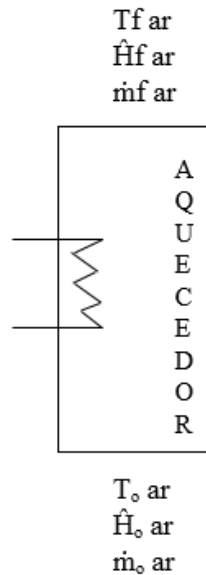


Figura 12. Representação do balanço de energia necessário para aquecer o ar do secador.

Desta forma, o balanço geral é dado pela Equação 3.6:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{m}_{o\ ar} \cdot \hat{H}_{o\ ar} - \dot{m}_{f\ ar} \cdot \hat{H}_{f\ ar} + \dot{Q} - W \quad (3.6)$$

Considerando o sistema como pseudo-estacionário, e admitindo $\frac{dU}{dt} \cong 0$, $\dot{m}_{o\ ar} \cong \dot{m}_{f\ ar}$ e $W = 0$, temos que a taxa de transferência de calor é dada por (kJ/s):

$$\dot{Q} = \dot{m}_{f\ ar} \cdot \Delta \hat{H} \quad (3.7)$$

Logo, pode-se calcular a entalpia específica ($\Delta \hat{H}$) a partir da equação abaixo:

$$\Delta \hat{H} = C_{p\ ar} \cdot (T_{f\ ar} - T_{o\ ar}) \quad (3.8)$$

Em que $C_{p\ ar}$ é o calor específico do ar, $T_{f\ ar}$ é a temperatura final do ar e $T_{o\ ar}$ é a temperatura inicial do ar de secagem.

Desta forma, o calor absorvido no processo para aquecer o ar (Q) em kJ, é dado por:

$$Q = C_{p\ ar} \cdot (T_{f\ ar} - T_{o\ ar}) \cdot \dot{m}_{f\ ar} \cdot t \quad (3.9)$$

Substituindo a Equação 3.8 na Equação 3.9, temos:

$$Q = \widehat{\Delta H} \cdot \dot{m}_{f\ ar} \cdot t \quad (3.10)$$

Em que $\dot{m}_{f\ ar}$ é a vazão mássica e o t, é o tempo de exposição em que a sementes de soja permaneceu no secador de leito fixo durante o processo de secagem.

A vazão mássica, $\dot{m}$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), é a quantidade de massa que escoar através de uma área por unidade de tempo e é expresso por:

$$\dot{m} = \rho_{ar} \cdot \dot{v} \quad (3.11)$$

Sendo ρ_{ar} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) a massa específica do fluido escoando e $\dot{v}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a vazão volumétrica.

De maneira semelhante, a vazão volumétrica é o volume de fluido escoando através de uma área por unidade de tempo, ou seja:

$$\dot{v} = v_{ar} \cdot A \quad (3.12)$$

Em que v_{ar} é a componente da velocidade média do escoamento e A é a área de seção transversal de escoamento.

3.5 Avaliações da Qualidade Fisiológica das Sementes

Para avaliar a qualidade fisiológica das sementes de soja, foi necessário realizar os mesmos procedimentos descritos anteriormente para a secagem convencional e intermitente; porém a operação foi finalizada quando a amostra apresentava umidade final de 12% (b.s), umidade está recomendada para o armazenamento.

As avaliações da qualidade fisiológica foram conduzidas no Laboratório de Tecnologia de Sementes do Núcleo de Pesquisa Aplicada à Agricultura (Nupagri), pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da UEM. As sementes de soja foram avaliadas por intermédio dos seguintes testes, descritos a seguir:

3.5.1 Teste de Germinação

Foram utilizadas quatro subamostras de 50 sementes, para cada tratamento e repetição analítica. As sementes foram distribuídas sobre duas folhas de papel “Germitest” e coberta com uma terceira, previamente umedecidas com água destilada utilizando-se a proporção de 2,5 vezes o peso do substrato seco. A seguir, foram confeccionados rolos com estas folhas umedecidas contendo as sementes no seu interior, os quais foram levados para germinar em um germinador do tipo Mangelsdorf, regulado para manter a temperatura constante de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. As avaliações e contagens das plântulas normais foram feitas aos cinco e oito dias após a semeadura. Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais, segundo as prescrições contidas nas Regras para Análise de Sementes (BRASIL., 2009).

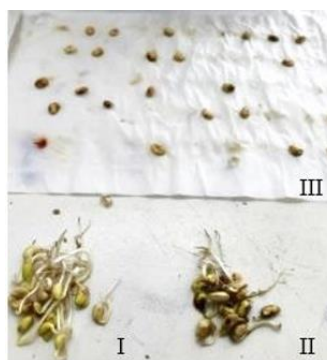
3.5.2 Teste de Vigor

Para avaliar o vigor das sementes, optou-se pelo teste de avaliação das plântulas, o qual avalia os aspectos morfológicos.

3.5.2.1 Primeira Contagem da Germinação (PCG)

A primeira contagem do teste de germinação foi efetuada em conjunto com o procedimento anterior, utilizando-se a mesma metodologia, computando-se a porcentagem de plântulas normais obtidas no quinto dia após a semeadura (BRASIL, 2009), descartando-se as plântulas anormais (desenvolvimento anormal do embrião ou de outra estrutura essencial sendo consideradas como não viável) e as sementes mortas.

Após a contagem, os rolos de papel “Germitest” contendo as plântulas que ainda não tinham se desenvolvido foram devolvidos a câmara de germinação, para completar o período de duração do teste de germinação, conforme a Figura 13.



Fonte: Autora

Figura 13. I - Contagem das plântulas normais que representam a PCG; II- Descarte das plântulas anormais (não viáveis); III- Sementes mortas

Com isso, a contagem do teste de germinação no quinto dia faz parte da PCG e a contagem final é o resultado do teste de germinação (GER), ambos expressos em porcentagem de plântulas normais.

3.5.2.2 Comprimento de Plântulas

Foram aplicados os procedimentos descritos por Nakagawa *et al.*, (1999), adaptado de AOSA (1983). Utilizou-se quatro repetições de 20 sementes de soja. Uma linha foi traçada no terço superior do papel toalha de germinação no sentido longitudinal. Os papéis foram previamente umedecidos com água destilada equivalente a 2,5 vezes a massa seca do papel seco. As sementes de soja foram posicionadas de forma que a micrópila estivesse voltada para a parte inferior do papel. Os rolos foram posicionados verticalmente no germinador por sete dias a $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Ao final deste período, foi efetuada a medida das partes das plântulas consideradas normais, avaliando o comprimento da raiz primária (CRP), do hipocótilo (CHP) e do comprimento total (CTO), utilizando-se uma régua milimetrada. Os resultados médios do comprimento das plântulas foram expressos em centímetros.

3.6 Teste de Fissura

Conforme estabelecido por Krzyzanowski *et al.*, (2004):

1. Foram selecionadas 100 sementes após o processo de secagem de cada condição experimental, excluindo as com dano aparente e as visualmente identificadas com fissuras. Após isso, essas amostras foram imergidas em um recipiente;
2. Imergiu-se totalmente as sementes na solução de hipoclorito de sódio a 5,25%;
3. Após 10 minutos, escoou-se a solução, espalhou-se as sementes sobre papel toalha para avaliação;
4. Separou e contou-se o número de sementes que embeberam, em cada uma das repetições.

3.7 Análise Estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial. Para comparação das médias, foi utilizado o Teste de Tukey (Tukey, 1953), em nível de 5% de significância contendo como fator qualitativo duplo: temperatura (50°C e 70°C) e tempo (convencional, 5, 10 e 15 min), sendo as variáveis respostas de interesse do experimento: o consumo energético (kJ), tempo efetivo da secagens (min.), e em relação a qualidade das

sementes as variáveis respostas de interesse foram: primeira contagem (PCG), germinação (GER), comprimento de raiz primária (CRP), hipocótilo (CHP) e plântula total (CTO). A análise estatística dos dados foram realizadas utilizando o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014).

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, os resultados e discussões estão apresentados em dois tópicos, o primeiro inclui os dados experimentais das cinéticas de secagens, o ajuste dos dados com os modelos matemáticos e o consumo energético dos processos de secagens e o segundo tópico, os testes de germinação, vigor e fissuras, respectivamente, utilizados para avaliar a qualidade fisiológica das sementes secas de soja Monsoy 6410 IPRO.

4.1 Cinética, Ajuste e Consumo Energético

A partir dos dados experimentais de massa total da amostra, do intervalo de tempo entre as pesagens e da massa de sólido seco obtida na estufa, foram calculadas a massa de água existente e a umidade em cada amostra.

O efeito da temperatura sobre a cinética de secagem convencional na semente de soja foi avaliado comparando-se as cinéticas de secagem obtidas nas mesmas condições de velocidade do ar e diferentes temperaturas, na forma adimensional de umidade em função do tempo, conforme a Figura 14.

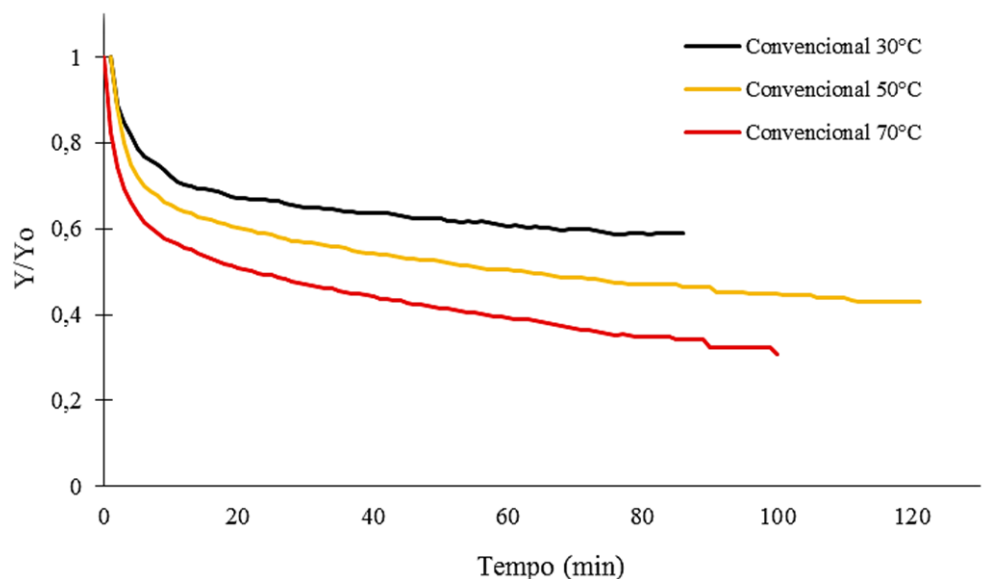


Figura 14. Curvas de secagem convencional da semente de soja a 30°C, 50°C e 70°C e vazão de alimentação de 1m.s⁻¹

Verifica-se que o sólido apresentou somente o período de taxa decrescente em que

ocorre a redução da umidade mais rapidamente no início da secagem. As curvas de secagem foram influenciadas pela temperatura, proporcionando redução no teor de água do produto durante o processo, tendendo ao um valor gradativamente menor de X_e sob o efeito da utilização de temperaturas mais elevadas do ar de secagem (Figura 14).

