



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



Pablo de Souza Avendaño

Secagem de sementes de soja em secador rotoaerado: modelagem do processo e análise da qualidade das sementes

Uberlândia

2020

Pablo de Souza Avendaño

Secagem de sementes de soja em secador rotoaerado: modelagem do processo e análise da qualidade das sementes

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador:

Prof. Dr. Marcos A. de Souza Barrozo

Uberlândia

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

A951s
2020 Avendaño, Pablo de Souza, 1991
 Secagem de sementes de soja em secador rotoaerado [recurso eletrônico] : modelagem do processo e análise da qualidade das sementes / Pablo de Souza Avendaño. - 2020.

 Orientador: Marcos A. de Souza Barrozo.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
 Modo de acesso: Internet.
 Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.A951s>
 Inclui bibliografia.
 Inclui ilustrações.

 1. Engenharia química. I. Barrozo, Marcos A. de Souza, 1961, (Orient.) II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.0



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 24/2020, PPGEQ				
Data:	30 de novembro 2020	Hora de início:	13:30	Hora de encerramento:	15:10
Matrícula do Discente:	11822EQU017				
Nome do Discente:	Pablo de Souza Avendaño				
Título do Trabalho:	Secagem de sementes de soja em secador rotoaerado: modelagem do processo e análise da qualidade das sementes				
Área de concentração:	Desenvolvimento de processos químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Secagem de fertilizantes em secador roto-fluidizado				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Beatriz Cristina Silvério - DEA/UFTM; Gláucia de Fatima Moreira Vieira e Souza - PNPd/UFU; Claudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU e Marcos Antonio de Souza Barrozo - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antonio de Souza Barrozo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/11/2020, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Roberto Duarte, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/11/2020, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Glaucia de Fatima Moreira Vieira e Souza, Usuário Externo**, em 30/11/2020, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Beatriz Cristina Silvério, Usuário Externo**, em 30/11/2020, às 15:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2415338** e o código CRC **8A9BED8A**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Ma. Marielle Francisquetti (in memorian), que iniciou este projeto, teve grande contribuição para o desenvolvimento do mesmo e que deixou saudades no coração de todos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha mãe Walquiria e irmã Ariadne por todo apoio que sempre me deram ao longo de toda a minha jornada.

À minha namorada Annelise pelo suporte emocional, nunca me deixando desanimar.

Ao Professor Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo pela orientação, paciência, confiança e ensinamentos que levarei para toda a minha vida.

À Dra. Glaucia de Fatima Moreira Vieira e Souza pela paciência de ensinar, disposição para ajudar e pela prontidão para sanar quaisquer dúvidas que eu pudesse ter.

À Faculdade de Engenharia Química pela estrutura e pessoal para a realização deste trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Sistemas Particulados pela alegria e pelo ânimo no dia-a-dia, sempre deixando um clima agradável no ambiente de trabalho.

Aos alunos de iniciação científica Fabiana e João Henrique pela assistência no desenvolvimento da pesquisa.

À Ma. Marielle Francisquetti que foi parte fundamental desse projeto e uma grande companheira na minha graduação.

À CAPES pelo apoio financeiro investido para a execução desse trabalho.

RESUMO

A soja é uma cultura utilizada na alimentação humana há mais de cinco mil anos. Seu grão está entre os mais consumidos do mundo, pois é uma excelente fonte de proteína e óleo vegetal para atender às exigências alimentares humana e animal. Até a safra 2018 e 2019 o Brasil ocupava o segundo lugar no ranking mundial na produção de soja, mas devido à queda na produção estadunidense e o forte crescimento da produção brasileira, na safra 2019/20, o Brasil atinge o primeiro lugar com destaques na produtividade. A preservação da qualidade das sementes de soja é fundamental para atender as demandas nas diferentes épocas do ano. A secagem é uma das operações mais críticas e exige um maior gerenciamento, pois, a viabilidade das sementes pode reduzir consideravelmente pela demora na secagem ou pela má operação. Assim, este trabalho teve como objetivo estudar o processo de secagem de sementes de soja em secador rotatório não-convencional, denominado rotoaerado, para avaliar o processo de transferência de calor e massa neste sistema, bem como analisar a influência das variáveis do processo na qualidade dessas sementes. Foi possível determinar a umidade dos sólidos ao longo do secador, a temperatura e a qualidade finais das sementes, além da temperatura e velocidade do ar de secagem em cada ensaio. O secador rotoaerado demonstrou ótimos resultados quanto à taxa de secagem ($0,051$ a $0,113 \text{ppmin}^{-1}$) quando comparado a outros, além de um baixo tempo de residência (entre $22,2$ e $24,9 \text{min}$), proporcionando valores de umidade final para a semente adequadas ao armazenamento. As simulações computacionais foram realizadas utilizando o modelo a duas fases e apresentaram boa concordância com os valores experimentais. Os desvios médios foram de $1,08$, $5,7$ e $10,9\%$ para a umidade final e temperatura final das sementes de soja e temperatura do ar de entrada, respectivamente. Os efeitos das variáveis do processo sobre a qualidade das sementes foram quantificados e proporcionaram índices de qualidade acima de 90% , sendo que a temperatura do ar de secagem pode chegar a 50°C , no entanto, para esta temperatura a velocidade do ar de entrada deve ser a menor possível ($1,6 \text{ms}^{-1}$).

Palavras-chave: secagem; soja; rotoaerado; modelo a duas fases; qualidade das sementes.

ABSTRACT

Soy is a crop that has been used in human food for over five thousand years. Its grain is among the most consumed in the world because it is an excellent source of protein and vegetable oil to meet human and animal food requirements. Until the 2018 and 2019 harvests, Brazil ranked second in the world in soybean production, but due to the drop in production in the United States and the strong growth in Brazilian production, in the 2019/20 harvest, Brazil reached the first place with highlights in productivity. Maintaining the quality of soybean seeds is essential to meet the demands all year round. Drying is one of the most critical operations and requires greater management, since the viability of the seeds can be reduced considerably by delaying or poorly executing the operation. Therefore, this work aimed to study the drying process of soya beans in a non-conventional rotary dryer, called rotoaerated, to evaluate the heat and mass transfer process in this system, as well as to analyze the influence of process variables on the quality of these seeds. It was possible to determine the humidity of the solids along with the dryer, the final temperature and quality of the seeds, as well as the temperature and speed of the drying air in each test. The rotoaerated dryer showed excellent results regarding the drying rate (0.051 to 0.113ppmin⁻¹) when compared to others, besides a low residence time (between 22.2 and 24.9min), providing final moisture values for the seed suitable for storage. The computer simulations were performed using the two-phase model and showed good agreement with the experimental values. The average deviations were 1.08, 5.7, and 10.9% for the final moisture and final temperature of the soybean seeds and input air temperature, respectively. The effects of the process variables on seed quality were quantified and provided quality indexes above 90%, and the drying air temperature can reach 50°C, however, for this temperature the input air velocity should be the lowest possible (1.6 ms⁻¹).

Keywords: drying; soybean; rotoaerated; two-phase model; seeds quality.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE SIMBOLOS	iv
CÁPITULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	2
CÁPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. História da Soja.....	4
2.2. Qualidade das Sementes	6
2.3. Secagem de sementes de soja	11
2.4. Secadores rotatórios	17
2.5. Secador rotoaerado	19
2.6. Transferência simultânea de massa e energia em secador rotatório	21
2.7. Equações auxiliares.....	23
2.7.1. Umidade de equilíbrio	23
2.7.2. Cinética de Secagem	25
2.7.3. Equações para Coeficiente Volumétrico de Transferência de Calor e Perda de Calor	27
2.8. Modelagem matemática do processo de secagem de sementes no secador rotoaerado	27
CÁPITULO 3 - TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE MASSA E ENERGIA NA SECAGEM DE SEMENTE DE SOJA EM SECADOR ROTOAERADO	30
3.1. Material utilizado nos experimentos	30
3.1.1. Reumidificação soja	30
3.1.2. Método da Estufa	31
3.2. Equipamento: Secador Rotoaerado.....	32
3.3. Metodologias experimentais desenvolvidas	33
3.3.1. Inclinação e rotação do tambor	34
3.3.2. Vazão de alimentação das sementes.....	34
3.3.3. Procedimento Experimental	35
3.4. Modelagem matemática da transferência simultânea de massa e energia da secagem de semente de soja em secador rotoaerado	37
3.4.1. Equações Auxiliares.....	38
3.4.2. Balanço de Massa para a Água	40
3.4.3. Variação da Quantidade de Água no Sólido	41
3.4.4. Balanço de Energia para o Ar	42
3.4.5. Balanço de Energia para o Sólido	44
3.4.6. Sistema de Equações	46
3.4.7. Resolução do Modelo.....	47
3.5. Análise dos resultados experimentais e simulados	47
CÁPITULO 4 - QUALIDADE DA SEMENTE	59
4.1. Material utilizado e modificações nos experimentos de qualidade da semente e equipamento.....	59
4.2. Metodologia e procedimento experimentais.....	59
4.3. Análise da qualidade das sementes de soja.....	60
4.3.1. Teste de Germinação.....	61
4.3.2. Teste de Fissura.....	61

4.4. Resultados da avaliação da qualidade das sementes.....	63
CÁPITULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	71
5.1. Conclusões	71
5.2. Sugestão de trabalhos futuros	72
CÁPITULO 6 - REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE A	80
APÊNDICE B.....	88
APÊNDICE C.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processo de alterações físicas devido a oscilação do teor de água da semente de soja (a). Danos físicos à semente por umidade (b). Fonte: FRANÇA-NETO <i>et al.</i> (2016).	7
Figura 2.2 – Exemplo de teste de germinação em substrato rolo de papel (a) e de plântulas normais e anormais (b). Fonte: PEREIRA <i>et. al.</i> , (2018) e KRZYZANOWSKI <i>et. al.</i> , (2018).	10
Figura 2.3 – Danos mecânicos (a) e sementes intumescidas e não intumescidas no teste de hipoclorito de sódio (b). Fonte: KRZYZANOWSKI <i>et. al.</i> , (2018 e 2004).	11
Figura 2.4 – Curva de secagem: exemplo (PARK <i>et. al.</i> , 2007).	13
Figura 2.5 – Secador comercial de fluxo estacionário. Fonte: PERES, (2016).	14
Figura 2.6 – Secador comercial de fluxo intermitente. Fonte: PERES, (2016).	14
Figura 2.7 – Secador comercial de fluxo contínuo. Fonte: PERES, (2016).	15
Figura 2.8 – Configurações do escoamento do ar e da semente dentro dos secadores comerciais. Fonte: PERES, (2016).	15
Figura 2.9 – Esquema: secador rotatório com cascadeamento (PERRY e GREEN, 1999).	18
Figura 2.10 – Cascadeamento em secador rotatório convencional (a) e sistema de mini tubos no secador rotoaerado (b). Fonte: (ARRUDA, 2008).	19
Figura 2.11 – Vistas do tubo central e dos tubos menores que compõem o secador rotoaerado (ARRUDA, 2008).	20
Figura 2.12 – Fluxograma da divisão do modelo global de secagem (REAY, 1989, adaptado pelo autor).	22
Figura 3.1 – Sistema para reumidificação das sementes. Fonte: O autor (2020).	30
Figura 3.2 – Método da Estufa: Balança Analítica (a); Pesa-Filtro (b); Estufa (c). Fonte: O autor (2020).	31
Figura 3.3 – Secador rotoaerado: 1) Soprador; 2) Sistema de Aquecimento; 3) Reservatório; 4) Esteira transportadora; 5) Calha de Entrada; 6) Reservatório; 7) Tambor rotatório; 8) Imagem interna do tambor com minitubos. Fonte: SILVA (2018), adaptado pelo autor.	32
Figura 3.4 – Sementes dentro do tambor rotatório (a) e sementes sobre a correia transportadora (b). Fonte: O autor (2020).	35
Figura 3.5 – Esquema das posições de amostragem intermediárias, dos termopares e higrômetros no secador rotoaerado.	36
Figura 3.6 – Esquema do elemento infinitesimal de volume do secador rotoaerado.	37
Figura 3.7 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 1.	49
Figura 3.8 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 2.	49
Figura 3.9 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 3.	50
Figura 3.10 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o experimento 4.	50
Figura 3.11 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 6.	51
Figura 3.12 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 7.	51
Figura 3.13 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 11.	52

Figura 3.14 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 10.	52
Figura 3.15 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 13.	53
Figura 3.16 – Comparação entre as umidades experimentais e simuladas para as sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado.	53
Figura 3.17 – Comparação entre as temperaturas experimentais e simuladas para as sementes de soja submetidas a secagem no secador rotoaerado.	54
Figura 3.18 – Comparação entre as temperaturas experimentais e simuladas para o ar de secagem.	55
Figura 3.19 – Efeito isolado da temperatura de entrada do ar de secagem na umidade da semente de soja, resultados simulados.....	56
Figura 3.20 – Efeito isolado da velocidade de entrada do ar de secagem na umidade da semente de soja, resultados simulados.....	57
Figura 3.21 – Resultados simulados para três T_f e três v_f	58
Figura 4.1 – Superfície de resposta para previsão da Taxa de secagem das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado.	66
Figura 4.2 – Superfície de resposta para previsão do ISSF das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado.	68
Figura 4.3 – Superfície de resposta para previsão do IG das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado.	69
Figura A.1 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 1.	81
Figura A.2 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 2.	82
Figura A.3 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 3.	82
Figura A.4 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 4.	83
Figura A.5 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 5.	83
Figura A.6 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 6.	84
Figura A.7 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 7.	84
Figura A.8 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 8.	85
Figura A.9 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 9.	85
Figura A.10 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 10.	86
Figura A.11 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 11.	86
Figura A.12 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 12.	87
Figura A.13 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 13.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Produção e Área plantada de soja no mundo, EUA e Brasil.	6
Tabela 2.2 – Equações para Umidade de Equilíbrio.	24
Tabela 2.3 – Equações de cinética de secagem	26
Tabela 3.1 – Níveis de codificação das variáveis.....	33
Tabela 3.2 – Planejamento realizado variando temperatura e velocidade do ar de entrada mantendo a umidade inicial em valores próximos.	34
Tabela 3.3 – Resultados experimentais da secagem de semente de soja no secador rotoaerado.	48
Tabela 4.1 – Níveis das condições experimentais.	59
Tabela 4.2 – Experimentos para análise da qualidade das sementes de soja em secador rotoaerado.	60
Tabela 4.3 – Qualidade das sementes comerciais de soja recebidas no laboratório antes de qualquer procedimento.	62
Tabela 4.4 – Valores médios para a qualidade inicial das sementes de soja após reumidificação.	63
Tabela 4.5 – Resultados para as secagens das sementes de soja no secador rotoaerado.	64
Tabela 4.6 – Dados da regressão para a taxa de secagem.	65
Tabela 4.7 – Dados da regressão para o ISSF das sementes de soja.	67
Tabela 4.8 – Dados da regressão para o IG das sementes de soja.	68
Tabela A.1 – Comparação dos valores experimentais e simulados de todos os experimentos para umidade final do material, temperatura do sólido e temperatura do ar.	81

LISTA DE SIMBOLOS

A	– Área da seção transversal do secador.....[m ²]
a, b, c, d	– Parâmetros dimensionais e adimensionais das equações de equilíbrio dependendo da equação, Tabela (2.2)
A, B, C	– Parâmetros dimensionais e adimensionais das equações de secagem dependendo da equação, Tabela (2.3)
C_p	– Calor específico.....[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
D	– Diâmetro do secador.....[m]
D_{ef}	– Difusividade efetiva.....[m s ⁻¹]
dp	– Diâmetro da partícula.....[m]
G	– Vazão mássica.....[kg s ⁻¹]
H^*	– Carga total de sólidos no secador.....[kg]
h	– Entalpia.....[kJ kg ⁻¹]
K	– Constante de secagem com dimensão a depender da equação
k_f	– Condutividade térmica do fluido.....[W m ⁻¹ K ⁻¹]
K_F	– Parâmetro das Equações (2.13 e 2.14) com dimensão a depender dos outros parâmetros
L	– Comprimento do secador.....[m]
M	– Umidade do material, massa de água por massa de sólido seco.....[kg kg ⁻¹]
m_F	– Parâmetro das Equações (2.13 e 2.14).....[-]
MR	– Adimensional de umidade, Tabela (2.3) e Equações (2.6 e 3.12).....[-]
n	– Número de volumes de controle estabelecidos no secador.....[-]
n_F	– Parâmetro das Equação (2.14).....[-]
N_R	– Número de rotações do tambor por unidade de tempo.....[rpm]

Nu	– Número de Nusselt.....[-]
Pr	– Número de Prandtl.....[-]
Q	– Taxa de transferência de calor entre gás e os sólidos.....[kJ s ⁻¹]
Q_p	– Calor perdido através da parede do casco.....[kJ s ⁻¹]
R	– Raio do secador.....[m]
Re	– Número de Reynolds.....[-]
R_w	– Taxa de secagem do material.....[s ⁻¹]
T	– Temperatura.....[°C]
t	– Tempo.....[s]
U_p	– Coeficiente de calor perdido.....[kW m ⁻² °C ⁻¹]
UR	– Umidade relativa do ar.....[-]
U_{va}	– Coeficiente global volumétrico de transferência de calor.....[kW m ⁻³ °C ⁻¹]
v	– Velocidade superficial do gás no secador.....[m s ⁻¹]
V	– Volume do secador.....[m ³]
$v_{sól}$	– Velocidade de escoamento do sólido através do secador.....[m s ⁻¹]
W	– Umidade absoluta do ar, massa de água por massa de ar seco.....[kg kg ⁻¹]
x	– Unidade de comprimento infinitesimal.....[m]
x_1	– Codificação da variável temperatura do fluido
x_2	– Codificação da variável velocidade superficial do fluido
z	– Adimensional de comprimento definido na Equação (3.7).....[-]

Subíndices

0	– Inicial
amb	– Ambiente
eq	– Equilíbrio
f	– Fluido

l	– Líquido
s	– Sólido
v	– Vapor

Símbolos gregos

α	– Ângulo de inclinação do secador.....[rad]
λ	– Calor latente de vaporização da água pura.....[kJ kg ⁻¹]
μ_{ar}	– Viscosidade do ar de secagem.....[kg m ⁻¹ s ⁻¹]
π	– Proporção numérica o perímetro e o diâmetro de uma circunferência.....[-]
τ	– Tempo de residência médio das partículas no secador.....[s]

CÁPITULO 1 - INTRODUÇÃO

A soja, *Glycine max* (L.) Merrill, é a cultura que mais cresceu nos últimos 40 anos no Brasil. Seu impacto é tão significativo que o agronegócio brasileiro pode ser dividido em dois períodos: antes e depois da soja. Muitos investimentos em ciência e tecnologia foram necessários para adaptar essa cultura ao solo e clima brasileiros. Foram essas tecnologias desenvolvidas que permitiram que os produtores empreendessem de forma exitosa em regiões anteriormente inexpressivas em agricultura. O Brasil possui em seu banco de sementes (Banco Ativo de Germoplasma – BAG) aproximadamente 55.000 tipos de soja. Essa coleção é fundamental para o desenvolvimento de novos materiais, com variadas características agronômicas, fontes de resistência à diferentes pragas e doenças, adaptações a diferentes climas e solos, visando obter uma semente de alta qualidade (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2018).

Para ser considerada de alta qualidade, a semente de soja deve ter altas taxas de germinação e vigor. Além da qualidade sanitária e de pureza física e varietal. Esses fatores garantem o desempenho da semente no campo para alcançar a alta produtividade. Assim, diversas pesquisas são realizadas nas mais distintas etapas do processo de produção de semente de soja. Por exemplo, pesquisas sobre resistência e tolerância a estresses bióticos como insetos-pragas, estratégias de convivência com estresses abióticos como impactos causados por mudanças climáticas, manejo da cultura adaptado a diferentes sistemas produtivos, controle de pragas e sistemas de qualidade para armazenagem e pós-colheita, entre diversas outras (EMBRAPA, 2018). Logo, a produção de sementes de soja também depende de uma infraestrutura adequada nos momentos de colheita e beneficiamento, como, por exemplo, um número adequado de máquinas colhedoras e condições adequadas para a secagem e armazenamento dessas sementes (FRANÇA-NETO *et. al.*, 2007).

A secagem de sementes de soja é um dos pontos críticos de uma Unidade de Beneficiamento de Sementes (UBS). Para uma alta qualidade ser alcançada, as escolhas do método de secagem e do secador são de grande importância, já que o tempo para iniciar, duração e forma com que ocorre a secagem estão diretamente relacionadas a mesma (GUIMARÃES, 2005). Como a operação de secagem também não se resume apenas em insuflar ar quente através da massa de semente estática ou em movimento, é importante também conhecer os princípios da remoção de umidade no interior da semente. Existem várias formas em que a

semente de soja pode ser secada, porém cuidados especiais devem ser tomados seja pelas características do material ou pelo tipo de secador escolhido (FRANÇA-NETO *et. al.*, 2016).

Produzir sementes na quantidade demandada pelos agricultores e com alta qualidade é um dos principais desafios da indústria sementeira. Dentre as principais culturas agrícolas anuais do agronegócio brasileiro (soja, milho, arroz, trigo e algodão), a soja é uma das que demandam maior volume e, portanto, maior organização, consequentemente maior profissionalização do setor (MENEGHELLO, 2014).

Por se tratar de um ser biologicamente ativo, estudos do fenômeno da secagem de sementes é complexo e envolve a análise de diversos fatores que interferem no processo. É uma área de conhecimento científico que necessita de um número maior e mais aprofundado de pesquisas relativas aos mecanismos inerentes ao processo de retirada de água da semente, porém é possível ter, com recursos tecnológicos, uma estimativa aceitável das variáveis envolvidas e com isto alcançar resultados práticos satisfatórios. Um dos recursos mais empregados para a verificação de níveis de eficiência e otimização de sistemas é o uso de modelos matemáticos, por meio de simulações numéricas, que reproduzam de forma virtual as propriedades de interesse, bem como o dimensionamento e o melhor desempenho (SOUZA, 2013).

Com a devida modelagem e simulação computacional dos perfis de temperatura e umidade no secador é possível examinar e interpretar a influência das condições operacionais sobre o processo sem a necessidade de recorrer a um extensivo conjunto de testes experimentais. Além de uma maior compreensão da transferência de massa e calor entre sólido e fluido, o que contribui para o projeto e controle de novos secadores, assegurando um produto final em condições adequadas de beneficiamento e armazenamento (LÓPEZ *et. al.*, 1998). Contudo, a experimentação é fundamental dentro das pesquisas sobre secagem, já que por sua vez, auxilia para a compreensão da física do processo e, consequentemente, a construção de modelos mais realísticos. Além disto, é essencial para a verificação da precisão e da credibilidade das simulações.

1.1. Objetivos

Desse modo, o objetivo principal deste trabalho foi realizar o estudo do processo de secagem de semente de soja em um secador rotatório não-convencional, denominado de

rotoaerado, uma patente do Laboratório de Sistemas Particulados (LSP) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), dividido em duas etapas:

- Na primeira realizou-se um planejamento experimental do tipo composto central (PCC) com duas repetições no ponto central para a temperatura e a velocidade de entrada do ar de secagem para mensurar os valores da taxa de secagem, tempo de residência e umidade e temperatura final das sementes de soja. Em seguida, a modelagem matemática a duas fases da transferência de calor e massa a fim de obter a predição do perfil de umidade do sólido e dos valores de temperatura do ar de secagem e temperatura das sementes na saída. Comparando os resultados experimentais com os simulados.
- Na segunda etapa foi realizado outro planejamento do tipo PCC com duas repetições do ponto central para uma análise dos efeitos das variáveis (temperatura e velocidade de entrada do ar de secagem) na qualidade final das sementes de soja e na taxa de secagem, através da técnica de superfície de resposta.

Com tal finalidade, o presente trabalho foi organizado na seguinte sequência: Revisão Bibliográfica (Capítulo 2) contemplando os assuntos pertinentes ao tema desenvolvido: história da soja; qualidade das sementes; secagem da semente de soja, bem como sua importância na qualidade; uma breve revisão sobre secadores rotatórios, secador rotoaerado e os estudos realizados no mesmo; transferência simultânea de massa e energia em secadores rotatórios, bem como as equações auxiliares para a construção do modelo; e modelagem matemática do processo de secagem de sementes de soja no secador rotoaerado. No Capítulo 3 são apresentados o material utilizado, o procedimento experimental, as metodologias experimentais, o modelo matemático proposto e os resultados alcançados para o estudo da transferência de calor e massa da secagem de semente de soja no secador rotoaerado, bem como a simulação numérica comparada com os dados experimentais obtidos para validação. O Capítulo 4 trata da análise e quantificação dos efeitos das variáveis de secagem das sementes de soja no secador rotoaerado na qualidade destas e na taxa de secagem do processo, por meio de análises estatísticas. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões dos estudos desenvolvidos e as sugestões de trabalhos futuros.

CÁPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. História da Soja

A soja é uma cultura utilizada na alimentação humana há mais de cinco mil anos. Seu grão está entre os mais consumidos do mundo, pois é uma excelente fonte de proteína e óleo vegetal para atender as exigências alimentares humana e animal. A soja é uma planta herbácea pertencente à família das Leguminosas, subfamília das Papilionáceas e da tribo das Faseoláceas, possui sementes lisas, ovais, globosas ou elípticas, com hilo quase sempre castanho, porém suas cores podem ser amarelas, brancas, escuras, negras, vermelhas, vermelho-escuras, verdes, verde-amarela ou matizadas (GOMES e GOMES, 1990).

Cada variedade de soja também apresenta sensibilidade ao fotoperíodo, que acima de seu ponto crítico o florescimento é atrasado. Desse modo a soja é considerada uma planta de dia curto, conseqüentemente, sua adaptabilidade varia na direção ao norte ou ao sul dos hemisférios. Isso levou as pesquisas à “tropicalização” da soja, permitindo que a mesma fosse plantada em regiões de baixas latitudes e garantindo o sucesso da cultura no Brasil. Analisando a trajetória da soja pelo mundo fica mais claro como seu desenvolvimento chegou ao que é hoje.

A soja cultivada atualmente é bastante distinta dos seus ancestrais, que eram plantas rasteiras presentes na costa leste da Ásia, principalmente ao longo do rio Yangtse, na China. Seu desenvolvimento começou com o surgimento de cruzamentos naturais entre duas espécies de soja selvagem que foram domesticadas e melhoradas por cientistas da antiga China. Suas primeiras citações aparecem no período entre 2883 e 2838 A.C., quando a mesma era considerada um grão sagrado. No livro “Pen Ts’ao Kong Mu”, que descrevia as plantas da China ao Imperador Sheng-Nung, contém seus primeiros registros. Para alguns autores, as referências à soja são ainda mais antigas, pelo “Livro de Odes”, publicado em chinês arcaico (EMBRAPA, 2019).