Nota-se que para a temperatura de 30°C (Figura 14), não ocorre o mesmo comportamento, pelo fato dessa temperatura ser muito baixa e promover apenas a remoção da água não ligada de sua superfície, a qual não apresenta resistência a secagem. Com isso, a temperatura não é suficiente para ocorrer a migração da umidade no interior do sólido para a superfície, fazendo com que nessa temperatura do ar de 30°C , o processo de secagem seja mais lento por não ocorrer o mecanismo de difusão no sólido. Além disso, a soja é um produto que durante o processo de secagem é controlada por meio dos transportes difusivos internos, desse modo, o aumento da temperatura do ar facilita a difusão de água no interior da semente.

As condições de operações nos experimentos de secagem variam muito entre os estudos publicados, pois dependem principalmente das características termoressistentes do produto. Cano-Chauca *et al.* (2004), por exemplo, secaram bananas inteiras em secador de bandeja nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidade de ar de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$. O tempo necessário para reduzir a umidade do produto de 78% para 23% (base úmida), foi de 51, 36, e 30 horas, respectivamente nas temperaturas mencionadas. A conclusão feita pelos autores é que quanto maior a temperatura do ar, maior a taxa de evaporação de água, ou seja mais rápida é a secagem do produto. Comportamento clássico que ocorre em diversos estudos com diferentes produtos.

Outro aspecto que pode interferir nas taxas de secagem é a velocidade do ar. Alguns estudos, revelam que a influência da velocidade do ar nas taxas de secagem é menor, em comparação a influência da temperatura (BENALI, 2012; BOERI e KHATCHATOURIAN, 2012; CIL e TOPUZ, 2010; VEGA-GÁLVEZ *et al.*, 2012). Nestes estudos, concluiu-se que quanto maior a velocidade do ar, maior é a velocidade com que o material é seco. Porém, em outros estudos a velocidade do ar não interferiu nas taxas de secagem como foi o caso da secagem de farelo de soja (LUZ, 2006).

A Figura 15, apresenta a influência da velocidade do ar na curva de secagem convencional na semente de soja, obtidas com duas velocidades do ar de secagem (1 e 2 m.s^{-1}) e temperatura do ar de 50°C . Nesse contexto, é possível verificar que a diferença na curva

de secagem causada pela diferença de velocidade do ar não apresenta de forma severa, ou seja, apresentam comportamentos semelhantes, pois encontram-se dentro do intervalo de confiança, sendo portanto, uma propriedade não influente para a secagem de sementes de soja (Figura 15).

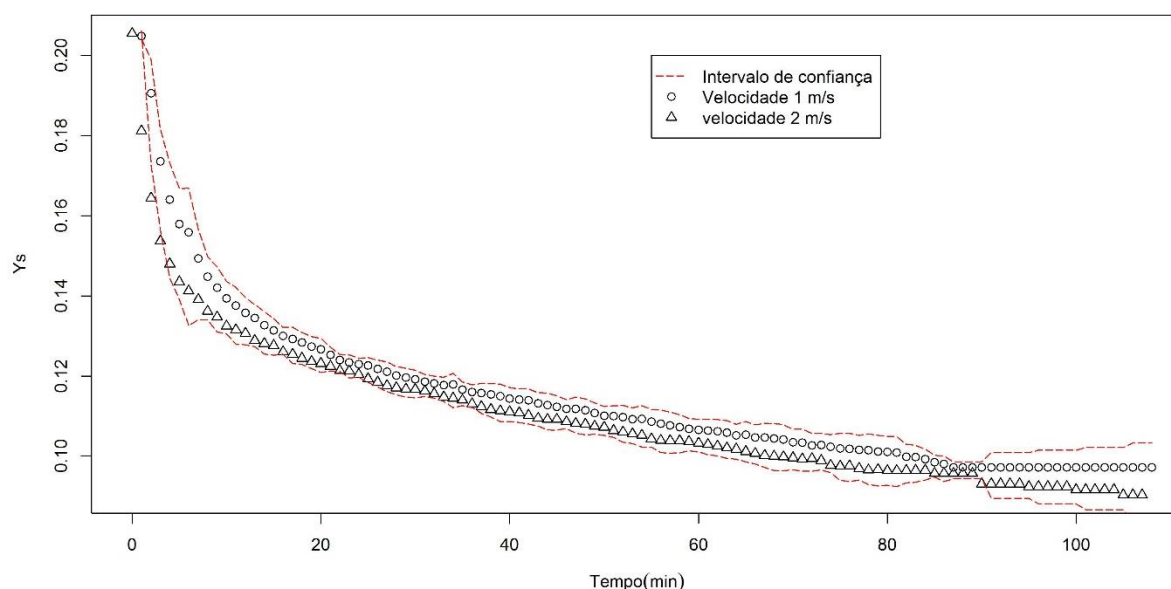


Figura 15. Curvas de secagem convencional de sementes de soja a 50°C e velocidade do ar de 1 e 2 m.s⁻¹

O efeito das modulações na propriedade do sistema (temperatura e vazão) sobre a cinética de secagem intermitente numa frequência e períodos pré-determinados (5,10 e 15 min), foram avaliadas comparando-se com a cinética convencional na temperatura média da amplitude, na forma adimensional de umidade, em função do tempo.

A Figura 16, apresenta as secagens intermitentes de 50°C, nos períodos de 5,10 e 15 min. comparando com a secagem convencional de 40°C. Tais modulações são visíveis nas curvas dada continuamente em específicas frequência e amplitude.

Além disso, comparou-se, também, com a secagem convencional de 50°C, conforme observa-se na Figura 16, devido ao fato de alguns dos testes que avaliam a qualidade das sementes (Teste de Germinação e Teste de Vigor), que serão abordados posteriormente, terem utilizados os valores dessa temperatura durante a comparação de médias no Teste de Tukey, contendo como fator duplo: o fator temperatura e o fator período (0,5,10 e 15 min.), sendo o tempo 0 relacionado com a secagem convencional de 50°C e não os valores da convencional de 40°C para esses testes de qualidade. Com isso, optou-se por analisar-se a sua cinética, juntamente com as operações intermitentes de 50 °C (5,10 e 15 min) e com a

convencional de 40°C.

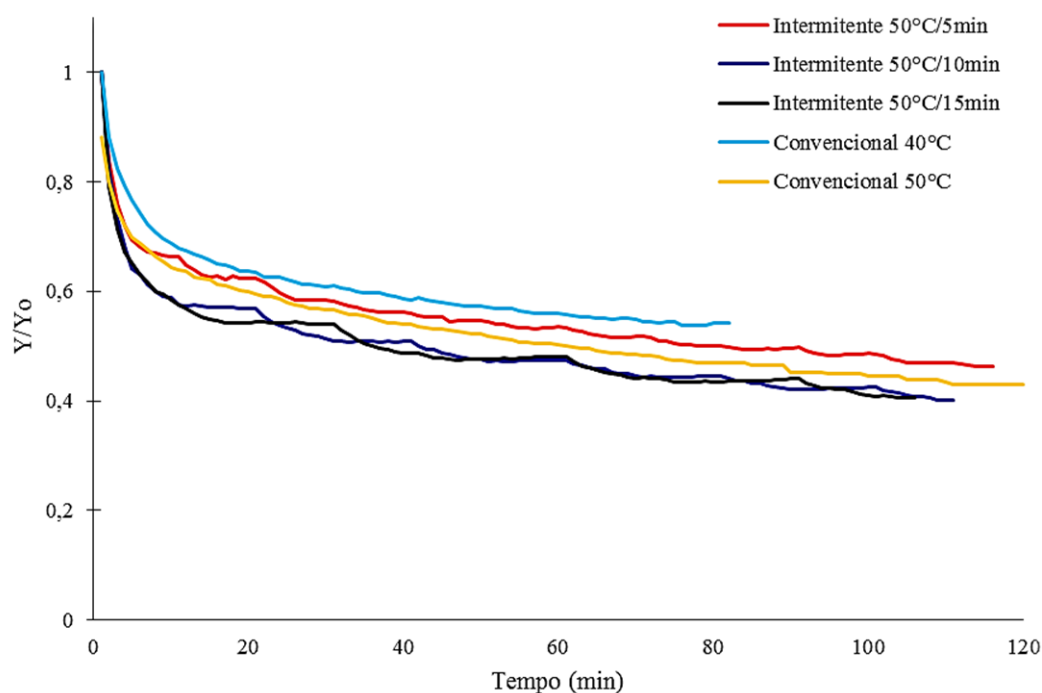


Figura 16. Curvas de secagem intermitente da semente de soja a 50°C nos períodos de 5, 10 e 15 minutos, relacionados com as operações convencionais de 40°C e 50°C

Compreende-se que as secagens intermitentes representam um processo mais lento, em relação à secagem convencional de 40°C. Porém, a permanência das sementes em contato com o ar aquecido, por períodos específicos, intercalados por períodos sem exposição ao fluxo de ar aquecido, possivelmente proporcionam uma quantidade de água evaporada maior, em relação à secagem contínua (Figura 16). O período de repouso a uma temperatura baixa (30°C) possibilita a redistribuição da umidade no interior das sementes, reduzindo os gradientes hídricos e térmicos (VILLELA e PESKE, 1997).