Introduzida na Europa ao final do século XV, como curiosidade, nos jardins botânicos da Inglaterra, França e Alemanha, o interesse pelo teor de óleo e proteína do grão de soja surge nas indústrias mundiais apenas na segunda década do século XX. No entanto, as tentativas de introdução comercial do cultivo na Rússia, Inglaterra e Alemanha fracassaram, provavelmente, devido às condições climáticas desfavoráveis (EMBRAPA, 2019).

As primeiras referências encontradas na literatura sobre a soja no Brasil datam de 1882 com testes realizados no Estado da Bahia, 1892 na Estação Agronômica de Campinas (atual Instituto Agronômico de São Paulo - IAC), e no Rio Grande do Sul em 1901. Diversos elementos contribuíram para sua fixação e desenvolvimento, entre eles, destacam-se o uso da cultura em sucessão ao trigo na região Sul, possibilitando o aproveitamento da mesma área, maquinário e equipamentos, armazéns e mão-de-obra; possibilidade de mecanização total da lavoura; e a carência de óleos vegetais comestíveis para substituir a gordura animal (BONATO e BONATO, 1987).

Ao final da década de 60 do século passado, dois fatores internos contribuíram para o Brasil enxergar a soja como um produto comercial. Na época, o trigo era a principal cultura do Sul e a soja apareceu como uma opção de verão, em sucessão ao trigo. Também se iniciava neste período um esforço na produção de suínos e aves, demandando uma quantidade maior de farelo de soja. Em 1966, a produção comercial se tornou uma necessidade estratégica e a soja passou a ser produzida em larga escala (EMBRAPA, 2019).

Em meados de 1970, a explosão do preço da soja no mercado mundial despertou o interesse dos agricultores e do próprio governo brasileiro. O escoamento da safra brasileira se dava na entressafra americana, quando os preços atingiam as maiores cotações, o que representava uma vantagem competitiva em relação aos outros países produtores. Assim, o Brasil iniciou os investimentos em tecnologias para adaptar a cultura às condições brasileiras. Tal ação levou à “tropicalização” da soja, permitindo, pela primeira vez na história, o sucesso do plantio em regiões de baixas latitudes. Graças à tal conquista dos cientistas brasileiros, no final da década de 1980 e mais notoriamente na década de 1990, os preços do grão começaram a impactar o mercado mundial (EMBRAPA, 2019).

Com o surgimento da biotecnologia moderna, o melhoramento genético de plantas sofreu um profundo impacto, proporcionando aumentos qualitativos e quantitativos na produção. Porém, tais técnicas não são suficientes sem um controle de qualidade de excelência. A garantia da qualidade fisiológica e sanitária das sementes, juntamente com as melhorias genéticas permitiram a expansão da área plantada por todo o país e levou o Brasil a se tornar o maior produtor de soja do mundo. Até a safra 2018/19 o Brasil ocupava o segundo lugar no ranking mundial, mas devido à queda na produção estadunidense e o forte crescimento da produção brasileira, na safra 2019/20, o Brasil atinge o primeiro lugar com destaques na produtividade dos estados do Mato Grosso e Paraná (EMBRAPA, 2020).

Os líderes mundiais de produção desta cultura são Brasil, Estados Unidos, Argentina, China, Índia e Paraguai (EMBRAPA, 2019). A Tabela 2.1 demonstra a produção e a área plantada de soja no mundo, Estados Unidos e Brasil.

Tabela 2.1 – Produção e Área plantada de soja no mundo, EUA e Brasil.

<i>Informativo</i>	<i>Mundo</i>	<i>EUA</i>	<i>Brasil</i>
<i>Produção (10⁶ toneladas)</i>	337,298	96,676	124,845
<i>Área plantada (10⁶ hectares)</i>	122,647	30,332	36,950

Fonte: Adaptado pelo autor. EMBRAPA, 2020.

2.2. Qualidade das Sementes

A semente de soja é inclusa na categoria das exalbuminosas (ex = sem e albúmen = endosperma). As sementes sem endosperma apresentam um embrião grande quando comparado ao todo, sendo no caso da soja composta por tegumento e embrião. O tegumento ou casca é a estrutura que delimita a semente. Serve de proteção contra ataques de insetos e microrganismos e por isso é importante sua preservação. O embrião é composto pelo eixo embrionário e por dois cotilédones, o primeiro é a parte vital da semente, pois por meio de divisões celulares de suas extremidades, hipocótilo e radícula, crescem gerando o caule e as raízes. Já os cotilédones constituem em órgãos de reserva que fornecem energia para o eixo embrionário desenvolver durante a germinação e originar a plântula (BARROZO, 1995).

Vale lembrar que a semente não é um grão que germina. Este, muitas vezes pode germinar, e devido a esse fato um produtor pode ser levado a tomar decisões equivocadas comprometendo o sucesso econômico de seu empreendimento, já que o grão não possui os atributos de qualidade de uma semente. A semente contém características de qualidade genética, física, fisiológica e sanitária que um grão não tem, conferindo a ela uma garantia de desempenho agrônômico (KRZYZANOWSKI *et. al.*, 2018).

De acordo com França-Neto *et. al.* (2016), o sucesso da lavoura de soja depende de diversos fatores, porém, o mais importante deles é a utilização de sementes de elevada qualidade. O uso de sementes de elevada qualidade permite o acesso aos avanços genéticos, com as garantias de qualidade e tecnologias de adaptação nas diversas regiões, assegurando

maiores produtividades. Portanto, o estabelecimento da lavoura de soja com sementes da mais alta qualidade é de fundamental importância.

Pode se definir como qualidade da semente a convergência de todos os atributos genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários que contribuem na formação de plantas vigorosas e saudáveis, com rápida emergência, um bom estabelecimento, além de crescimento e floração uniformes. Para que a semente de soja seja considerada de alta qualidade, esta deve ter altas taxas de vigor, germinação e sanidade, bem como pureza física e varietal (genética) garantidas e não conter sementes de plantas daninhas (KRZYZANOWSKI *et al.*, 2018).

A produção de sementes de alta qualidade é conseguida no campo com uma colheita e secagem realizadas na época correta, auxiliando na redução das chances de aumentar deterioração. A colheita deve ser feita quando as sementes estão no máximo potencial fisiológico e metabólico (ou próximo deste). A deterioração de sementes é um processo natural que envolve fatores citológicos, fisiológicos, bioquímicos e mudanças físicas em cada uma das sementes. Tais mudanças reduzem a viabilidade e eventualmente causam a morte da mesma. Alguns fatores que afetam a qualidade fisiológica da semente são deteriorações, que ocorrem no campo e que abrangem os danos causados por percevejo, por umidade, além de danos mecânicos, que ocorrem nas máquinas colhedoras e nos processos de beneficiamento. A queda de qualidade devido a umidade se deve às oscilações do grau de umidade das sementes decorrentes de chuvas, neblina e orvalho, principalmente quando associadas com temperaturas elevadas, proporcionando rugas características no tegumento (casca) na região oposta ao hilo, como demonstrado na Figura 2.1 (a) e (b) (FRANÇA-NETO *et al.*, 2016).

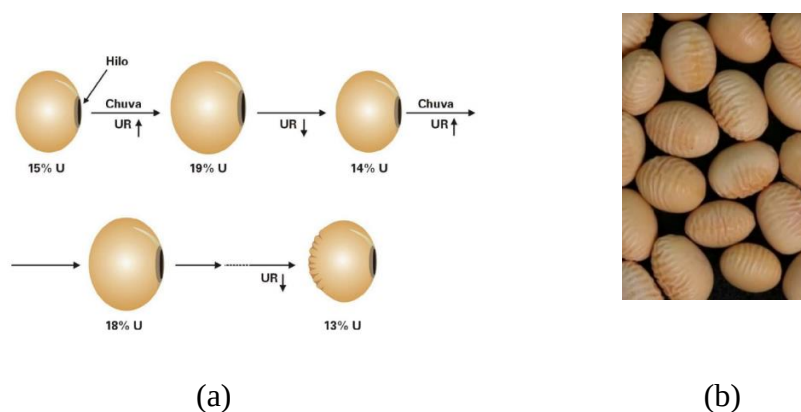


Figura 2.1 – Processo de alterações físicas devido a oscilação do teor de água da semente de soja (a). Danos físicos à semente por umidade (b). Fonte: FRANÇA-NETO *et al.* (2016).

A sensibilidade fisiológica ao dano térmico é função da espécie, do genótipo, do teor de água, da temperatura, do tempo de exposição e da velocidade de secagem (HERTER e BURRIS, 1989b). A desnaturação das membranas celulares, além de possíveis alterações nos lipídios que a constituem é, segundo Daniell *et. al.* (1969), a causa primária do dano fisiológico produzido por altas temperaturas em tecidos vegetais. Segundo Herter e Burris (1989a), danos térmicos às sementes de soja são caracterizados quando provocam a ruptura em ligações peptídicas de proteínas e de outros componentes celulares. Roberts (1981) e França Neto (1984) relatam até danos em sistemas subcelulares como cromossomos e mitocôndrias, respectivamente.

Delouche (2002) descreve os efeitos da deterioração da semente de soja em uma sequência de eventos. O primeiro evento na deterioração das sementes seria a danificação dos sistemas de membranas, que são locais importantes para muitas reações. As sementes perdem eletrólitos, açúcares, aminoácidos e entre outras substâncias. Os mecanismos energéticos e de síntese são prejudicados: redução da taxa respiratória e atividade de enzimas. A redução na produção de energia e na biossíntese apresenta um efeito pronunciado na velocidade das respostas germinativas. À medida que a deterioração avança, a tolerância das sementes aos estresses ambientais diminui: emergência no campo sob condições desfavoráveis é reduzida. Consequentemente, a longevidade do armazenamento diminui, bem como a velocidade e uniformidade do crescimento e desenvolvimento de plântulas e pode haver uma redução substancial no rendimento. O número de plântulas anormais aumenta antes que a capacidade de germinar culmine à perda de sua capacidade, este sendo o último efeito ou consequência prática final da deterioração.

Os efeitos menores da deterioração sobre as respostas e desempenho das sementes são de três principais tipos: o primeiro, danificação e disfunção dos sistemas biológicos; o segundo é a diminuição da velocidade e uniformidade das respostas e atividades fisiológicas. Como a velocidade de germinação e de crescimento de plântulas; o terceiro é a redução da tolerância aos estresses ambientais, como condições adversas no campo (DELOUCHE, 2002).

Um dos primeiros aspectos a serem observados é o desempenho da semente durante o processo de germinação e emergência. Sementes com alta qualidade resultam em plântulas de alto desempenho e geram plantas fortes, vigorosas e bem desenvolvidas, que estabelecem em diferentes condições edafoclimáticas, com maior velocidade de emergência e de desenvolvimento da lavoura, proporcionando também um controle mais eficiente de ervas daninhas (KRZYZANOWSKI *et al.*, 2018).

A integridade física da semente também é fundamental para o pleno desempenho no campo e está diretamente relacionada à germinação e à emergência da plântula. Por isso, a ausência de danos mecânicos são um pré-requisito de qualidade muito importante para alcançar altos números de plantas no campo e atingir níveis elevados de produtividade (KRZYZANOWSKI *et al.*, 2004).

Para verificar a qualidade da semente são feitos testes pré-determinados pela legislação com base histórica e científica, como a pureza, outras sementes por número, germinação, entre outros, para verificação de valores mínimos visando a comercialização. No entanto, antes e depois de cada etapa pós-colheita, não só para determinar as condições, mas também para mensurar o efeito de cada etapa nas propriedades da semente e tentar minimizar os danos e maximizar a qualidade, alguns testes são realizados (MENEGHELLO, 2014). Existem diferentes testes aceitos pela literatura para quantificar a qualidade da semente, dentre eles o teste de germinação é praticamente obrigatório. De acordo com as Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 2009), o teste de germinação para a soja deve ser realizado com 400 sementes em repetições de 4 de 100, 8 de 50 ou 16 de 25 sementes. O substrato para o procedimento pode ser papel ou areia. Com papel se deve colocar as sementes para germinar entre duas ou mais folhas de papel toalha, embrulhados em forma de rolos e depois colocados no germinador em posição horizontal ou vertical. Já com areia, as sementes são postas sobre uma camada uniforme e umedecida de areia e cobertas com areia solta, de forma a obter uma camada de aproximadamente 1 centímetro sobre as mesmas. Os germinadores a serem utilizados devem manter a temperatura controlada de 20°C durante o dia e 30°C durante a noite ou 25°C durante todo o processo. A umidade relativa do ar deve ser próxima de 100%. A duração total do teste é de 8 dias, sendo no quinto dia realiza-se uma primeira contagem de plântulas e depois estas são recolocadas nos germinadores até o último dia para uma segunda contagem.

A Figura 2.2 mostra um teste de germinação em substrato rolo de papel (a) e os exemplos de plântulas normais e anormais oriundas de sementes de alta qualidade (esquerda) e oriundas de sementes enrugadas devido à danos por umidade (b).



(a)

(b)

Figura 2.2 – Exemplo de teste de germinação em substrato rolo de papel (a) e de plântulas normais e anormais (b). Fonte: PEREIRA *et. al.*, (2018) e KRZYZANOWSKI *et. al.*, (2018).

Na RAS (BRASIL, 2009), o teste de Tetrazólio é o mais indicado para observar danos por secagem e danos mecânicos de colheita, porém, pode ser considerado um teste caro. Krzyzanowski *et al.* (2004) por meio da Circular Técnica 37 da EMBRAPA, propõem o teste de hipoclorito de sódio (THS) como uma alternativa para uma rápida determinação do percentual de dano mecânico (fissuras e rupturas de tegumento), pois, além de rápido é um teste de simples execução, de baixo custo e apresenta resultados tão confiáveis quanto o teste de Tetrazólio para esses tipos de dano. Neste teste as sementes são colocadas em recipientes e cobertas com uma solução de hipoclorito de sódio a 5%. Geralmente utiliza-se duas repetições de 100 sementes. Decorridos 10 minutos, a solução é escoada e as sementes distribuídas sobre folhas de papel toalha para a contagem do número de sementes intumescidas e não intumescidas. As sementes intumescidas são aquelas que apresentam fissuras ou microfissuras no tegumento. Os resultados podem ser expressos em porcentagem média por amostra de sementes intumescidas ou porcentagem média de sementes não intumescidas (KRZYZANOWSKI *et al.*, 2004). A Figura 2.3 apresenta um grupo de sementes com fissuras mecânicas, seguida de uma imagem do teste de hipoclorito de sódio onde estão separadas as sementes intactas das intumescidas.



Figura 2.3 – Danos mecânicos (a) e sementes intumescidas e não intumescidas no teste de hipoclorito de sódio (b). Fonte: KRZYZANOWSKI *et. al.*, (2018 e 2004).

No intuito de atender as demandas em diferentes períodos, a preservação da qualidade da semente é fundamental e a sua secagem é, na prática, uma das operações mais críticas e que requer um maior gerenciamento. A viabilidade das sementes pode reduzir consideravelmente pela demora na secagem ou pela má operação do sistema de secagem. Assim, é necessário um controle rigoroso para manter a identidade e pureza varietal durante todas as operações de pós-colheita, onde se inclui a secagem (BAUDET, 1999).

2.3. Secagem de sementes de soja

A secagem de sementes de soja pode ser feita de duas maneiras, natural ou artificial. O método de secagem natural consiste no uso da radiação solar e o vento para o processo, no entanto, apesar de menor custo, não expor as sementes a temperaturas muito altas e não causar danos mecânicos às mesmas, depende de condições climáticas favoráveis e muita mão-de-obra. Já o artificial, a fonte de calor empregada pode ser diversa e é executada por meio de equipamentos que forçam o ar (aquecido ou ambiente) sob a massa de sementes, possibilitando secar grandes volumes e reduzir o tempo do procedimento (GARCIA *et. al.*, 2004).

As sementes quando alcançam a maturidade fisiológica (momento de máximo potencial) apresentam, em sua maioria, um grau de umidade muito elevado, impróprio para uma armazenagem segura. Deste modo, se faz necessário a etapa de secagem artificial. Em épocas chuvosas, é comum que a semente seja colhida com 18% a 19% de umidade. Nessas condições é imprescindível que a secagem seja realizada de imediato (FRANÇA-NETO *et. al.*, 2016). A secagem é um processo fundamental na produção e na tecnologia de sementes de alta qualidade,

pois auxilia na obtenção de um produto com umidade adequada para comercialização e favorece a conservação por um tempo mais prolongado. Em suma, uma secagem eficiente é aquela que, além de reduzir o teor de umidade, aumenta seu potencial de conservação e preserva suas características físicas e propriedades fisiológicas (SOUZA, 2013). É possível observar o dano causado pela deterioração por umidade na germinação das sementes de soja na Figura 2.2 (b).

As sementes apresentam higroscopicidade, ou seja, ganham ou perdem água num processo dinâmico em função das variações de umidade relativa do ar (UR). A umidade em excesso durante o armazenamento acelera o metabolismo da mesma, contribuindo para aumentar a velocidade do processo de deterioração, além de gerar condições favoráveis para o desenvolvimento de microrganismos patogênicos. Por outro lado, a semente necessita de uma certa quantidade de água para se manter viva e por isso não se deve retirar toda a água da mesma. Em suma a água é necessária, mas se não for na medida correta pode ser prejudicial (MENEGHELLO, 2014).

De acordo com Park *et al.* (2007) e Parry (1985), nos diferentes tipos de secadores estudados na secagem de grãos e sementes, o conhecimento de dois importantes processos, o de transferência de massa e de energia, se torna imprescindível. O calor é transferido do ar para o grão elevando a temperatura e evaporando a água, e o processo de transferência de massa se dá como líquido ou vapor dentro do grão e como vapor na superfície do mesmo. Ao longo da secagem, as variações entre transferência de massa e calor geram dois ou mais períodos distintos de secagem.

Park *et al.* (2007) resume tais períodos em três:

- *Período 0* - Período de indução. Inicialmente, as partículas possuem temperatura inferior ao ar, resultando em uma transferência de umidade lenta, já que a pressão de vapor de água na superfície da partícula é baixa. Mantendo-se até que a transferência de massa seja compensada pela de calor. A duração dessa etapa é insignificante em relação ao período total de secagem.
- *Período 1* - Período de taxa de secagem constante. A quantidade de água disponível no interior do produto é alta. Esta, evapora-se como água livre e a pressão de vapor de água na superfície é constante, bem como a temperatura do produto que é a mesma que a de bulbo úmido. Assim, é possível afirmar que a transferência de massa e calor se equivalem. A duração dessa etapa se mantém

enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto for suficiente para acompanhar a perda por evaporação na superfície.

- *Período 2* - Período de taxa decrescente de secagem. Momento em que a quantidade de água na superfície começa a ser deficiente e tratando-se de um ponto de inflexão entre a taxa constante e a decrescente, este ponto depende não só do produto, mas das condições operacionais da secagem. Essa etapa se prolonga até que o produto entre em equilíbrio com o ar, e a taxa de secagem se torna nula.

A Figura 2.4 é um exemplo da evolução do conteúdo de umidade em um sólido, a temperatura do mesmo e da cinética de secagem nos referidos períodos citados acima.

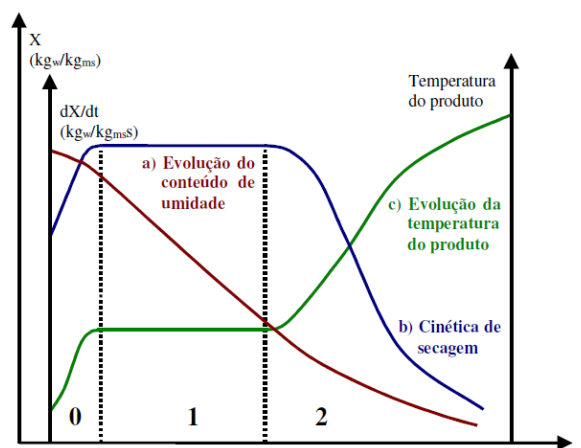


Figura 2.4 – Curva de secagem: exemplo (PARK *et. al.*, 2007).

A secagem tem como finalidade reduzir o conteúdo de umidade das sementes a um nível adequado para que sejam executadas as operações pós-colheita e manter o produto em armazenamento seguro até sua comercialização e semeadura. A redução da umidade diminui a água disponível, alterando o metabolismo, retardando as reações bioquímicas que diminuem a qualidade fisiológica das sementes e assim proporcionando uma armazenagem segura e prolongada. Ainda na lavoura, a desuniformidade da maturação da semente, dentro da planta e entre plantas, pode dificultar a obtenção de um produto de qualidade elevada. Desta maneira, a secagem artificial torna-se uma operação essencial para se obter uma alta qualidade (PERES, 2016). Tratando-se de soja, devido a desuniformidade de maturação, a colheita é feita debulhando as sementes algum tempo após alcançarem o ponto de maturação fisiológica, ou

seja, quando as sementes estiverem com umidade em torno de 16-20% em base úmida (bu) e o processo de secagem deve começar num período máximo de espera de até 20 horas após a colheita (PESKE e PERES, 2019).

Segundo Baudet (1999), Peres (2016) e Peske e Peres (2019) os secadores comerciais mais utilizados para semente de soja são os dos tipos estacionário (leito fixo), intermitente e de fluxo contínuo (ambos leito deslizantes), que são demonstrados na Figura 2.5, 2.6 e 2.7, respectivamente. Além das mais diversas configurações de fluxo de ar e semente (concorrente, contracorrente, cruzado ou misto), representados pela Figura 2.8.

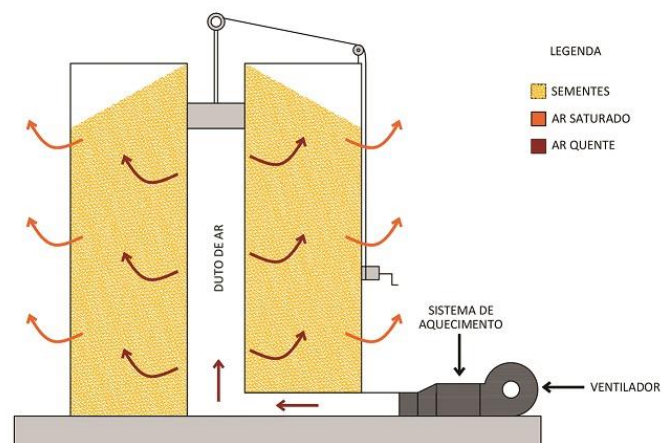


Figura 2.5 – Secador comercial de fluxo estacionário. Fonte: PERES, (2016).

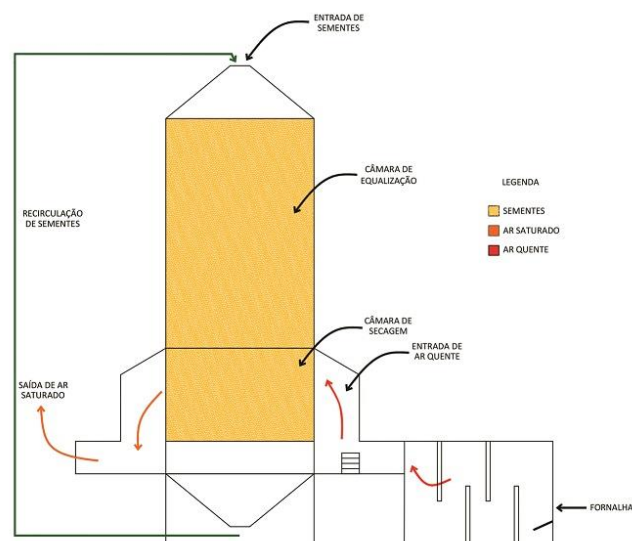


Figura 2.6 – Secador comercial de fluxo intermitente. Fonte: PERES, (2016).

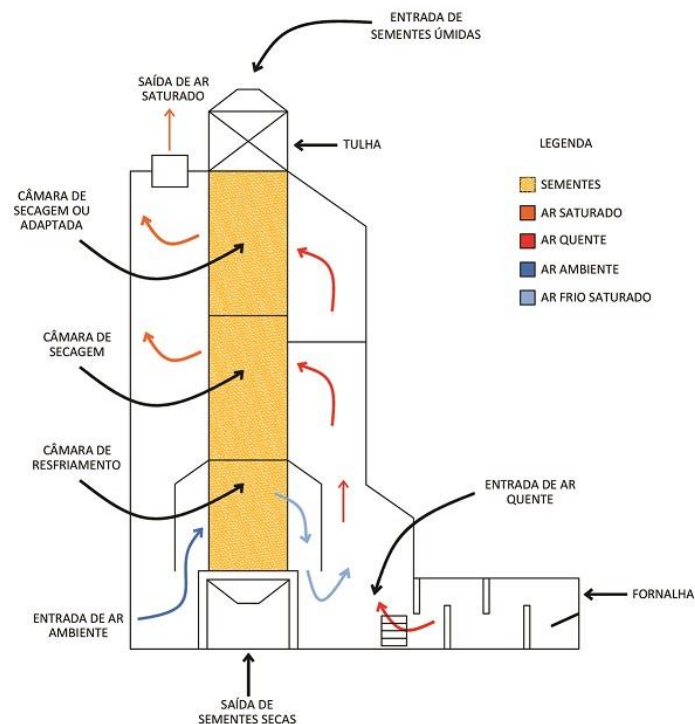


Figura 2.7 – Secador comercial de fluxo contínuo. Fonte: PERES, (2016).

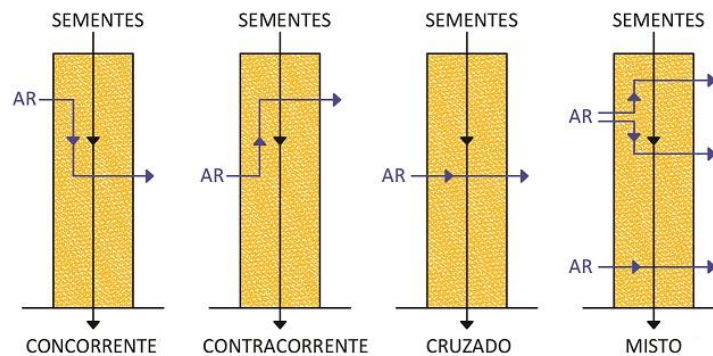


Figura 2.8 – Configurações do escoamento do ar e da semente dentro dos secadores comerciais. Fonte: PERES, (2016).

Secadores de capacidade comercial são equipamentos complexos e que, no caso de grãos e sementes, a secagem é promovida pelo contato de um gás quente com uma camada espessa de partículas (MAYTA *et al.*, 1996).

Diversos estudos foram realizados visando obter informações sobre a influência de algumas variáveis de processo na qualidade da semente de soja destacando efeitos imediatos

sobre os índices de germinação, vigor e fissura desse material em diferentes tipos de secadores, principalmente nos comerciais (leito fixo e leito deslizante). Alguns deles são citados a seguir.