Com isso, é interessante optar por variar a energia fornecida ao sistema para este tipo de material, pois pode ocorrer de se fornecer uma quantidade desnecessária de energia, uma vez que a migração de água até a superfície é o efeito que controla o processo. Assim, em secagem intermitente, pode-se fornecer energia para evaporar a água, ao passo que em intervalos estabelecidos, pode-se reduzir ou até mesmo cessar esse fornecimento de energia durante o tempo necessário para que esta difusão de água até a superfície ocorra. Neste contexto, a estratégia de usar a intermitência, resulta na melhoria da transferência de calor e massa e, conseqüentemente, reduz o tempo necessário para atingir o teor de umidade

desejado e o consumo energético do processo. Portanto, a degradação da qualidade e o dano causado pelo calor, pode ser minimizado por meio da aplicação de secagem intermitente (Chua *et al.*, 2003; Ho *et al.*, 2002; Kumar *et al.*, 2014).

Além disso, para melhor comprovação da operação intermitente, ao se fixar um tempo na Figura 16, por exemplo, $t=40$ min., compreende-se que a secagem intermitente proporciona uma quantidade de água removida maior ($\cong 0,5$), em relação a secagem convencional de 40°C ($\cong 0,65$). Tal diferença resulta possivelmente em um menor consumo energético da operação.

Ramallo *et al.*, (2010), estudaram o efeito da secagem intermitente na qualidade da erva mate em relação as curvas de secagem contínua, com variação na temperatura do ar (60 , 80 e 100°C), simultaneamente no tempo de exposição (0 , 15 e 30 min.). Verificaram que, após 2 h de secagem a 60°C , as amostras nessa temperatura tinham cerca de 10 - 12% menos umidade, do que aquele em que secou continuamente. Já na temperatura de 80°C , essa diferença foi de cerca de 3 - 4% , e a 100°C não foram encontradas diferenças apreciáveis, apenas quando o processo de secagem iniciou-se. Nas temperaturas de 60 e 80°C , não foram encontradas diferença durante 15 e 30 minutos, sendo então conveniente para o processo de secagem utilizar temperaturas que não sejam tão elevadas (60°C) ou utilizar temperaturas elevadas, porém, no início da secagem.

Para as secagens intermitentes com a temperatura de ar de secagem de 70°C (Figura 17), utilizou-se o mesmo procedimento, porém comparou-se com a convencional de 50°C , conforme já discutido na Figura 11, e, além disso, acrescentou-se a cinética da convencional de 70°C , devido ao fato de ter sido utilizada essa condição em alguns testes da qualidade da semente de soja, conforme já explicado anteriormente na intermitente de 50°C .

Com o aumento da temperatura do ar de secagem para 70°C , conforme ilustra a Figura 17, notou-se que as secagens intermitentes, apresentam um processo mais lento de secagem, porém a essa temperatura do ar a operação convencional possivelmente apresenta maior quantidade de água removida, seguida da secagem intermitente de $70^{\circ}\text{C}/10\text{min.}$ e $70^{\circ}\text{C}/5\text{min.}$, respectivamente, notando-se que a essa temperatura as modulações realizadas não prevaleceram na comparação das operações contínuas com as intermitentes.

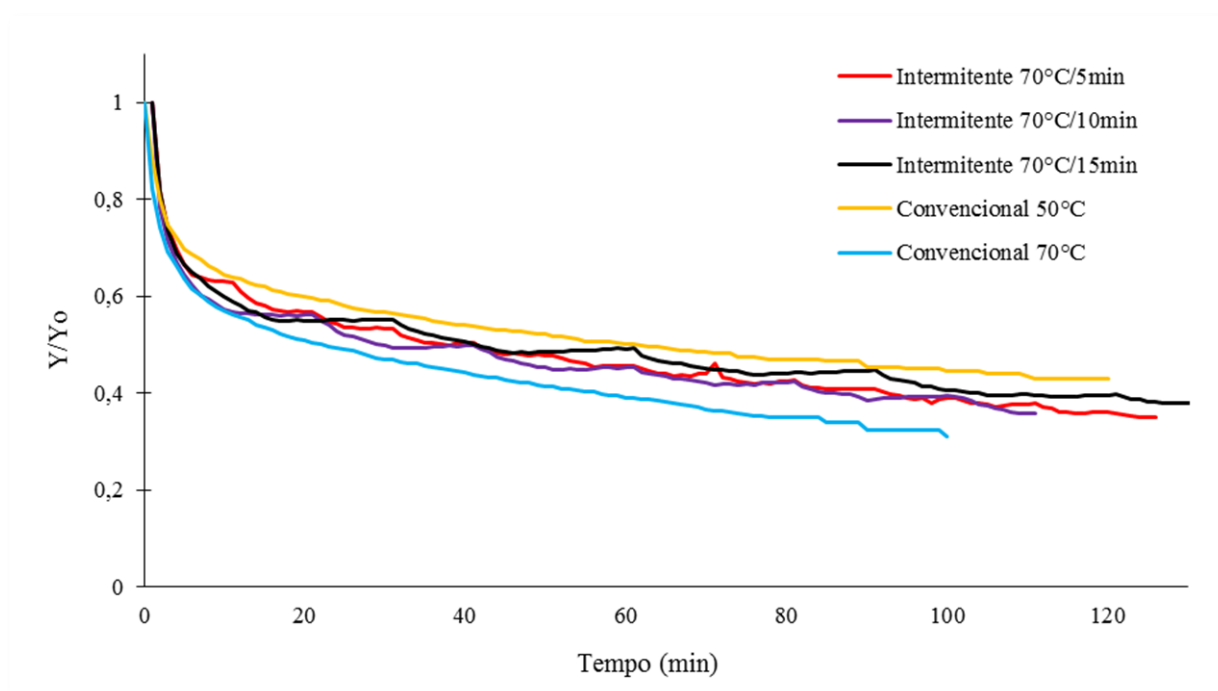


Figura 17. Curvas de secagem intermitente da semente de soja a 70°C nos períodos de 5, 10 e 15 minutos, relacionados com as operações convencionais de 50°C e 70°C

Oliveira e Rocha (2007), em estudo de secagem intermitente de feijão, observaram que, se o tempo dos períodos das modulações for excessivo, ou seja, se o tempo de descanso do leito de jorro que eles analisaram for muito grande, pode ocorrer a hidratação do grão que pode pôr em risco a qualidade do produto, devido aos níveis altos de teor de umidade do feijão no final do processo. Contudo, eles observaram que a eficácia do consumo energético analisado, foi melhor para o processo em regime intermitente.

Na Tabela 3, encontram-se os resultados do tempo de secagem efetivo ou líquido, ou seja, o tempo em que as sementes de soja estiveram em contato com a temperatura do ar de secagem, desconsiderando a intermitência. Nota-se que os diferentes intervalos de período (5, 10 e 15 min), empregados na secagem intermitentes, em ambas temperaturas de secagem (50 e 70°C), não se diferenciaram entre si, porém, em relação as secagens convencionais nessas mesmas temperaturas, apresentaram diferença significativa ao nível de 5% de significância. Com isso, observa-se que o tempo de secagem efetivo da convencional é superior à operação intermitente.

Chua *et al.*, (2003), complementam que o tempo de secagem efetivo em que os produtos estão em contato com o ar a altas temperaturas pode ser reduzida sob operação intermitente. Kumar *et al.*, (2014), destacam que a secagem intermitente pode diminuir o

tempo de secagem consumido e os tempos de secagem. Silva *et al.*, (2016), avaliaram o impacto no tempo de secagem em secagem intermitente de três estágios a 50°C para amostras de peras. Uma redução de 26,2% no tempo de secagem foi obtida com uma velocidade de fluxo de ar de 2,7 m.s⁻¹, em comparação com secadores solar convectivos, que são os secadores convencionais comumente utilizados para a desidratação de peras.

Tabela 3. Tempo de secagem efetivo ou líquido (min.) das secagens convencionais e intermitentes nos períodos (5,10 e 15 min.) e temperatura de ar de secagem de 50°C e 70°C

	Período (min)			
	Convencional	5	10	15
50 °C	111,5 Aa	58 Ab	57,5 Ab	58 Ab
70°C	96,5 Ba	58 Ab	58 Ab	58 Ab

Letras minúsculas iguais em linha não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais em coluna não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Recentemente, diversos autores observaram também que o tempo de secagem efetivo ou líquido foi reduzido sob operação intermitente (FARKAS e RENDIK, 1997; CHIN e LAW, 2010; HERRITSCH *et al.*, 2010; ONG *et al.*, 2012; THOMKAPANICH *et al.*, 2007; KOWALSKI e SZADZIŃSKA, 2014).

Os parâmetros estatísticos para cada modelo empírico e semi-empírico ajustado para cada temperatura de ar de secagem convencional (30, 50 e 70°C) estão apresentados na Tabela 4.

O melhor modelo ajustado para a secagem convencional de temperatura de ar de secagem de 30°C e 70°C, observado na Tabela 3, foi o modelo de Midilli *et al.* e Dois Termos, respectivamente. Para a temperatura do ar de secagem de 50°C, os modelos de Dois Termos e Aproximação da Difusão, respectivamente, foram os que melhores ajustaram.

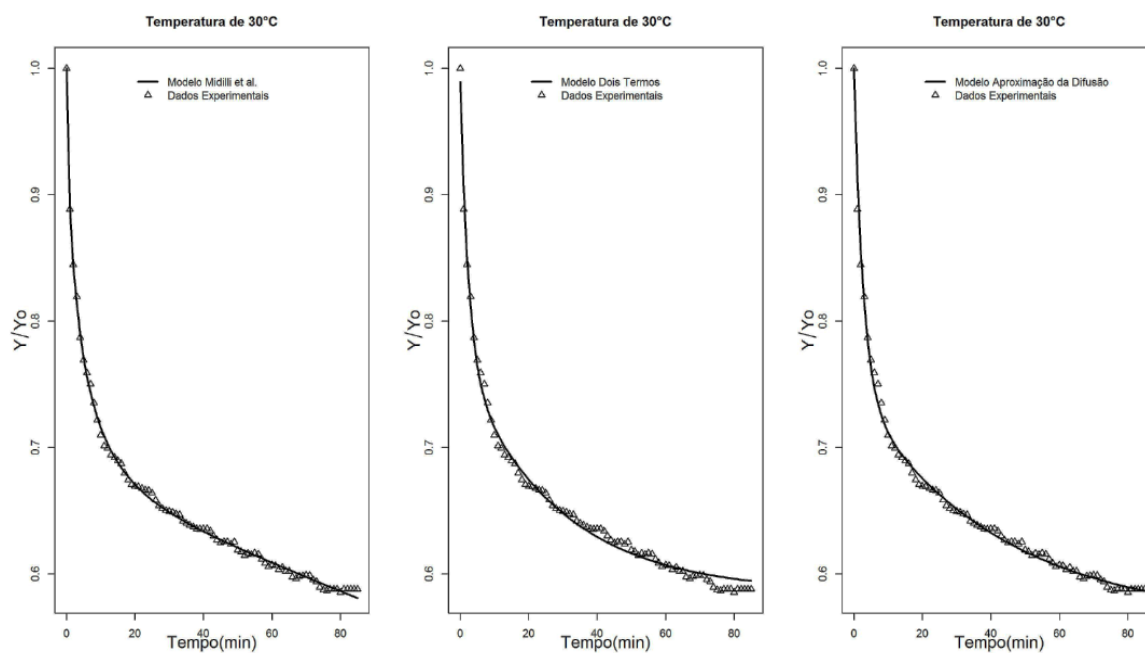
Estes modelos apresentam 3 ou 4 parâmetros, sendo que um número de parâmetros elevado, tende ao melhor ajuste, portanto estes resultados foram esperados. Desta forma, o pior ajuste para todas as temperaturas do ar de secagem (30, 50 e 70°C), foi do modelo de Newton, o qual possui apenas um único parâmetro.