Os seguintes autores utilizaram secadores de leito deslizante com escoamento cruzado. Scheiber (1991) averiguou a influência da umidade relativa do ar de secagem na qualidade da semente de soja, preservando as demais variáveis do processo constantes. Foi possível obter sementes com a menor queda no poder germinativo, no vigor e o mínimo de fissuras para valores dessa variável superiores a 23%. Flauzino (1993) verificou o efeito isolado da umidade inicial das sementes. As maiores reduções nos níveis de qualidade, tanto física quanto fisiológica, são para valores de umidade inicial superiores a 16% (bu). Arnosti (1993) analisou a influência da velocidade intersticial e da temperatura do fluido sobre a qualidade das sementes de soja. Como conclusão, o autor observou que valores elevados da velocidade e temperatura reduzem a qualidade física e fisiológica das sementes.

Ainda nesse mesmo tipo de secador, Esdras (1993) estudou a influência conjunta da vazão de sólidos, da temperatura e umidade relativa do ar de secagem na qualidade de sementes de soja. Neste trabalho, a combinação de altas temperaturas e vazões e baixas umidades relativas se mostraram prejudiciais à manutenção da boa qualidade das sementes. Barrozo (1995) fez um estudo isolado dos fenômenos de transferência, onde estima parâmetros com boa confiabilidade e clareza para serem interpretados fisicamente. Também apresenta uma metodologia bastante adequada para o estudo da transferência simultânea de calor e massa no leito deslizante com escoamento cruzado, onde os resultados da simulação, provenientes da solução numérica e baseado nas equações de conservação, ficaram próximos dos dados experimentais.

Tratando de secadores de leito fixo, Aguirre e Peske (1992) realizam um estudo sobre o efeito da vazão, umidade relativa e temperatura do ar de secagem. Os autores concluíram que a vazão deve estar entre 4 e 20 m³min⁻¹ por tonelada, a umidade relativa não deve ser inferior a 40% e a temperatura não deve ultrapassar 43°C para que a qualidade da semente de soja seja preservada. Souza (2013), com o mesmo tipo de secador (leito fixo), estudou a influência das variáveis temperatura, velocidade e umidade relativa do ar na qualidade das sementes, bem como suas interações no processo de secagem em diferentes posições axiais do leito. A autora observou que de um modo geral para a preservação da qualidade das sementes, a diminuição da umidade relativa do ar e o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem influenciaram negativamente.

Em suma, a escolha do tipo de secador, bem como de suas condições de operação são fundamentais para maximizar a qualidade da semente de soja. Cada configuração pode apresentar vantagens e desvantagens, e um bom sistema de secagem deve permitir que os custos de operação sejam baixos, mantendo as condições de teor de água e as características fisiológicas da semente para um bom armazenamento.

2.4. Secadores rotatórios

O secador rotatório, na sua configuração convencional, é comumente usado na secagem e processo de materiais granulados por suportar grandes volumes de material. Possui vasta aplicação na indústria mineral e em outras indústrias químicas. Convencionalmente, consiste em um casco cilíndrico levemente inclinado em relação à horizontal, que gira em torno do seu eixo longitudinal, equipado com suspensores (ou aletas) e recebe o nome de secador rotatório de contato direto em cascata. O comprimento do cilindro pode variar de quatro a dez vezes o seu diâmetro e este pode medir 0,2 a 3m (MOYERS e BALDWIN, 1999).

O sólido é alimentado em uma extremidade (parte mais elevada) e percorre o equipamento devido à ação da gravidade e a inclinação em relação ao solo através de movimentos rotatórios, descarregando na outra extremidade com redução da umidade. A fração de sólidos dentro do tambor é entre 10 e 15% de seu volume, abaixo desses valores estará operando com carregamento (*holdup*) insuficiente para preenchimento dos suspensores e acima dessa faixa aumentam-se as possibilidades de partículas sólidas na parte superior do leito não serem coletadas pelos suspensores. Não atendendo essa condição recomendada de carregamento, mesmo que o secador tenha sido projetado para manter os sólidos ao longo de um comprimento suficiente que garanta a remoção completa da umidade interna do sólido, seu desempenho pode se tornar insatisfatório devido ao não preenchimento dos suspensores, ocasionando um maior custo de operação devido ao maior tempo para processar a mesma quantidade de material (MOYERS E BALDWIN, 1999). A Figura 2.9 representa um esquema de um secador rotatório com cascadeamento.

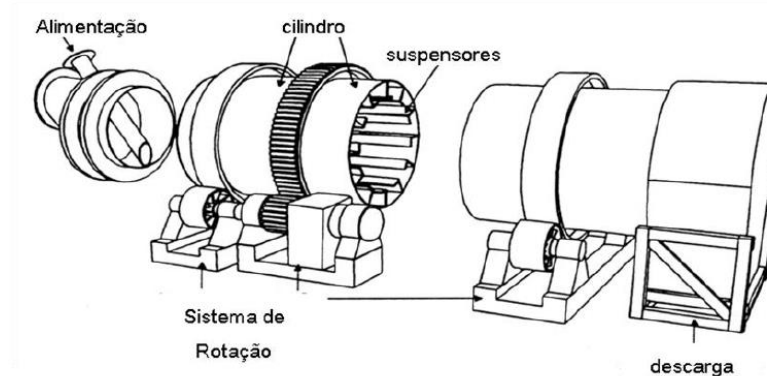


Figura 2.9 – Esquema: secador rotatório com cascadeamento (PERRY e GREEN, 1999).

Durante o cascadeamento é quando ocorre a maior parte da secagem, na qual o sólido fica em contato direto com o gás. No secador convencional com suspensores, este período corresponde a aproximadamente um décimo do tempo de residência do sólido no secador (MATCHETT e BAKER, 1988). O secador convencional também pode ser encontrado com diferentes configurações tratando-se da direção do fluxo de gás. O fluxo concorrente é indicado para materiais termo sensíveis como alimentos e polímeros. Já a configuração contracorrente é o mais indicado por apresentar maior eficiência térmica, porém com uma desvantagem de proporcionar uma alta temperatura final o produto (SILVÉRIO, 2012).

Para o projeto e operação de secadores rotatórios, diversas variáveis independentes características predominam sobre o processo, como: taxas de alimentação do sólido e do ar, temperaturas do gás e do material a ser secado, diâmetro, comprimento, inclinação e rotação do tambor, capacidade e número de suspensores no secador. Todas essas afetam a transferência de calor, a carga e tempo de residência do material, com exceção das temperaturas do ar e do sólido para as duas últimas colocações (SAEMAN e MITCHELL, 1954).

Sabe-se que a secagem é um processo energético que apresenta grande impacto comercial no custo do produto final. Por isso otimizar o processo é muito importante. Problemas de otimização consistem em minimizar ou maximizar uma função objetiva, sujeita ou não a restrições de igualdade, desigualdade e a restrições laterais. Desta forma, muitas pesquisas com o objetivo de aumentar a eficiência de secagem neste tipo de secador foram desenvolvidas como a de Arruda *et. al.* (2009a e 2009b), Silvério *et. al.* (2011 e 2015) e Silva *et. al.* (2016 e 2019) no intuito de trazer novas configurações de secadores rotatórios para essa finalidade.

2.5. Secador rotoaerado

O secador rotoaerado é uma patente desenvolvida no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química na Universidade Federal de Uberlândia (LSP - UFU) que, segundo estudos realizados por Lisboa (2005), Arruda (2008) e Silvério (2012) para fertilizantes, e Silva (2014 e 2018) para resíduo de acerola, apresentaram baixos danos mecânicos devido a maneira de escoamento do sólido nesse secador, elevadas taxas de secagem e baixo tempo de residência proporcionados pelo contato direto sólido-fluido, implicando em uma secagem eficiente proporcionando alta qualidade dos materiais para seus devidos fins.

O secador, denominado de rotoaerado, diferente dos secadores rotatórios convencionais, não possui um sistema de cascadeamento como demonstrado na Figura 2.10.

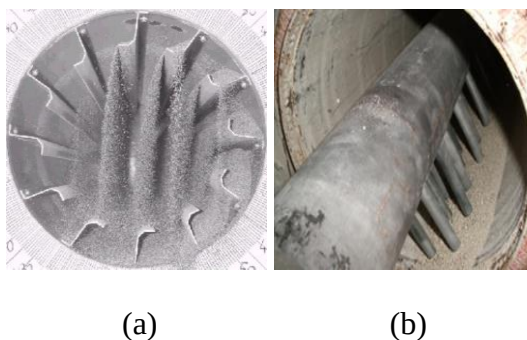


Figura 2.10 – Cascadeamento em secador rotatório convencional (a) e sistema de mini tubos no secador rotoaerado (b). Fonte: (ARRUDA, 2008).

O secador rotoaerado é composto por um tambor rotativo e um tubo central acoplado com diversos mini tubos. Este secador promove um contato direto entre o fluído e a partícula, esta ao invés de cascadear dentro do tambor, percola o mesmo sem sofrer danos de queda devido a rotação do tambor. Além de tornar o tempo efetivo de secagem igual ao tempo de residência da partícula, diferentemente das configurações convencionais de secadores rotatórios. A Figura 2.11 demonstra um esquema do tubo central com as ramificações de tubos menores que compõem o secador rotoaerado. Os detalhes de sua operação e configuração utilizados neste trabalho são apresentados no CAPÍTULO 3.

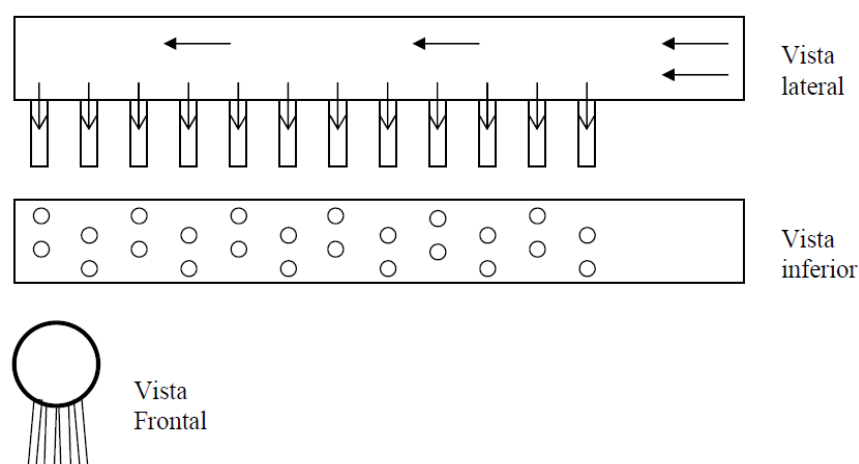


Figura 2.11 – Vistas do tubo central e dos tubos menores que compõem o secador rotoaerado (ARRUDA, 2008).

Os estudos no secador rotoaerado tiveram início com Lisboa (2005), seguido por Arruda (2008) e Silvério (2012), que avaliaram a secagem e também compararam os resultados com o rotatório convencional, todos eles utilizando como material o fertilizante superfosfato simples granulado (SSPG). Em continuidade, Silva (2014 e 2018) secou resíduos do processamento de acerola neste mesmo tipo de secador.

Lisboa (2005) demonstrou que para o SSPG, o coeficiente global de transferência de calor obtido para o secador rotoaerado foi em torno de 50% maior do que aquele relativo ao secador convencional.

Arruda (2008), também operando com SSPG, constatou que o tempo de residência no secador rotoaerado pode chegar até 48% menor do que nos secadores rotatórios convencionais. Além de taxas de secagem até 1,7 vezes maiores e temperatura do sólido de saída até 3,3 vezes maior. Segundo o autor, tudo isso se dá pelo fato de que o contato fluído-partícula no rotoaerado se dá durante todo o tempo de residência da partícula, proporcionando coeficientes de transferência de massa e energia maiores que os rotatórios convencionais, onde o contato ocorre efetivamente apenas durante o cascadeamento.

A possibilidade de alterar as configurações de mini tubos do secador proporcionou outra vantagem de operação. Silvério (2012), utilizando diferentes configurações do secador rotoaerado para fertilizantes, obteve taxas de secagem de até 18 vezes maior e um tempo de residência de até 10 vezes menor, quando comparado com os secadores rotatórios convencionais.

Silva (2014 e 2018) reafirmou que o uso do secador rotoaerado, no caso para resíduo de acerola, proporciona uma maior taxa de secagem, uma maior retirada de umidade, um menor tempo de residência e temperaturas de sólido final mais alta, além de manter altos níveis de qualidade dos compostos de interesse, comparado aos secadores convencionais para a mesma finalidade. Silva (2018) também verificou a possibilidade de acoplar sistemas de pré-tratamento como radiação por infravermelho, micro-ondas e pulverização de etanol de maneira simples sem a necessidade de alterar a configuração do secador rotoaerado.

2.6. Transferência simultânea de massa e energia em secador rotatório

Nos processos de transferência de massa e energia, são fundamentais o estudo e a escolha de um modelo matemático que represente satisfatoriamente as condições operacionais e a obtenção de dados das distribuições de umidade e temperatura do material dentro do secador. Além de permitir uma boa compreensão do processo no interior do equipamento, também gera a possibilidade de aplicar ao processo técnicas de otimização.

A secagem em secadores rotatórios, de um modo geral é um processo complexo que envolve diversos mecanismos e está associado ao movimento das partículas dentro dos mesmos (IGUAZ *et. al.*, 2003). O modelo matemático de secadores deve expressar as transferências de calor e massa entre os particulados e o fluido de secagem. Isso demanda subdividir o modelo em dois tipos: um para o material, para prever o equilíbrio e a cinética de secagem do material de interesse e um outro modelo para o equipamento descrevendo o fluxo e o tempo de residência do sólido e do gás dentro do secador, bem como os coeficientes de transferência de massa e calor (TÓRREZ *et. al.*, 1998).

A definição do modelo global de secagem em secadores rotatórios, apresentada por Reay (1989) e demonstrada na Figura 2.12, tem como base determinações em laboratório de correlações empíricas para descrever o comportamento do material mediante diversas condições operacionais.

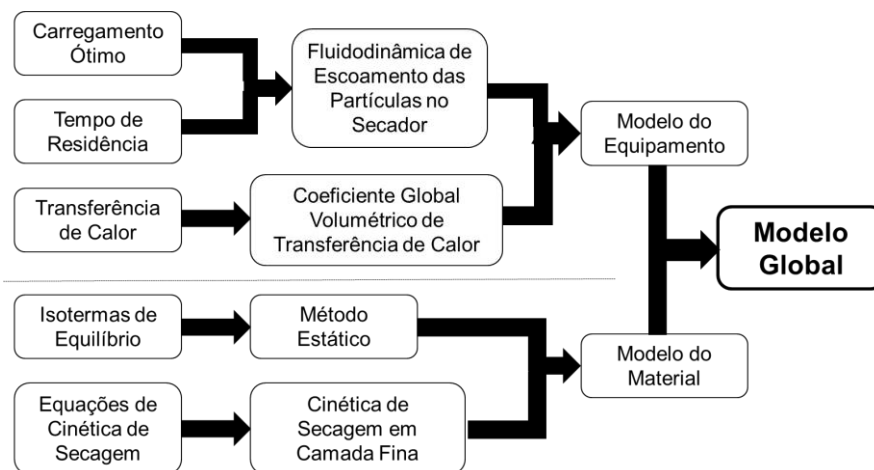


Figura 2.12 – Fluxograma da divisão do modelo global de secagem (REAY, 1989, adaptado pelo autor).

De acordo com Reay (1989), esse modelo deve ser dividido em dois modelos principais: um para o equipamento e outro para o material. O modelo do equipamento deve ter fatores que dependem do tipo de secador utilizado, do transporte das partículas no interior do tambor e tipo de transferência de calor. O do material é relacionado com fatores dependentes da natureza do sólido, ou seja, cinética de secagem, relações de umidade de equilíbrio e qualidade do produto. A organização do estudo de secagem dessa forma possui a capacidade de incorporar as variáveis operacionais e de projeto do secador, bem como características intrínsecas do material particulado a ser secado que influem diretamente no processo.

Saeman e Mitchell (1954) postularam que para secadores rotatórios convencionais a transferência de calor acontece, principalmente, entre o sólido em queda e o ar que passa atrás deste. Arruda (2008), Silvério (2010) e Silva (2018) constataram que no caso do secador rotoaerado o contato fluido-partícula se dá ao longo de todo o secador, tornando mais efetivas as transferências de massa e energia nesse equipamento, tornando o tempo de contato igual ao tempo de residência do sólido.

As equações de balanço de massa e energia contemplam as características do material a ser secado e do secador a ser utilizado. Estas equações são apresentadas com mais detalhes no Capítulo 3. Para a modelagem do processo também se faz necessário um estudo de equações constitutivas e equações auxiliares como, a Umidade de Equilíbrio e Cinética de Secagem do material, além da Perda de Calor e o Coeficiente Global Volumétrico de Transferência de Calor.

2.7. Equações auxiliares

As equações auxiliares são fundamentais para a descrição do processo de secagem, pois cada uma delas carrega importantes características do equipamento ou do material a ser secado. Existem na literatura uma série de publicações propondo modelos matemáticos dinâmicos ou estacionários, todos dependentes da determinação de expressões para a taxa de secagem do material a ser estudado, geralmente advindas da cinética de secagem, além de expressões para os coeficientes de transferência de calor e umidade de equilíbrio. Porém, como o secador rotoaerado é um equipamento novo, vale lembrar que não existem equações para o coeficiente volumétrico de transferência de calor nem para a perda de calor. Porém, por meio de analogias com outros os secadores convencionais e a comparação entre a forma de contato fluido-partícula, é possível adequar essas equações e avaliar as que melhor representam o fenômeno físico para esse secador.

2.7.1. Umidade de equilíbrio

Umidade de equilíbrio (M_{eq}) de um material é a umidade mínima que um composto pode atingir em uma determinada condição de processo (temperatura e umidade relativa do ar). Deste modo, torna-se uma variável relevante no processo pois, mesmo em longos períodos de secagem, não é possível alcançar valores inferiores a este. Definida como o teor de umidade do material, na situação em que as pressões de vapor de água do mesmo e do ambiente se encontram em equilíbrio a uma dada temperatura.

A determinação da umidade de equilíbrio pode ser de forma experimental ou através de equações teóricas, semiempíricas ou empíricas. Para as equações teóricas, que são baseadas em teorias de cinética de adsorção, três se destacam:

- *Kelvin*: A partir da condensação capilar no interior de poros, essa equação modela a adsorção da umidade no sólido. Para grãos, esse modelo é limitado a altos valores de umidade relativa do ar (superior a 95%);
- *Isoformas de Langmuir*: Com a formação de uma monocamada de vapor d'água na superfície interna do sólido, este modelo trabalha com a adsorção sob essa condição. Porém, uma aplicação direta para grãos não se obtém bons resultados pois, não leva em consideração a adsorção multicamada e as interações entre as moléculas de água adsorvidas;

- *Equação de Brunauer, Emmett e Teller (BET)*: Diferente da equação de Langmuir, esta acrescenta a adsorção multicamada. Trazendo assim, resultados satisfatórios para grãos, desde que a umidade relativa do ar seja inferior a 50%. Valores superiores a este não apresentam boas respostas, segundo Brooker *et al.* (1974).

Portanto, tratando-se de grãos e sementes, os modelos teóricos não conseguem prever com precisão para uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar. Tal fato, contribuiu para o surgimento de diversos modelos empíricos e semiempíricos, na tentativa de aumentar essa precisão. As principais equações utilizadas na literatura para previsão de umidade de equilíbrio de grãos são apresentadas na Tabela 2.2. Sendo M_{eq} a umidade de equilíbrio, UR a umidade relativa do ar, a , b , c e d os parâmetros das equações estimados por mínimos quadrados e T_s a temperatura do sólido.

Tabela 2.2 – Equações para Umidade de Equilíbrio.

Nome	Equação
Henderson	$M_{eq} = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-aT_s} \right]^{1/b} \quad (2.1)$
Henderson-Thompson	$M_{eq} = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-a(T_s - c)} \right]^{1/b} \quad (2.2)$
Chung-Pfost	$M_{eq} = \frac{-1}{b} \ln \left[\frac{(T_s + c) \ln(UR)}{-a} \right] \quad (2.3)$
Chen-Clayton	$M_{eq} = \frac{-1}{cT_s^d} \ln \left[\frac{\ln(UR)}{-aT_s^b} \right] \quad (2.4)$
Halsey modificada	$M_{eq} = \left[\frac{-\exp(aT_s + c)}{\ln(UR)} \right]^{1/b} \quad (2.5)$

Fonte: Adaptado pelo autor (BARROZO, 1995).

A equação proposta por Henderson (Equação 2.1) é baseada no modelo de adsorção de Gibbs e uma das mais conhecidas para previsão de umidade de equilíbrio de produtos biológicos. Porém, alguns autores consideram esta inadequada para grãos, surgindo novas propostas com alterações empíricas para a mesma, por exemplo a de Henderson-Thompson e

Chen-Clayton (Equação 2.2 e 2.4). A de Chung-Pfost (Equação 2.3) provem de modificações empíricas na equação de Harkins e Jura. A de Halsey modificada (Equação 2.5) é proveniente de alterações empíricas da equação de Halsey, sendo esta baseada no modelo teórico de BET.

Segundo Barrozo (1995), para sementes de soja a Equação 2.5 é a mais indicada para representar os dados de equilíbrio de dessorção. Pois, apresentou melhor concordância através da estimação dos parâmetros a partir de dados experimentais, medidas de curvatura e vício não significativas.

2.7.2. Cinética de Secagem

Como citado anteriormente neste capítulo no item 2.3, a secagem de um determinado material pode se dar em dois ou mais períodos. Para materiais com umidade elevada, existe um período em que a taxa de secagem é constante pois, a resistência interna ao transporte de umidade é muito menor do que a resistência externa de remoção do vapor de água da superfície. Após esse período inicial são observados um ou mais períodos em que a taxa decresce continuamente. A divisão entre taxa constante e decrescente é dada pelo teor de umidade nominado como umidade crítica.

Para a soja, o período de taxa constante é praticamente inexistente, a não ser que os mesmos sejam colhidos imaturos ou sofram algum procedimento de umidificação excessiva por algum motivo. Portanto, é de se esperar que os mecanismos internos de transferência de massa tenham uma relevância maior na análise do processo de secagem. Bruin e Luyben (1980) descrevem alguns mecanismos para representar a migração de umidade por meio do sólido:

- *Transporte de vapor de água*: Difusão devido ao gradiente de concentração; difusão de Knudsen; difusão térmica e escoamento viscoso.
- *Transporte de água líquida*: Difusão em termos do gradiente de umidade; escoamento capilar; difusão superficial e movimento por gravidade.

Para grãos e sementes, muitos autores preferem estudar a cinética de secagem, em secadores em camada fina, utilizando equações semiempíricas que são geralmente derivadas de modelos difusivos ou de analogias com outros fenômenos. A Tabela 2.3 apresenta as equações de secagem semiempíricas mais utilizadas para o adimensional de umidade (MR). Sendo MR definido pela Equação 2.6:

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (2.6)$$

Em que, M_{eq} é a umidade de equilíbrio, M é a umidade do sólido em um tempo t e M_0 é a umidade inicial do sólido.

Tabela 2.3 – Equações de cinética de secagem

Nome	Equação
Lewis	$MR = \exp(-Kt) \quad (2.7)$ $onde, K = A \exp(-B/T_f)$
Brooker	$MR = C \exp(-Kt) \quad (2.8)$ $onde, K = A \exp(-B/T_f)$
Henderson e Henderson	$MR = \left[C \exp(-Kt) + \frac{1}{9} \exp(-9Kt) \right] \quad (2.9)$ $onde, K = A \exp(-B/T_f)$
Page	$MR = \exp(-Kt^n) \quad (2.10)$ $onde, K = A \exp(-B/T_f)$
Overhults	$MR = \exp[-(Kt)^n] \quad (2.11)$ $onde, K = \exp(A + B/T_f)$

Fonte: Adaptado pelo autor (BARROZO, 1995).

Onde: K , a constante de secagem; t , o tempo; T_f , a temperatura do fluido (ar); A , B , C e n são parâmetros a serem estimados. O parâmetro K é conhecido como constante de secagem e em trabalhos que utilizam de modelos difusivos é comum realizar relações deste com a difusividade efetiva (Equação 2.12). Nas quatro primeiras equações, a variação de K se dá em um modelo do tipo Arrhenius, já a última é uma função diferente.

$$K = \frac{D_{ef} \pi^2}{R^2} \quad (2.12)$$

Para sementes de soja, Barrozo (1995) constatou que para este material a equação de Overhults (Equação 2.10) é a mais indicada, já que, apresentou na estimação dos parâmetros a partir de dados experimentais, menor vício e curvaturas não significativas nas análises estatísticas dos resultados obtidos pelos mesmos. Esta equação é a que melhor previu os valores da cinética de secagem das sementes de soja,

2.7.3. Equações para Coeficiente Volumétrico de Transferência de Calor e Perda de Calor

Os primeiros pesquisadores a investigarem a transferência de calor em secadores rotatórios foram Miller *et. al.* (1942), Friedman e Marshal (1949) e Myklestad (1963). Todos propuseram equações para o cálculo do coeficiente de transferência de calor em secadores rotatórios convencionais. Arruda (2008), tratando do secador rotoaerado utiliza a Equação 2.13 de Myklestad (1963) para o cálculo do calor perdido e a de Friedman e Marshal (1949), Equação 2.14 para o coeficiente volumétrico de transferência de calor.

$$U_p = K_F G_f^{m_F} \quad (2.13)$$

$$U_{va} = K_F G_f^{m_F} G_s^{n_F} \quad (2.14)$$

Porém, tratando-se de soja, Barrozo (1995) utilizou a correlação de Sartori (1986), Equação 2.15, para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor num secador de leito deslizante.

$$Nu = 1,31 Pr^{1/3} Re^{0,59} \quad (2.15)$$

2.8. Modelagem matemática do processo de secagem de sementes no secador rotoaerado

Para o projeto e otimização de equipamentos, o tratamento matemático do sistema é muito importante. No caso de secadores rotativos, o desenvolvimento de uma modelagem para secagem com base nas equações de conservação de massa e energia, bem como suas equações constitutivas pertinentes proporcionam um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos. A

validação dos modelos empregados pode auxiliar a identificar problemas de contato sólido-gás ou mesmo indicar necessidade de modificações da configuração e de condições operacionais.

Os modelos matemáticos dos processos de secagem podem ser classificados como logaritmos e exponenciais, simplificados de balanço de calor e massa e modelos baseados em equações diferenciais parciais (PARRY, 1985). Os logaritmos e exponenciais foram os primeiros a serem desenvolvidos devido a simplicidade na obtenção de soluções. Seguido de diversos modelos empíricos e semiempíricos baseados em balanços de calor e massa, porém, com grandes simplificações com o intuito de facilitar a obtenção de soluções devido as limitações computacionais da época. Contudo, mediante a evolução computacional científica, os modelos de secagem oriundos de equações diferenciais parciais com menor número de restrições têm crescido ao longo dos anos.