Além disso, a partir da Tabela 4, nota-se que nos modelos dos ajustes das temperaturas de 30,50 e 70°C, todas apresentaram os modelos de Aproximação de Difusão, Midilli *et al.* e Dois Termos como os melhores modelos ajustados. Com isso, as Figuras 18, 19 e 20, respectivamente, representam os gráficos dos ajustes desses modelos nessas temperaturas

(30, 50 e 70°C).

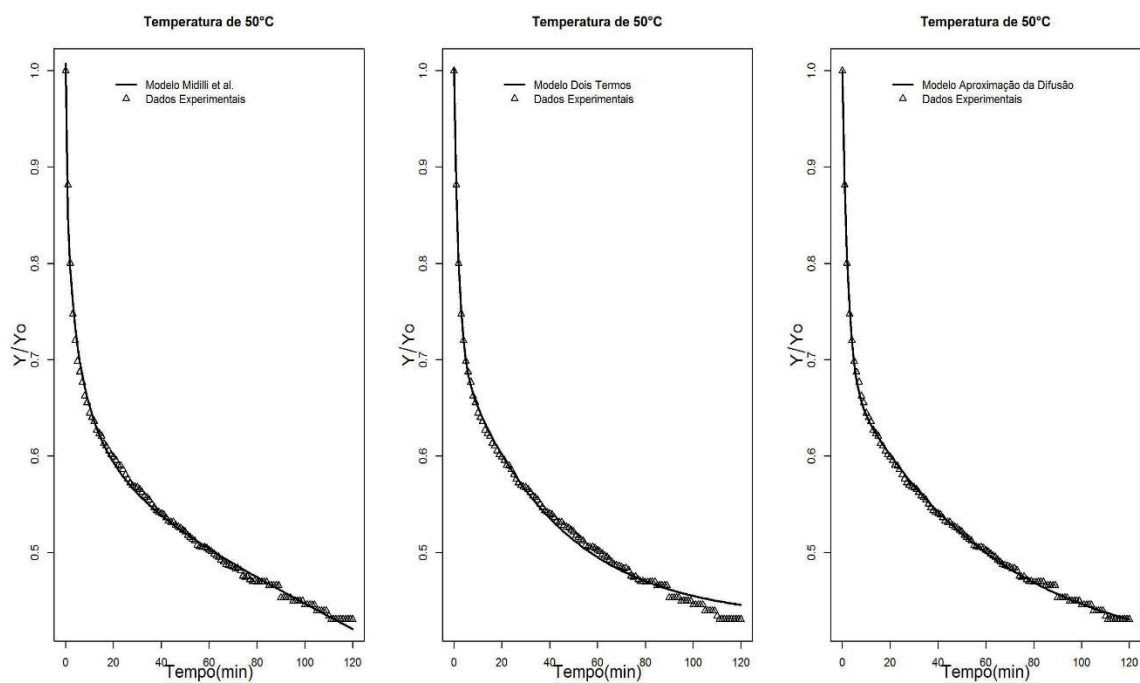
Tabela 4. Valores dos parâmetros estatísticos das secagens convencionais (30, 50 e 70°C)

		SQE	AIC	BIC	EQM	$\sqrt{\text{EQM}}$
30 °C	Newton	0,09596427	-336,5815	-331,6728	0,001115864	0,03340455
	Page	0,004808784	-592,0252	-584,6621	0,000055916	0,007477707
	Henderson e Pabis	0,03978206	-410,3096	-402,9466	0,000462582	0,02150772
	Logarítmico	0,03003422	-432,4824	-422,6650	0,000349235	0,01868783
	Dois Termos	0,002844125	-633,1914	-620,9197	0,000033071	0,005750758
	Aproximação da Difusão	0,002970315	-631,458	-621,6406	0,0000345385	0,00587695
	Midilli <i>et al.</i>	0,002501615	-644,2268	-631,9551	0,000029089	0,00539338
50°C	Newton	0,3549805	-358,2263	-352,6347	0,002933724	0,05416386
	Page	0,02879167	-660,1755	-651,7881	0,0002379477	0,01542555
	Henderson e Pabis	0,09231287	-519,1987	-510,8113	0,000762916	0,02762094
	Logarítmico	0,08812128	-522,8215	-511,6384	0,000728275	0,02698657
	Dois Termos	0,006325637	-839,5480	-825,5691	0,00005227799	0,007230352
	Aproximação da Difusão	0,006330323	-841,4584	-830,2753	0,000052316	0,007233029
	Midilli <i>et al.</i>	0,006508168	-836,1059	-822,127	0,000053786	0,007333929
70°C	Newton	0,5105953	-243,3916	-238,1613	0,005055399	0,07110133
	Page	0,03048806	-526,0340	-518,1887	0,000301862	0,01737418
	Henderson e Pabis	0,1232248	-384,9699	-377,1245	0,001220047	0,03492917
	Logarítmico	0,1119591	-392,6534	-382,1929	0,001108506	0,03329423
	Dois Termos	0,007225829	-667,441	-654,3654	0,00007154286	0,008458301
	Aproximação da Difusão	0,007262763	-668,9261	-658,4656	0,00007190854	0,008479891
	Midilli <i>et al.</i>	0,005860434	-688,5943	-675,5187	0,0000580241	0,007617355



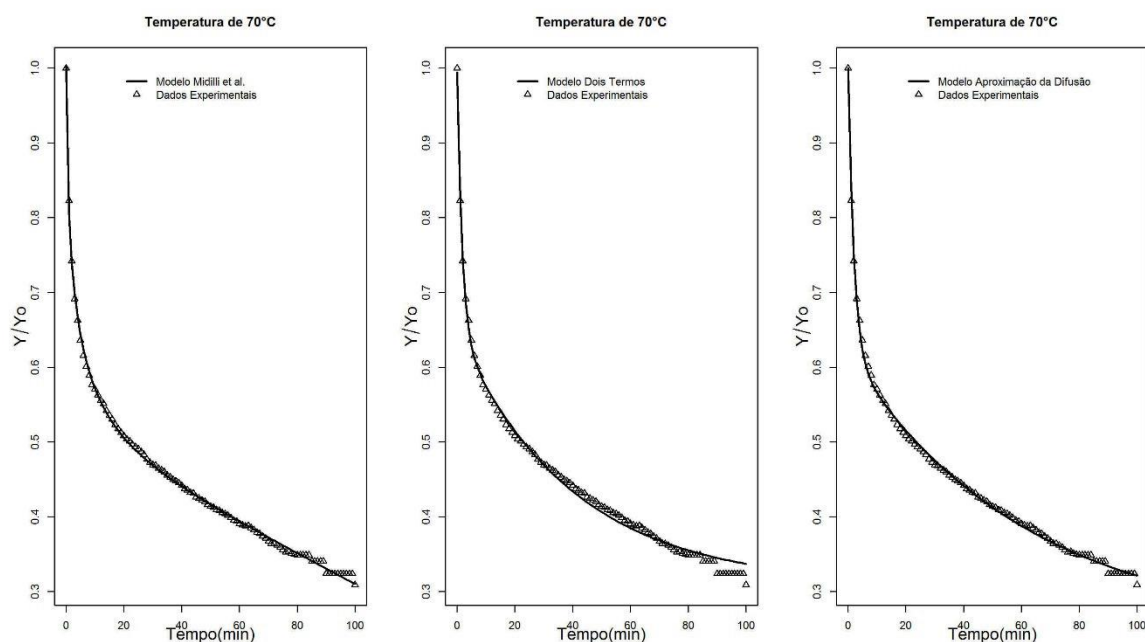
Fonte: Autora

Figura 18. Ajuste dos modelos de Midilli *et al.*, Dois Termos e Aproximação de Difusão, respectivamente, para a temperatura do ar de secagem de 30°C



Fonte: Autora

Figura 19. Ajuste dos modelos de Midilli *et al.*, Dois Termos e Aproximação de Difusão, respectivamente, para a temperatura do ar de secagem de 50°C



Fonte: Autora

Figura 20. Ajuste dos modelos de Midilli *et al.*, Dois Termos e Aproximação de Difusão, respectivamente, para a temperatura do ar de secagem de 70°C

A análise de variância (ANOVA) com dois fatores (Temperatura e Período) para o consumo energético das operações convencionais e intermitentes, encontra-se na Tabela 5, a qual baseia-se no delineamento experimental utilizado com a finalidade de reduzir o erro experimental. Devido a interação do fator duplo (Temperatura: Período; valor $p < 0,5$), realizou-se o desdobramento das médias.

Tabela 5. Análise de variância para o consumo energético (kJ)

Fatores	G.L	Soma Quadrada	Quadrado Médio	F	Valor - p
Temperatura	1	37004836	37004836	777,160	2,959 e-09
Período	3	35394406	11798135	247,780	3,150 e-08
Temperatura:Período	3	1879752	626584	13,159	0,001845
Resíduos	8	380923	47615		

Observa-se na Tabela 6, que os diferentes intervalos de tempos (5,10 e 15 min) utilizados nas secagens intermitentes, em ambas temperatura de secagem (50 e 70°C), não se diferenciaram entre si, ao nível de 5% de significância. Porém, em relação a secagem convencional, apresentaram significância.

Nota-se que a secagem convencional foi a que apresentou maior demanda energética para os processos de secagens das sementes de soja, em ambas as temperaturas de ar utilizadas, conforme a Tabela 6. Com isso, as modulações na temperatura e na vazão de

alimentação em períodos e amplitude específico, conforme realizado nas secagens intermitentes, reduziram a energia necessária do processo, pois diminuem o tempo de secagem efetiva e a utilização do ar de secagem.

Tabela 6. Consumo energético (kJ) das secagens convencionais e intermitentes no período (5,10 e 15 min) na temperatura de ar de secagem de 50°C e 70°C

	Períodos (min)			
	Convencional	5	10	15
50 °C	5763,83 Aa	2998,965 Ab	3137,605 Ab	3163,74 Ab
70°C	9961,7 Ba	5899,06 Bb	5734,2851 Bb	5635,415 Bb

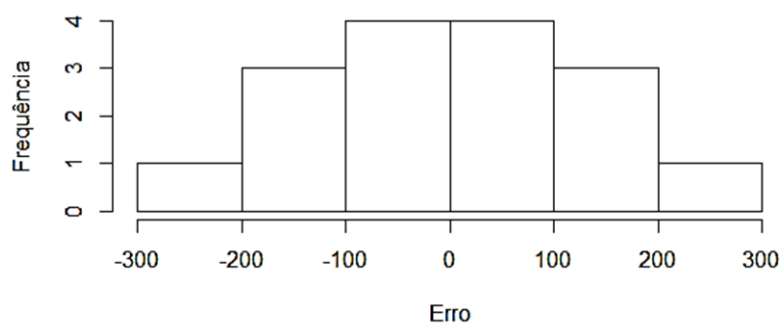
Letras minúsculas iguais em linha não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais em coluna não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Tal ação é muito satisfatória, pois representa uma economia de aproximadamente 46% de energia em relação à secagem convencional para a temperatura de ar de secagem de 50°C, e de 42% para a temperatura do ar de 70°C. Outro fato relevante a ser ressaltado, é que, economizar energia elétrica significa contribuir para a sustentabilidade ambiental mundial, além de utilizá-la de forma a obter o máximo benefício com um menor consumo, evitando os desperdícios ou o uso inadequado, sem, no entanto, diminuir a qualidade do processo de secagem.

Kowalski e Pawlowski (2011), examinaram a eficácia da indústria intermitente em relação ao tempo de secagem, ao consumo de energia e a qualidade das amostras secas. Alterando periodicamente a temperatura de secagem do ar entre 100°C e 40°C, em amostras de caulim em formato cilíndrico. Concluíram, que a secagem em condições intermitentes diminui o consumo de energia em cerca de um terço em comparação com condições de secagem constantes e fixas, além de melhorar a qualidade da amostra final.

Holowaty *et al.*, (2012), avaliaram a secagem intermitente de ramos de erva-mate. Posteriormente, validaram um modelo empírico, afim de descrever a variação da umidade com o tempo e a temperatura do processo, utilizando diferentes condições de operação. Este modelo foi utilizado para simular um secador industrial, a fim de minimizar o consumo de energia, mantendo constante o teor final de umidade. Os melhores resultados foram obtidos trabalhando nas seguintes condições: aplicação de calor por 15 min., 15 min. de repouso e aplicação contínua de calor. Além disso, observaram que ao trabalhar nessas condições, 10% do consumo de energia pode ser reduzido.

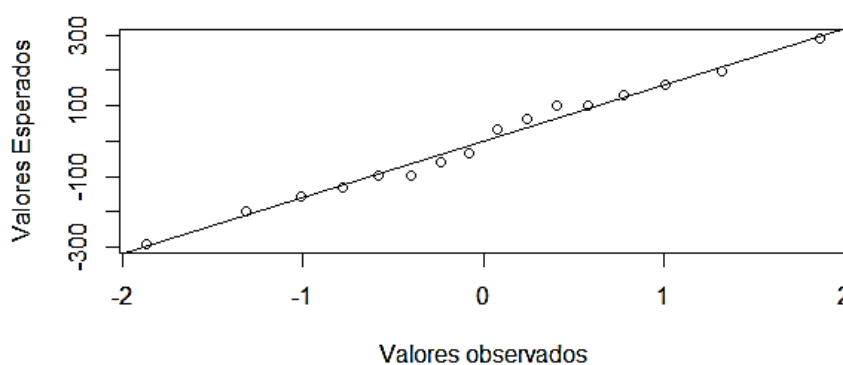
A análise dos resíduos, foi obtida afim de verificar se as pressuposições exigidas para proceder à análise de variância foram plausíveis. A Figura 21, representa o histograma dos resíduos obtidos, nota-se que apresentam distribuição simétrica, ou seja, os resíduos apresentam distribuição normal.



Fonte: Autora

Figura 21. Histograma do resíduo versus frequência

Além disso, pode-se utilizar também para avaliar a normalidade o gráfico Q-Q Plot, conforme a Figura 22. Esse gráfico é composto pelo eixo da abscissa que apresenta os valores observados dos resíduos e no eixo das ordenadas estão os valores dos resíduos sob a hipótese de que a distribuição deles é normal. Conforme a Figura 23, observa-se que os pontos estão próximos a reta de referência apresentando uma boa aderência dos dados à distribuição normal.



Fonte: Autora

Figura 22. Gráfico Q-Q Normal de resíduos

Os métodos gráficos citados anteriormente possuem a desvantagem de serem subjetivos, pois dependem de interpretação visual. Para um resultado mais objetivo, utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk, o qual é considerado um dos mais poderosos e eficientes teste de normalidade. O teste de Shapiro-Wilk foi realizado no software R (R DEVELOPMENT

CORE TEAM 2014) e obteve-se p-valor de 0,9862, com isso, não rejeitou-se a hipótese da normalidade dos resíduos. Logo, por meio da análise de resíduos verificamos que o modelo adotado na análise de variância é adequado.

4.2 Avaliações da Qualidade Fisiológica das Sementes

A representação da avaliação e contagem do teste de germinação realizado para as sementes de soja Monsoy 6410 IPRO, encontra-se ilustrada na Figura 23.



Fonte: Autora

Figura 23. Representação da avaliação e contagem do teste de germinação. I) Avaliação das plântulas no 5^o dia após o início do teste (Primeira Contagem) -Secagem Convencional de 50^oC. II) Contagem das plântulas normais no 5^o dia após o início do teste – Secagem I 50^oC – 10 min. III) Representação da plântula normal, com todas características definidas (raiz primária e hipocótilo maior que 3 cm e presença de no mínimo 2 raízes secundárias). IV) Contagem das plântulas normais no 5^o dia após o início do teste – Secagem Intermitente 70^oC – 10 min. V) Representação de plântulas anormais, descartadas da contagem final do teste de germinação.

A análise de variância, a qual visa verificar se existe diferença significativa entre as médias e se os fatores (temperatura e tempo) exercem influência nas variáveis respostas: primeira contagem e germinação, encontram-se na Tabela 7.

Conforme a Tabela 7, nota-se que existe interação significativa ao nível de 5% para o fator duplo (Temperatura: Período), pois apresenta valor- $p < 0,05$. Com isso, realizou-se o

desdobramento das médias.

Tabela 7. Análise de variância para o Teste de Germinação

Fatores	G.L	Primeira Contagem	Germinação
		Valor - p	Valor - p
Temperatura	1	< 2,2 e-16	< 2,2 e-16
Período	3	0,0067481	0,0030482
Temperatura: Período	3	0,0002245	0,0002446
Resíduo	24		

Os resultados obtidos na primeira contagem e a contagem final do teste de germinação encontra-se na Tabela 8, ambos expressos em porcentagem de plântulas normais.

Tabela 8. Médias estimadas de plântulas normais do Teste de Germinação, para a secagem convencional e intermitente nas temperaturas de 50°C e 70°C e períodos 5,10 e 15 min

Primeira Contagem (5° dia)					Germinação (8° dia)				
Período (min)					Período (min)				
	Convencional	5	10	15		Convencional	5	10	15
50°C	94 Aa	87,5 Aa	82,5 Aa	88 Aa	50°C	94 Aa	89 Aa	82,5 Aa	88 Aa
70°C	18 Bbc	31 Ba	26,5 Bab	9 Bc	70°C	18 Bbc	31 Ba	26,5 Bab	9 Bc

Letras minúsculas iguais em linha não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais em coluna não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Para que as sementes de soja sejam comercializadas, elas precisam apresentar uma germinação mínima de 80%, recomendado para sementes fiscalizadas (EMBRAPA, 1993). Com isso, as sementes submetidas à secagem intermitente a 50°C, em todos os períodos, apresentaram a mesma qualidade fisiológica, comparada à secagem convencional a 50°C. Além disso, ambos os métodos de secagem, nessa mesma temperatura, apresentaram germinação mínima para comercialização (Tabela 8).

Embora os lotes de sementes apresentem porcentagens de germinação semelhantes, frequentemente registram-se diferenças na velocidade de germinação, sugerindo que existem diferenças de vigor entre eles (NAKAGAWA *et al.*, 1999), sendo mais vigorosas, portanto aquelas sementes com maior velocidade na primeira contagem.

Porém, os ensaios de secagem na temperatura de 70°C, apresentaram valores impróprios para a comercialização, (Tabela 8). Alta temperatura aceleraram a taxa de

processos bioquímicos, provocando uma deterioração mais rápida, que resulta em baixa qualidade nas sementes (SHELAR *et al.*, 2008).

Contudo, apesar de nenhuma operação de secagem à 70 °C apresentar uma porcentagem de plântulas normais superior a 80%, destaca-se que as secagens intermitentes de 5 e 10 minutos promoveram os maiores valores no potencial germinativo de 31 e 26,5 %, respectivamente (Tabela 8). Possivelmente, este resultado está associado ao fato da secagem intermitente proporcionar uma temperatura na massa da semente menor do que na secagem convencional ao final de 5 e 10 minutos, em virtude dos maiores tempos de evaporação no processo intermitente, o que proporciona menores temperaturas no interior da semente e assegura um maior potencial germinativo.

Observa-se que a temperatura do ar de secagem é um fator que influencia o teste de germinação, interferindo significativamente na qualidade das sementes de soja.

A seguir, é apresentado os resultados do teste de vigor, que complementam a análise de qualidade das sementes, o qual avaliam ou detectam diferenças na qualidade fisiológica de lotes com germinação semelhantes. Além de ser constituído pela primeira contagem da germinação avaliada anteriormente, o teste de vigor também pode ser constituído pelo teste de crescimento de plântulas, responsável por analisar a característica física da plântula, medindo-se a raiz primária e o hipocótilo com o auxílio de uma régua milimétrica, conforme a Figura 24.