KEMP e OAKLEY (1997) apresentaram uma sistemática de simulação de secadores rotatórios fundamentada em um modelo incremental unidimensional. No qual, conjunto de equações para o movimento da partícula, transferências de calor e massa, balanços de energia e massa em condições locais devem ser resolvidas simultaneamente em pequenos incrementos ao longo do secador. Os incrementos podem ser fixos em relação ao tempo, comprimento ou umidade do material.

IGUAZ *et. al.* (2003) propuseram um modelo dinâmico para a simulação do processo de secagem de produtos vegetais, dividindo o secador em 10 zonas aplicando os balanços de massa e energia em cada uma delas. As predições do modelo indicaram que as umidades do ar, do produto e a temperatura dependem fortemente das condições operacionais do secador rotatório, já que a temperatura de entrada do ar é a variável que exerce maior efeito.

Para o secador rotoaerado, a modelagem pode ser elaborada por meio de uma relação entre este secador com os rotatórios convencionais trazendo uma modelagem aplicável para qualquer tipo de material particulado. O modelo deve ser baseado nas características fluidodinâmicas do equipamento e também do material, no qual, em um elemento infinitesimal de volume do secador aplica-se balanços de massa e energia que geram equações diferenciais que devem ser resolvidas simultaneamente para as variáveis envolvidas no processo. Tais equações e suposições adotadas no modelo são apresentadas em maiores detalhes no Capítulo 3.

Vale lembrar que para secadores rotatórios convencionais, o contato sólido-fluido ocorre apenas durante a queda das partículas dos suspensores. Já o rotoaerado o sólido fica em

contato com o ar durante toda a sua permanência no interior do tambor, assim, o tempo efetivo é igual ao tempo médio de residência.

A definição de um modelo apropriado para o processo é fundamental, não somente para compreender os perfis de umidade e temperatura do ar e do sólido no interior do secador que são fundamentais para escolha de uma condição que preserve a qualidade das sementes. Um modelo adequado pode servir também para que se possa aplicar técnicas de otimização disponíveis na literatura como mais uma ferramenta que possibilite, tanto a determinação de parâmetros difíceis de serem medidos, como na localização de ótimos de operação do secador para cada caso analisado.

CÁPITULO 3 - TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE MASSA E ENERGIA NA SECAGEM DE SEMENTE DE SOJA EM SECADOR ROTOAERADO

3.1. Material utilizado nos experimentos

Para os procedimentos experimentais foram utilizadas sementes comerciais de soja geneticamente modificadas adquiridas no mercado formal. Estas apresentavam cerca de $9,0 \pm 0,2\%$ (bu) de umidade. Para fins de estudo, as sementes de soja foram reumidificadas artificialmente por meio da absorção de vapor de água saturado até alcançarem a umidade desejada. Após cada reumidificação, para a realização dos experimentos, a umidade das sementes foi mensurada pelo método da estufa ($105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 horas). Essa nova umidade foi considerada como inicial e constituiu como base para comparação com a umidade no final de cada secagem.

3.1.1. Reumidificação soja

Para o processo de reumidificação as sementes de soja foram postas em bandejas dentro de uma câmara com água e temperatura controlada (40°C) por 24 horas, onde não havia contato direto entre as sementes e a água, Figura 3.1. A umidade inicial das sementes apresentou valores de $14,8 \pm 0,2\%$ (bu) após a reumidificação.



Figura 3.1 – Sistema para reumidificação das sementes. Fonte: O autor (2020).

3.1.2. Método da Estufa

Para medida da umidade das sementes, utilizou-se o método da estufa. Nesse teste inicialmente pesava-se a massa do pesa-filtro vazio em uma balança analítica com precisão de 0,0001g (Figura 3.2.a). Após recolher a amostra de sementes de soja (Figura 3.2 b) desejada tomava-se nota de sua massa novamente. Em seguida, o conjunto era posto em uma estufa (Figura 3.2.c) com temperatura controlada de $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por um período de 24h. Subsequentemente, após resfriamento em um dessecador, anotava-se a massa novamente e pela diferença de massa era possível calcular a porcentagem de umidade por meio da Equação 3.1.

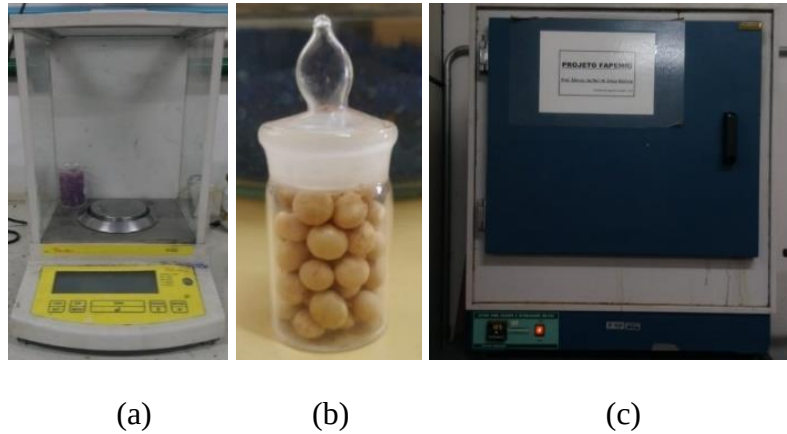


Figura 3.2 – Método da Estufa: Balança Analítica (a); Pesa-Filtro (b); Estufa (c). Fonte: O autor (2020).

$$M_i = \frac{m_a - m_d}{m_a} * 100 \quad (3.1)$$

Sendo:

- M_i : a umidade referente a amostra, em base úmida (bu);
- m_d : a massa da amostra após o Método da Estufa, em gramas;
- m_a : a massa da amostra antes do Método da Estufa, em gramas;

3.2. Equipamento: Secador Rotoaerado

Os testes de secagem foram realizados no secador contínuo rotoaerado, em escala piloto, cujo esquema é apresentado na Figura 3.3. A unidade experimental é constituída por um soprador do tipo ventilador radial (1) acoplado a um duto de comprimento 2m e 0,2m de diâmetro, seguido de um sistema de aquecimento com resistências elétricas (2), controladas por controladores de temperatura que permitem a mudança da tensão e consequentemente da corrente elétrica que, por fim, implicava na alteração do calor fornecido ao ar. As sementes reumidificadas eram armazenadas em um reservatório (3) montado em cima de uma esteira de correia transportadora (4), responsável pelo carregamento dos sólidos. Ao final da esteira as sementes escoavam por uma calha (5) para a entrada do secador e eram removidas na outra extremidade, direcionadas por meio de outra calha a um outro reservatório (6). O tambor rotatório (7) possui a superfície interna coberta por chapas de aço inoxidável de 0,5mm de espessura, com comprimento de 1,5m e 0,29m de diâmetro (relação L/D = 5), sendo que a estrutura permite variações de inclinação e rotação. A configuração do secador rotoaerado possuía 56 minitubos (8) com diâmetros de 0,012m e 0,095m de comprimento, os quais direcionam o ar para as sementes úmidas e promovem um contato direto gás-partícula.

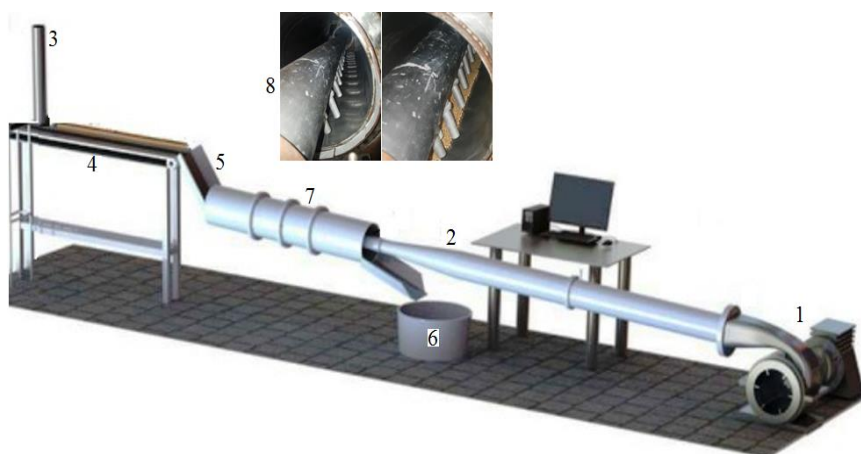


Figura 3.3 – Secador rotoaerado: 1) Soprador; 2) Sistema de Aquecimento; 3) Reservatório; 4) Esteira transportadora; 5) Calha de Entrada; 6) Reservatório; 7) Tambor rotatório; 8) Imagem interna do tambor com minitubos. Fonte: SILVA (2018), adaptado pelo autor.

3.3. Metodologias experimentais desenvolvidas

Com a finalidade de estudar a remoção de umidade da semente de soja no secador rotoaerado e comparar com os valores a serem obtidos pela simulação proposta para o mesmo, foi elaborado um planejamento experimental do tipo composto central (PCC), variando a temperatura de entrada do ar (T_f) em 5 níveis e a velocidade de entrada do ar (v_f) em 5, porém, no intuito de contemplar a qualidade das sementes, houve a necessidade de expandir o nível da temperatura para incluir valores menores dessa variável, como nos estudos de Souza (2013) e Barrozo *et. al.* (2005 e 2006), acrescentando mais 3 níveis (40, 35 e 30°C) conforme mostra a Tabela 3.1.

Contudo, em testes preliminares observou-se que a qualidade das sementes já estava baixa, optando por realizar um outro planejamento adquirindo um novo lote de sementes para uma melhor análise (Capítulo 4), porém as simulações desses testes preliminares responderam bem aos ajustes desses valores e o planejamento foi mantido dessa maneira.

Tabela 3.1 – Níveis de codificação das variáveis

		Níveis						
Variáveis	+1,41	+1	0	-1	-1,41	-2,14	-2,86	-3,64
T_f (°C)	65	62	55	48	45	40	35	30
v_f (ms ⁻¹)	2,1	1,9	1,5	1,1	0,9	-	-	-

A Equação 3.2 traz a codificação para os respectivos níveis. A influência das variáveis T_f e v_f na umidade e na temperatura das sementes, foram avaliadas por técnicas de regressão e de superfície de resposta (BOX *et. al.*, 1978).

$$x_1 = \frac{T_f - 55}{7} \quad , \quad x_2 = \frac{v_f - 1,5}{0,4} \quad (3.2)$$

Os experimentos foram dispostos conforme a Tabela 3.2. Para avaliar o planejamento proposto, algumas condições foram fixadas e foram feitas duas repetições no ponto central.

Tabela 3.2 – Planejamento realizado variando temperatura e velocidade do ar de entrada mantendo a umidade inicial em valores próximos.

<i>Experimento</i>	$T_f (^{\circ}C)$	$v_f (ms^{-1})$	$M_0 (\% bu)$
1	30	0,9	14,8
2	35	0,9	14,9
3	40	0,9	14,9
4	45	1,5	15,0
5	48	1,1	14,7
6	48	1,9	14,7
7	55	0,9	14,9
8	55	1,5	14,7
9	55	1,5	14,7
10	55	2,1	15,0
11	62	1,1	14,7
12	62	1,9	14,8
13	65	1,5	14,7

3.3.1. Inclinação e rotação do tambor

É possível variar a inclinação e a rotação do tambor rotativo do secador rotoaerado. Por meio de testes preliminares ambas as variáveis foram fixadas em 0,2° e 1,5 rpm de forma que não formasse sobreposição de camadas de sementes nem espaços vazios dentro do tambor de forma a aproveitar melhor o contato gás-partícula dentro do equipamento.

3.3.2. Vazão de alimentação das sementes

Como a alimentação era feita por meio de correia transportadora, teste preliminares foram feitos para fixar a vazão de alimentação em 0,06kg/min, também para garantir que não houvesse sobreposição de camadas de sementes nem espaços vazios dentro do tambor de forma a aproveitar melhor o contato fluido-partícula dentro do secador (Figura 3.4.a) e um transporte mais uniforme na correia transportadora (Figura 3.4.b).

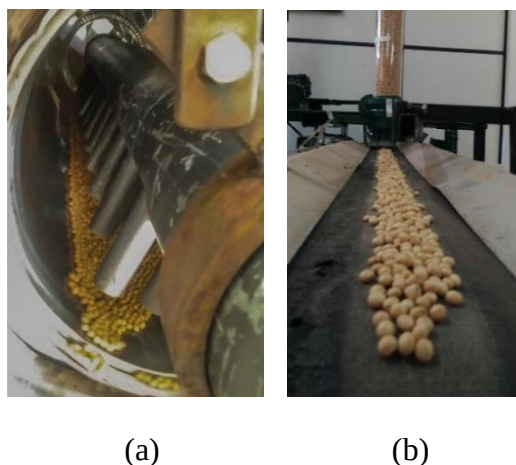


Figura 3.4 – Sementes dentro do tambor rotatório (a) e sementes sobre a correia transportadora (b). Fonte: O autor (2020).

3.3.3. Procedimento Experimental

Com a unidade experimental montada e os equipamentos de medição devidamente calibrados, ligava-se o soprador, o sistema de aquecimento e o de rotação do tambor nas condições operacionais estabelecidas pelo planejamento experimental. Ainda sem realizar a alimentação das sementes, mantinha-se essas condições até a temperatura e a velocidade do ar estabilizarem. Após atingir as condições iniciais, ligava-se o sistema de alimentação com as sementes previamente reumidificadas. Em intervalos de 10 minutos, recolhia-se uma amostra ao final da esteira transportadora por um período de 1 minuto e em seguida pesava-se em uma balança analítica com precisão de 0,0001g para certificação da vazão de entrada. Após uma hora de operação realizava-se o mesmo procedimento na saída do secador, para constatação do estabelecimento do regime permanente do equipamento permitindo ajustar a vazão de entrada caso fosse necessário.