Fonte: Autora

Figura 24. Medição da raiz primária e hipocótilo com o auxílio de uma régua milimétrica para se obter o comprimento total das plântulas normais

A análise de variância do teste de vigor, encontra-se na Tabela 9. Observa-se que a raiz, foi a única estrutura que ocorre interação significativa ao nível de 5% para o fator duplo (Temperatura: Período), pois apresenta valor $p < 0,05$, portanto, realizou-se o desdobramento das médias. Porém, para as demais estruturas (plântula total e parte aérea), não observou interação significativa ao nível de 5%.

Tabela 9. Análise de variância para o teste de vigor: plântula total, hipocótilo e raiz

Fatores	G.L	Plântula Total	Hipocótilo	Raiz
		Valor - p	Valor - p	Valor - p
Temperatura	1	7,303 e-10	2,187 e-08	3,981 e-08
Período	3	0,003509	0,3534	9,031 e-05
Temperatura: Período	3	0,078828	0,6554	0,003082
Resíduos	24			

Nota-se que a temperatura de 50°C proporcionou maior crescimento das plântulas (28,44 cm), (Tabela 10). Tal fato mostra que a essa temperatura, a semente apresenta melhor desempenho fisiológico e maior reserva disponível para o desenvolvimento da plântula total, interferindo diretamente no seu crescimento e vigor.

Além disso, o fator tempo também provocou um efeito no comprimento da plântula total, sendo a secagem intermitente, em todos os tempos, responsável por apresentar melhor desempenho no comprimento, comparado com a secagem convencional, conforme a Tabela 10. Com isso, as modulações realizadas na secagem intermitente foram fundamentais na obtenção do melhor desempenho fisiológico das sementes.

Tabela 10. Médias estimadas para avaliar o comprimento de plântula total (raiz primária + hipocótilo) em cm/plântula, em relação ao fator temperatura e o fator tempo

Temperatura*		Período **			
50°C	70°C	Convencional	5	10	15
28,44 A	17,56 B	19 b	23,75 a	24,87 a	24,37 a

*Letras maiúsculas iguais em linhas não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

** Letras minúsculas iguais em linha não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Em relação ao hipocótilo, observou-se diferença significativa entre as temperaturas de secagem (50°C e 70°C), em que a primeira apresentou um desempenho melhor, com valor de 12,38 cm, ao passo que a segunda apresentou uma média de comprimento do hipocótilo de 6,25 cm, conforme a Tabela 11. Porém, não foi observado diferença significativa entre os

períodos de secagem.

Tabela 11. Médias estimadas para avaliar o comprimento do hipocótilo em cm/plântula, em relação ao fator temperatura e o fator tempo

Temperatura*		Período **			
50°C	70°C	Convencional	5	10	15
12,38 A	6,25 B	8,62 a	9,88 a	10,12 a	8,62 a

*Letras maiúsculas iguais em linhas não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

** Letras minúsculas iguais em linha não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Já para o comprimento da raiz houve diferença significativa em relação ao fator temperatura, conforme a Tabela 12. No entanto, apenas o período de 15 minutos que a temperatura não apresentou influência no comprimento da raiz. Para a temperatura de 50°C, o método de secagem utilizado não influenciou significativamente o vigor. Porém, para uma temperatura mais elevada (70°C), o método intermitente promoveu maior incremento no comprimento da raiz, em relação a secagem convencional.

Tabela 12. Médias estimadas para avaliar o comprimento da raiz em cm/plântula, em relação ao fator duplo (temperatura: tempo)

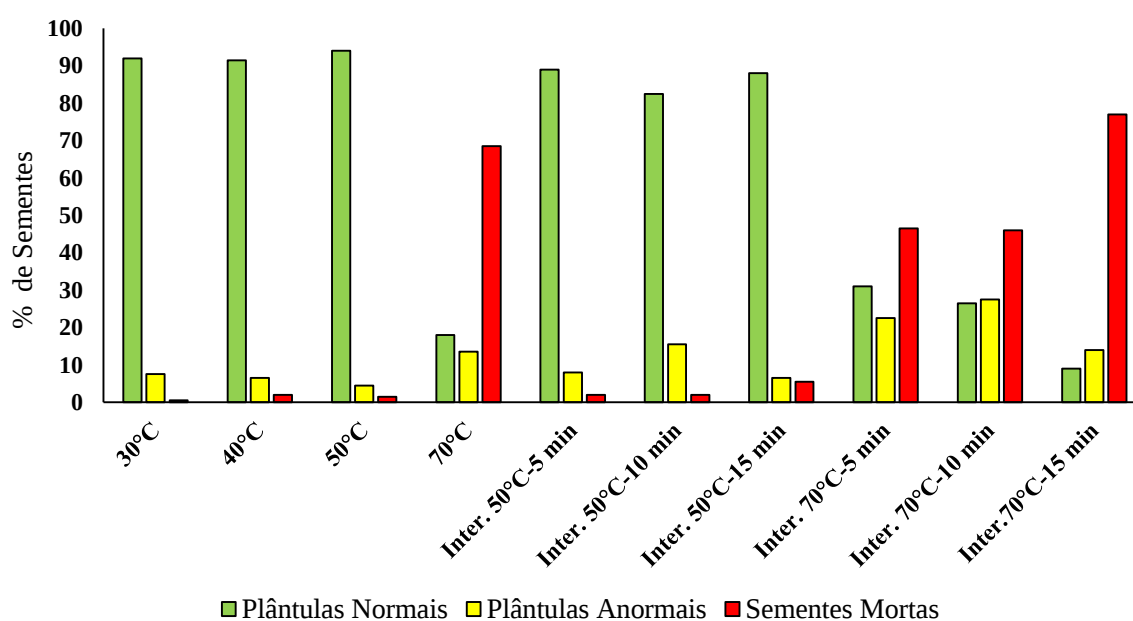
Período (min)				
50°C	Convencional	5	10	15
	15,75 Aa	16Aa	16 Aa	17,5 Aa
70°C	6,25 Bb	11,25Ba	13,25 Ba	14,5 Aa

Letras minúsculas iguais em linha não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais em coluna não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Esses resultados, são condizentes com Hartmann Filho *et al.* (2016), os quais realizaram um estudo com sementes de soja com teor de água de aproximadamente 23%, submetidas a diferentes temperaturas de secagem (40, 50, 60, 70 e 80 °C) até atingirem $12,5 \pm 0,7\%$ (b.u.), sendo posteriormente armazenadas, em ambiente não controlado, durante 180 dias. A cada 45 dias foi realizado o teste de germinação e as avaliações referentes ao desempenho de plântulas, determinando-se os comprimentos total, do hipocótilo e da raiz, e ainda verificando suas respectivas massas de matéria seca. Com base nos resultados conclui-se que o aumento da temperatura do ar de secagem afeta a qualidade fisiológica das sementes, sendo esse efeito potencializado com o tempo de armazenamento, principalmente sobre o comprimento da raiz, sendo a temperatura do ar de 40 °C a mais recomendada para

a secagem de sementes de soja.

A Figura 25, informa a porcentagem de sementes que desenvolveu-se em plântulas normais, anormais e sementes mortas. Conforme estabelecido pela Embrapa (1993), para que as sementes de soja sejam comercializadas, elas precisam apresentar uma porcentagem mínima de 80% em plântulas normais. Com isso, nota-se que a temperatura de 70°C, seja em operação convencional ou em intermitente (5,10 e 15 min.), intensifica o desenvolvimento das sementes em anormais e mortas, influenciando diretamente no desempenho fisiológico e consequentemente intervindo na comercialização das sementes de soja.



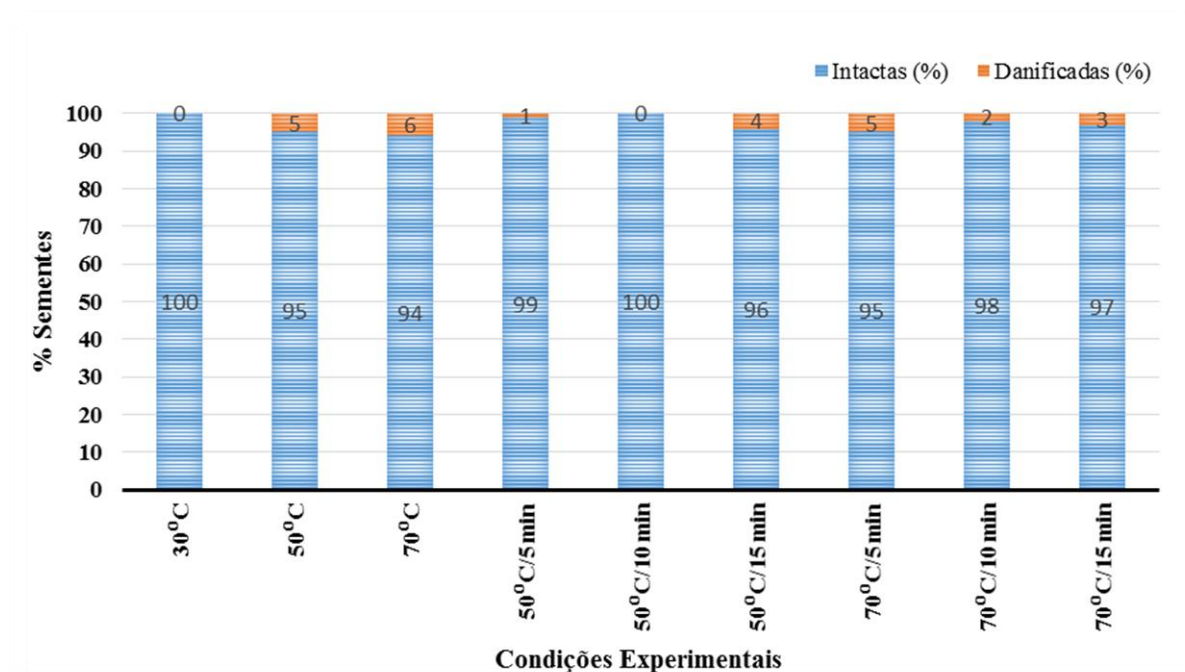
Fonte: Autora

Figura 25. Porcentagem de sementes de soja que desenvolveu-se em plântulas normais, anormais e sementes mortas, conforme a operação de secagem estabelecida

A interpretação do teste de fissuras ou o teste do hipoclorito de sódio para sementes de soja se dá pelo percentual de sementes embebidas, ou seja, se for superior a 10%, a semente está muito danificada. Esse índice de dano indica a necessidade de efetuar ajustes na colhedora ou correções nos equipamentos de transporte na linha de beneficiamento.

Conforme a Figura 26, nota-se que tanto para a operação convencional e intermitente não houve valores superiores ao limite de 10 %. Um fator que contribuiu para esse resultado, foi o fato do lote de sementes de soja utilizado (cultivar Monsoy 6410 IPRO) apresentar cautela e excelência em relação ao processo de campo até a indústria, fato comprovado pela

temperatura de 30°C. Entretanto, a secagem convencional de 70 e 50°C, respectivamente, apresentaram os maiores valores de sementes danificadas. Com isso, é possível inferir que as modulações realizadas na secagem intermitente são fundamentais, por ocasionar menor dano na semente e, conseqüentemente, menor ruptura do tegumento.



Fonte: Autora

Figura 26. Resultado do teste de fissura realizado para as condições experimentais estabelecidas

Shelar (2008), destaca que a semente de soja é altamente suscetível a lesões mecânicas e danos ocorridos durante o manuseio pós-colheita. Em seu estudo, avaliou os aspectos que interferem na deterioração da qualidade das sementes de soja e os fatores responsáveis durante o manuseio pós-colheita. Observou que as lesões produzidas devido ao choque mecânico foram maiores com a redução da umidade da semente. Além disso, o tipo e a quantidade de danos mecânicos causados durante o manuseio afetam a viabilidade e o vigor da semente de soja durante o armazenamento

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES GERAIS

No levantamento da cinética de secagem de sementes de soja em camada delgada, observou-se que as taxas de secagem aumentaram com aumento da temperatura, além disso, em alguns casos a intermitência contribui na taxa de secagem em relação à secagem convencional. Outro fato constatado foi que a velocidade do ar não exerceu influência sobre a cinética de secagem. Além disso, os modelos generalizados empíricos e semiteóricos melhores ajustados para as secagens convencionais foram de Aproximação de Difusão, Dois Termos e Midilli *et al.* Desta forma, estes modelos podem ser usados na simulação, na otimização e no controle de processos de secagem como também no projeto de equipamentos.

As secagens intermitentes apresentam gastos energéticos inferiores aos das secagens convencionais. Os resultados indicam uma redução de 46% de energia em relação à secagem convencional para a temperatura de ar de secagem de 50°C, e de 42% para a temperatura do ar de 70°C. Além disso, o tempo efetivo das secagens foram reduzidas significativamente, em aproximadamente 40 minutos sob operação intermitente em relação as secagens convencionais, em ambas as temperaturas de secagem (50 e 70°C).

Secagens intermitentes na temperatura do ar de 50°C em todos os períodos (5, 10 e 15 minutos) apresentaram condições na qualidade da semente igual e, em alguns casos, superiores à convencional, alterando o mínimo possível a estrutura física e nutricional das sementes. Além de apresentarem germinação suficiente para a sua comercialização ($\geq 80\%$), proporcionando um menor desgaste na reserva disponível da semente, interferindo diretamente no seu crescimento e vigor, resultando em valores superiores em relação ao comprimento de plântula total, comparada à convencional. Desta forma, as secagens intermitentes na temperatura de 50°C são as que apresentaram melhores condições em relação a qualidade fisiológica das sementes de soja, consumo energético e tempo efetivo, tornando a condição de temperatura mais viável.

Temperatura de operação elevada (70°C), em ambos os métodos de secagem, resultou na danificação significativa do material, causando redução na viabilidade e também no vigor das sementes. Essa ação térmica tem a capacidade de danificar os materiais termo sensíveis, acelerando o processo de deterioração e comprometendo na qualidade das sementes de soja.

CAPÍTULO 6

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Deseja-se avaliar a influência que a secagem intermitente nas sementes de soja podem acarretar na composição química do óleo após o processo de extração das sementes secas. Isto é, verificar se a secagem intermitente promove melhorias em relação aos parâmetros de qualidade, na preservação de ácidos graxos, tocoferóis e principalmente na atividade antioxidante do óleo de soja. Paralelamente, pretende-se modelar, simular e validar a secagem intermitente, visando determinar as condições ótimas para a secagem intermitente.

CAPÍTULO 7

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE. Abiove: Brasil deve registrar recorde na produção e exportação de soja em 2018 **ABIOVE**, 2018. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2018/03/brasil-deve-registrar-recorde-na-producao-e-exportacao-de-soja-em-2018> >. Acesso em: 06 Março 2018.

AKAIKE, H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, Proc. 2nd International Symposium on Information Theory (eds. B.N. Petrov and F. Csaki), p. 267-281, 1973.

ALEXANDRE, H. V. et al. Cinética de secagem de abacaxi cv. pérola em fatias. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 11, p. 123-128, 2009.

ALMEIDA, F. D. A. C.; DUARTE, M. E. M.; MATA, M. E. R. M. C. Tecnologia de armazenamento em sementes. Campina Grande: UFCG, 2006. p. 402.

AQUERRETA, J. et al. Effect of high temperature intermittent drying and tempering on rough rice quality. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 611–618, 2007.

BAILEY, J. E. Whole grain storage. In: **Storage of cereal grains and their products**. St. Paul: AACC: Christensen, C. M, 1974. p. 333-360.

BAUDET, L.; VILLELA, F. A. **Armazenamento Garantindo o Futuro**. SEED NEWS Pelotas: Editora Becker e Peske Ltda, 2000. 8-32 p.

BENALI, M. Drying of yellow pea starch on inert carriers: Drying kinetics, moisture diffusivity, and product quality.. **Journal of Food Engineering**, v. 110, p. 337–344, 2012.

BERBERT, P. A. et al. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 60, p. 167-173, 1995.

BIAGI, J. D.; BERTOL, R. **Secagem de Grãos**. Campinas, SP, 2002. 1-9 p.

BIAGI, J. D.; BERTOL, R.; CARNEIRO, M. C. Secagem de grãos para unidades centrais de armazenamento. In: LORINI, I.; MIIKE, L. H.; SCUSSEL, V. M. **Armazenagem de Grãos**. IBG, Campinas, SP: [s.n.], 2002. Cap. 5.2, p. 289 – 307.

BOERI, C. N.; KHATCHATOURIAN, O. Modeling Convective Drying of Soybean (Glycine max L): Experiments and Numerical Solution. Advances in Mathematical and Computational Methods. Conferência Internacional sobre Engenharia de Eletrônica, Informação e Comunicação (EICE 2012). ASME Press, 2012.

BON, J.; KUDRA, T. Enthalpy-Driven Optimization of Intermittent Drying. **Drying Technology**, v. 25, p. 523–532, 2007.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.. In: **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS, 2009. p. 399.

BYRUM, J. R.; COPELAND, L. O. Variability in vigour testing of maize (Zea mays L.) seed. **Seed Science and Technology**, v. 23, p. 543-549, 1995.

CANO-CHAUCA, M. et al. Curvas de secagem e avaliação da atividade de água da banana passa. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 22, p. 122-132, 2004.

CHEN, Y.; BURRIS, J. S. Desiccation tolerance in maturing maize seed: membrane phospholipid composition and thermal properties. **Crop Science**, v. 30, p. 766-770, 1991.

CHIN, S. K.; LAW, C. L. Product quality and drying characteristics of intermittent heat pump drying of *Ganoderma tsugae* Murrill. **Drying Technology**, v. 28, p. 1457–1465, 2010.

CHONG, C. H.; LAW, C. L. Application of Intermittent Drying of Cyclic Temperature and Step-Up Temperature in Enhancing Textural Attributes of Dehydrated *Manilkara zapota*. **Drying Technology**, v. 29, p. 245–252, 2011.

CHUA, K. J. et al. Heat pump drying of banana, guava and potato pieces: effect of cyclical

variations of air temperature on convective drying kinetics and color change. **Drying Technology**, v. 18, p. 907–936, 2000b.

CHUA, K. J. et al. Cyclic air temperature drying of guava pieces: effects on moisture and ascorbic acid contents. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v. 78, p. 72–78, 2000a.

CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K. Intermittent drying of bioproducts, an overview. **Bioresource Technology**, v. 90, p. 285-295, 2003.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis. **Cenário das Energias Renováveis**. 2014. 3 p.

CIL, B.; TOPUZ, Z. Fluidized Bed Drying of Corn, Bean and Chickpea. **Journal of Food Process Engineering**, v. 33, p. 1079–1096, 2010.

CNOSSE, A. G.; JIMÉNEZ, M. J.; SIEBENMORGEN. T. J. Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 59, p. 61–69, 2003.

DEFENDI, R. O.; PARAÍSO. P. R.; JORGE. L. M. M. The air temperature modulation impact on the drying of soybeans in a fixed bed. **Drying Technology**, v. 34, p. 516–529, 2016.

DEFENDI, R. O.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. The air temperature modulation impact on the drying of soybeans in fixed bed. **Drying Technology**, v. 34, p. 516-529, 2015.

DEFENDI, R. O. **Secagem Periódica de Soja em Leito Fixo**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.

DEFENDI, R. O. **Otimização da Secagem periódica de soja em leito fixo**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

DEMIR, V. et al. Mathematical modelling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves. **Biosystems Engineering**, v. 88, p. 325-335, 2004.

DOYMAZ, I.; TUGRUL, N.; PALA, M. Drying characteristics of dill and parsley leaves. **Journal of Food Engineering**, v. 77, p. 559-565, 2006.

ELIAS, M. C. Fatores que influenciam a aeração e o manejo da conservação de grãos. In: **Armazenagem de grãos**. Campinas: IBG, 2002. p. 311-359.

ELIAS, M. C. Armazenamento e Conservação dos Grãos. Polo de Inovação Tecnológica em Alimentos da Região Sul Conselho Regional de Desenvolvimento da Região Sul, Pelotas, 2003. p. 1-83.

EMBRAPA, Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento e da Reforma Agrária. Serviço de produção de sementes básicas. Padrões estaduais de sementes. Brasília: EMBRAPA/SPI, p. 47, 1993.

EMBRAPA. Paraná bate Estados Unidos na produtividade de soja. **Blog da Embrapa**, 2017. Disponível em: <<http://blogs.canalrural.com.br/embrapasoja/2017/05/23/parana-bate-estados-unidos-na-produtividade-de-soja/>>. Acesso em: 01 Setembro 2017.

FARIA, R. Q. et al. Cinética de secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, p. 573-583, 2012.

FARKAS, I.; RENDIK, Z. Intermittent thin layer corn drying. **Drying Technology**, v. 15, p. 1951–1960, 1997.

FOUST, A. et al. **Princípio das operações unitárias**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A, 1982. Cap. 18, p. 403-432.

GALÃO, O. F. et al. Differences of fatty acid composition in Brazilian genetic and conventional soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill) grown in different regions. **Food Research International**, v. 62, p. 589-594, 2014.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport processes and unit operations**. 3rd ed. ed. USA: Prentice–Hall International, 1993. Cap. 9, p. 521-583.

HAMPTON, J. G.; TEKRONY, D. M. Accelerated aging test. **Handbook of vigour tests methods**. Zürich: International Seed Testing Association, 1995. p. 1-10.

HARTMANN FILHO, C. P. et al. The effect of drying temperatures and storage of seeds on the growth of soybean seedlings. **Journal of Seed Science**, v. 38, p. 287-295, 2016.

HERRITSCH, A.; DRONFIELD, J.; NIJDAM, J. J. Intermittent and Continuous Drying of Red Beech Timber From the Green Condition. **Drying Technology**, v. 28, p. 269-277, 2010.

HO, J. C. et al. Analytical study of cyclic temperature drying: effect on drying kinetics and product quality. **Journal of Food Engineering**, v. 51, p. 65-75, 2002.

HÖFS, A. et al. Emergência e crescimento de plântulas de arroz em resposta à qualidade fisiológica de sementes. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 26, p. 92-97, 2004.

HOLOWATY, S. A.; RAMALLO, L. A.; SCHMALKO, M. E. Intermittent drying simulation in deep bed dryer of yerba mate. **Journal of Food Engineering**, v. 111, p. 110-114, 2012.

KASHANINEJAD, M. et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 98–108, 2007.

KOWALSKI, S. J.; PAWLOWSKI, A. Energy consumption and quality aspect by intermittent drying. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 50, p. 384-390, 2011.

KOWALSKI, S. J.; SZADZINSKA, J. Convective-intermittent drying of cherries preceded by ultrasonic assisted osmotic dehydration. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 82, p. 65-70, 2014.

KRZYŻANOWSKI, F. C. et al. Tecnologias para produção de sementes de soja. Embrapa Soja-Folderes/Folhetos/Cartilhas (INFOTECA-E), 1997.

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA NETO, J. D. B.; COSTA, N. D. **Teste do hipoclorito de sódio para semente de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2004.

KULLBACK, S.; LEIBLER, R. On information and sufficiency. **Annals of Mathematical Statistics**, 22, 1951. 79-86.

KUMAR, C.; KARIM, M.; JOARDDER, M. U. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering**, v. 121, p. 48-57, 2014.

LAZZARI, F. A. **Umidade, fungos e micotoxinas na qualidade de sementes, grãos e rações**. In: LAZZARI, F. A. (Ed.). Curitiba, 1993. 140 p.

LIMA, D. C. **Avaliação do vigor e germinação de sementes de soja a partir da análise de imagens de plântulas**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, SP, 2015.

LUZ, G. R. **Modelagem Matemática e Análise do Secador Rotativo de Farelo de Soja**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

MADUREIRA, I. A. et al. Cinética de secagem da polpa do figo-da-india. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 13, p. 345-354, 2011.

MANCINI, M. C. **Transferência de Massa em Secadores de Grãos**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, 1996.

MARCOS FILHO, J. Deterioração de sementes. In: MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Piracicaba: FEALQ, 2005. Cap. 9, p. 291-352.

MARCOS FILHO, J. et al. Qualidade fisiológica e comportamento de sementes de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) no armazenamento e no campo, v. 42, p. 194-249, 1985.

MARCOS FILHO, J. et al. Testes de vigor: importância e utilização. In: **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, Cap.1, 1999. p. 1-21.

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

MCDONALD JUNIOR, M. B. Vigor test subcommittee report. **News Lett. Assoc. Off. Seed Anal**, v. 54, 1980, p. 37- 80.

MEISAMI-ASL, E. et al. Determination of suitable thin layer drying curve model for apple slices (variety-Golab). **Plant Omics Journal**, v. 3, p. 103–108, 2010.

MENEGHETTI, V. L. et al. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 115-1120, 2012.

MENEGHETTI, V. L. et al. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 1115-1120, 2012.

MISCHAN, M. M.; PINHO, S. Z. Modelos não lineares: Funções assintóticas de crescimento. Cultura Acadêmica. São Paulo, 2014.

MORAIS, S. J. S. et al. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 455-463, 2013.

MOREANO, T. B. et al. hanges in the effects of weathering and mechanical damage on soybean seed during storage. **Seed Science and Technology**, v. 39, p. 604-611, 2011.

MOTTA LIMA, O. C.; PEREIRA, N. C.; MENDES, E. S. (Análise da cinética de secagem de papel artesanal com ar ambiente em convecção forçada. **Acta Scientiarum Technology**, v. 24, p. 1665-1671, 2008.

NAKAGAWA, J.; F. C., V. R. D. . F. N. J. D. B. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina, 1999. p. 1-24.

NISHIYAMA, Y.; CAO, W. Y.; LI, B. Grain intermittent drying characteristic analyzed by a simplified model. **Journal of Food Engineering**, v. 76, p. 272–279, 2006.

OLIVEIRA, C. A.; ROCHA, S. C. S. Intermittent Drying of Beans in a Spouted Bed. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 24, p. 571–585, 2007.

OLIVEIRA, D. E. C. et al. Cinética de secagem dos grãos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 11, p. 190-201, 2012.

ONG, S. P.; LAW, C. L.; HII, C. L. Optimization of Heat Pump–Assisted Intermittent Drying.. **Drying Technology**, v. 30, p. 1676–1687, 2012.

PAN, Y. K.; ZHAO, L. J.; HU, W. B. The effect of tempering-intermittent drying on quality and energy of plant materials. **Drying Technology**, v. 17, p. 1795-1812, 1998.

PAN, Y. K. et al. Intermittent Drying of Carrot in a Vibrated Fluid Bed: Effect on Product Quality. **Drying Technology**, v. 17, p. 2323–2340, 1999.

PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modelling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 52, p. 349-357, 2002.

PEREZ, L. D. C. G. C. et al. Cinética de secagem da polpa cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pré-desidratada por imersão impregnação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 102- 106, 2013.

PUTRANTO, A. et al. Intermittent drying of mango tissues: implementation of the reaction engineering approach.. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, p. 1089–1098, 2011.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 2000.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**, 2014.

RAMALLO, L. A.; LOVERA, N. N.; SCHMALKO, M. E. Effect of the application of intermittent drying on *Ilex paraguariensis* quality and drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, v. 97, p. 188-193, 2010.

REGINATO, M. P. et al. **Boas práticas de armazenagem de grãos**. grãos. In: 8 ° ENEPE UFGD, 2014.

ROMERO, J. A. D. S. et al. **Estudo da secagem de soja em operação periódica**. COBEQ XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2010.

SANTOS, A. S. et al. Testes de vigor em sementes de três cultivares de soja.. **Revista Conexão Eletrônica**, Três Lagoas, v. 14, 2017.

SCHUAB, S. et al. Utilização da taxa de crescimento das plântulas na avaliação do vigor de sementes de soja,.Embrapa Soja-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2002.

SCHWARZ, G. Estimating the dimensional of a model., *Annals of Statistics*. *Annals of Statistics*, Hayward , v. 6, p. 461-464, 1978.

SHEI, H. J.; CHEN, Y. L. Computer simulation on intermittent drying of rough rice. **Drying Technology**, v. 20, p. 615–636, 2002.

SHELAR, V. R.; SHAIKH, R.S.; NIKAN, A.S. Role of mechanical damage in deterioration of soybean seed quality during storage—a review.. **Agricultural Reviews**, v. 29, p. 177-184, 2008.

SILVA, J. S. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. **Secagem e Secadores**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000, p. 107–138.

SILVA, T. A. et al. Condicionamento fisiológico de sementes de soja, componentes de produção e produtividade. **Ciência Rural**, v. 46, 2016.

SILVA, W. P. et al. Comparison between continuous and intermittent drying of whole

bananas using empirical and diffusion models to describe the processes. **Journal of Food Engineering**, v. 166, p. 230–236, 2015.

SOUZA, G. et al. M. Desidratação de sementes de soja em leito fixo: modelagem e simulação; análise de efeito das variáveis e heterogeneidade do processo. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, p. 11653-11660, 2015.

THOMKAPANICH, O.; SUVARNAKUTA, P.; DEVAHASTIN, S. Study of intermittent low-pressure superheated steam and vacuum drying of heat-sensitive material. **Drying Technology**, v. 25, p. 205–223, 2007.

TREYBAL, R. E. In: **Mass Transfer Operations**. 3rd ed. ed. Tokyo: McGraw–Hill, 1980. Cap. 12, p. 655-716.

TUKEY, J. W. The problem of multiple comparisons. Mimeographs Princeton University, Princeton, N.J, 1953.

TUYEN, T. T. et al. Effects of high-temperature fluidized bed drying and tempering on kernel cracking and milling quality of Vietnamese rice varieties. **Drying Technology**, v. 27, p. 486–494, 2009.

VEGA-GÁLVEZ, A. et al. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture, and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. **Food Chemistry**, v. 132, p. 51–59, 2012.

VENTURINI, T. et al. Estudo da secagem e extração de sementes de mamão (*Carica Papaya* L.). **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 5, p. 950-959, 2012.

VIEIRA, F. H. T.; SOUSA, L. M. C.; LING, L. L. Esquema de controle adaptativo de tráfego de redes baseado em um algoritmo de predição fuzzy. **Sba Controle & Automação**, Goiás, v. 19, p. 281-301, 2008.

VILLELA, F. A.; PESKE, S. T. Tecnologia pós-colheita para arroz. In: PESKE, S. T.;

NEDEL, J. L.; BARROS, A. C. S. A. **Produção de arroz irrigado**. Pelotas: UFPel: 1997. p. 351-412.

WEBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenamento de grãos**. Canoas, RS : Editora Salles, 2005.

XIA, B.; SUN, D. W. Application of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 34, p. 5-24, 2002.

ZHAO, L. et al. Effects of storage and processing on residue levels of chlorpyrifos in soybeans. **Food Chemistry**, v. 150, p. 182-186, 2014.