Todas as medidas de umidade do sólido, tanto da entrada e da saída, quanto das posições intermediárias, foram feitas em duplicatas. Para a umidade de entrada e saída as amostras foram recolhidas em três momentos distintos. A primeira no momento em que o sistema atingia regime permanente, a segunda amostragem na metade do tempo de operação e uma terceira ao final do processo para obtenção da média da umidade do sólido ao longo de todo o experimento. Para as posições ao longo do secador, o mesmo foi dividido em três pontos de amostragem: 0,4m, 0,8m e 1,2m, como demonstrado na Figura 3.5.

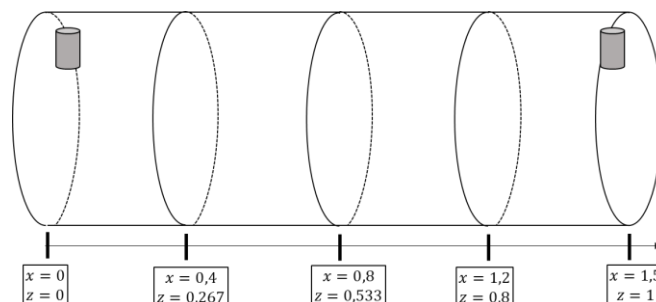


Figura 3.5 – Esquema das posições de amostragem intermediárias, dos termopares e higrômetros no secador rotoaerado.

As amostras intermediárias eram recolhidas após o sistema atingir seu regime permanente, em média uma hora e dez minutos após o início da alimentação e novamente após o regime ter se reestabelecido (verificado pela constância da vazão de saída do sólido). Para a aquisição das mesmas utilizava-se um bastão com uma cápsula capaz de capturar a amostra no meio do secador em operação.

A temperatura do sólido antes e após a secagem foram aferidas nos mesmo três momentos de aquisição das umidades de entrada e saída da semente. As sementes eram acondicionadas em um invólucro isolante e sua temperatura é medida por um termopar de cobre-constantan acoplado ao recipiente isolante, que permitia o contato direto do mesmo com a semente. Ao final do experimento era pesada a carga de sólidos do secador em balança analítica para obtenção do tempo médio de residência por meio do *hold-up*. A temperatura do ar, bem como sua umidade relativa foram medidas durante todo o experimento por meio de um termopar de cobre-constantan e um higrômetro agregados a um sistema computacional que permitia aferição em tempo real, representados por cilindros cinzas na Figura 3.5. A velocidade do ar era aferida no duto de entrada de diâmetro 0,2m por um anemômetro de fio quente TSI *Incorporated*, modelo 9545, antes do sistema de aquecimento. Todas as amostras de umidade do sólido foram realizadas pelo método de estufa apresentado nesse capítulo, no subtópico 3.1.2. Os experimentos de secagem foram realizados em uma faixa de 40% a 60% de umidade relativa do ar de entrada (ambiente), devido a essa condição, era possível realizar apenas um experimento por dia devido à queda da umidade relativa do ar com o passar das horas, principalmente no período da tarde.

O tempo médio de residência (τ) foi calculado pelo *hold up*, coletando todo o sólido dentro do tambor rotatório após o fim da alimentação, medindo sua massa (carga de sólido: H^*)

e dividindo pela vazão mássica de alimentação de sementes (G_s), conforme a Equação 3.3 a seguir.

$$\tau = \frac{H^*}{G_s} \quad (3.3)$$

3.4. Modelagem matemática da transferência simultânea de massa e energia da secagem de semente de soja em secador rotoaerado

Com base no modelo de duas fases apresentado no subtópico 2.6, foi desenvolvido uma modelagem que contemplasse a aplicação do secador rotoaerado para a secagem de sementes de soja. Tal modelo é fundamentado nas características fluidodinâmicas do equipamento e também do material. A Figura 3.6 mostra um esquema baseado em um elemento infinitesimal de volume do secador operando com fluxo contracorrente, sobre o qual foram realizados os balanços de massa e energia que deram origem a um sistema de equações diferenciais que devem ser resolvidas simultaneamente para as variáveis envolvidas no processo de secagem de materiais particulados.

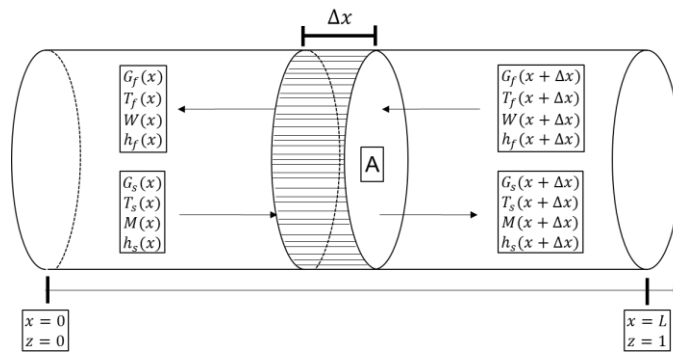


Figura 3.6 – Esquema do elemento infinitesimal de volume do secador rotoaerado.

Para o desenvolvimento do modelo algumas suposições foram adotadas:

- A velocidade de escoamento do sólido ao longo do tambor é constante;
- A taxa de secagem é avaliada no elemento infinitesimal de volume do secador;
- As propriedades termodinâmicas do material e do ar são constantes ao longo do secador;

- O diâmetro das partículas não se altera durante a secagem e as mesmas consideradas esferas;
- As propriedades físicas do sólido não se alteram;
- As condições experimentais iniciais de vazão, temperatura e umidade do sólido e do ar são constantes;
- A inclinação e a rotação do tambor são constantes durante a secagem.

3.4.1. Equações Auxiliares

Mediante as suposições adotadas, algumas equações auxiliares foram estabelecidas para o desenvolvimento da modelagem e que aparecem de forma implícita no modelo.

Velocidade de escoamento dos sólidos no tambor ($v_{sól}$):

$$v_{sól} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = \frac{L}{\tau} \quad (3.4)$$

Equação da taxa de secagem pontual (R_w):

$$-R_w = \frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{[M - M_0]}{\Delta t} = \frac{dM}{dt} \quad (3.5)$$

$$-R_w = \frac{(MR - 1)(M_0 - M_{eq})}{t} \quad (3.6)$$

Adimensional de comprimento (z):

$$z = \frac{x}{L} \quad (3.7)$$

Carga total de sólidos no secador (H^*):

$$H^* = \tau G_s \quad (3.8)$$

Entalpia do ar úmido (h_f):

$$h_f = C p_f T_f + W(\lambda + C p_v T_f) \quad (3.9)$$

Entalpia do sólido úmido (h_s):

$$h_s = C p_s T_s + M C p_l T_s \quad (3.10)$$

Conforme visto no Capítulo 2, para sementes de soja, a equação de umidade de equilíbrio utilizada nesse modelo foi a de Halsey modificada e para a cinética de secagem foi a de Overhults (BARROZO, 1995). As equações para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor foi o modelo proposto por Sartori (1986), tendo em vista os bons resultados para o contato fluido-partícula da soja em leito deslizante e para o calor perdido foi a de Myklestad (1963) modificada. Todas ajustadas para o secador rotoaerado e para as sementes de soja. Esse conjunto de correlações são apresentados a seguir.

Equação de Halsey modificada:

$$M_{eq} = \left(\frac{-\exp(-0,00672T_s + 3,02)}{\ln(UR)} \right)^{\frac{1}{1,508}} \quad (3.11)$$

Equação de Overhults:

$$MR = \exp[-(Kt)^{0,412}] \quad (3.12)$$

$$K = \exp(13,58 - 6287,1/T_f) \quad (3.13)$$

Coeficiente Global Volumétrico de Transferência de Calor:

$$U_{va} = 0,616Pr^{1/3}Re^{0,19}\frac{Ak_f}{Vd_p} \quad (3.14)$$

Coeficiente de Calor Perdido:

$$U_p = 0,387G_f^{1,148} \quad (3.15)$$

3.4.2. Balanço de Massa para a Água

Tomando como base o elemento infinitesimal apresentado na Figura 3.6, o balanço global de massa para a água que entra e sai desse elemento de volume é descrito pela Equação 3.17 a seguir.

$$G_s M(x) + G_f W(x + dx) = G_s M(x + dx) + G_f W(x) \quad (3.16)$$

$$G_f [W(x + dx) - W(x)] = G_s [M(x + dx) - M(x)] \quad (3.17)$$

Dividindo os dois lados da expressão por Δx e aplicando $\lim_{\Delta x \rightarrow 0}$:

$$G_f \frac{dW}{dx} = G_s \frac{dM}{dx} \quad (3.18)$$

Com $\frac{dM}{dx} = \frac{\tau}{L} \frac{dM}{dt} = -R_w \frac{\tau}{L}$, a Equação 3.19 fica:

$$G_f \frac{dW}{dx} = -G_s R_w \frac{\tau}{L} \quad (3.19)$$

Substituindo a Equação 3.8 na Equação 3.18, obtém-se a Equação 3.20:

$$G_f \frac{dW}{dx} = -R_w \frac{H^*}{L} \quad (3.20)$$

Reescrevendo a Equação 3.20 em função do adimensional de comprimento, a Equação 3.21 é gerada:

$$G_f \frac{dW}{Ldz} = -R_w \frac{H^*}{L} \quad (3.21)$$

A expressão final do balanço de massa para a variação de umidade absoluta em função do comprimento adimensional do secador é expressa pela Equação 3.22.

$$\frac{dW}{dz} = -\frac{R_w H^*}{G_f} \quad (3.22)$$

3.4.3. Variação da Quantidade de Água no Sólido

A variação da quantidade de água no sólido pode ser descrita pela Equação 3.23.

$$G_s M(x) = G_s M(x + dx) + R_w G_s \Delta t \quad (3.23)$$

$$G_s [M(x + dx) - M(x)] = -R_w G_s \Delta t \quad (3.24)$$

Dividindo os dois lados da expressão por Δx e aplicando $\lim_{\Delta x \rightarrow 0}$:

$$G_s \frac{dM}{dx} = -R_w G_s \frac{dt}{dx} = -R_w G_s \frac{\tau}{L} \quad (3.25)$$

Escrevendo a Equação 3.25 em função do adimensional de comprimento:

$$G_s \frac{dM}{Ldz} = -R_w G_s \frac{\tau}{L} \quad (3.26)$$

A expressão final do balanço de massa que pondera a variação da umidade do sólido ao longo do secador é dada pela Equação 3.27.

$$\frac{dM}{dz} = -\frac{R_w H^*}{G_s} \quad (3.27)$$

3.4.4. Balanço de Energia para o Ar

Para o balanço de energia na fase gasosa considera-se que toda energia que entra no secador com o ar quente, parte é transferido para o sólido, outra é perdida através do tambor e o restante deixa o secador com a corrente de ar de saída. A parcela transferida para o sólido pode ser calculada usando o conceito de coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}). Dessa forma, o balanço de energia para a fase gasosa é dado pela Equação 3.28.

$$G_f h_f(x + dx) = G_f h_f(x) + U_{va} A \Delta x (T_f - T_s) + Q_p \quad (3.28)$$

A parcela de calor perdido pode ser expressa pela relação de Douglas *et al.* (1993), representado pela Equação 3.29.

$$Q_p = U_p \pi D \Delta x (T_f - T_{amb}) \quad (3.29)$$

Substituindo a Equação 3.29 na 3.28 e rearranjando algebricamente os termos obtém-se a Equação 3.30.

$$G_f[h_f(x + dx) - h_f(x)] = U_{va}A\Delta x(T_f - T_s) + U_p\pi D\Delta x(T_f - T_{amb}) \quad (3.30)$$

Dividindo os dois lados da expressão por Δx e aplicando $\lim_{\Delta x \rightarrow 0}$:

$$G_f \frac{dh_f}{dx} = U_{va}A(T_f - T_s) + U_p\pi D(T_f - T_{amb}) \quad (3.31)$$

Derivando a Equação 3.9 é possível obter a variação da entalpia do fluido ao longo do secador em função do comprimento.

$$\frac{dh_f}{dx} = (Cp_f + W Cp_v) \frac{dT_f}{dx} + (\lambda + Cp_v T_f) \frac{dW}{dx} \quad (3.32)$$

Substituindo a Equação 3.32 na Equação 3.31 obtém-se a Equação 3.33.

$$G_f \left[(Cp_f + W Cp_v) \frac{dT_f}{dx} + (\lambda + Cp_v T_f) \frac{dW}{dx} \right] = U_{va}A(T_f - T_s) + U_p\pi D(T_f - T_{amb}) \quad (3.33)$$

Substituindo a Equação 3.20 na Equação 3.33 obtém-se a Equação 3.34

$$G_f (Cp_f + W Cp_v) \frac{dT_f}{dx} - \frac{R_w H^*}{L} (\lambda + Cp_v T_f) = U_{va}A(T_f - T_s) + U_p\pi D(T_f - T_{amb}) \quad (3.34)$$

Escrevendo a Equação 3.34 em função do adimensional de comprimento obtém-se a Equação 3.35.

$$G_f (Cp_f + W Cp_v) \frac{dT_f}{dz} - R_w H^* (\lambda + Cp_v T_f) = U_{va}V(T_f - T_s) + U_p\pi DL(T_f - T_{amb}) \quad (3.35)$$

Explicitando a Equação 3.35, a equação final do balanço de energia para a fase gasosa é expressa pela Equação 3.36.

$$\frac{dT_f}{dz} = \frac{U_{va}V(T_f - T_s) + R_w H^*(\lambda + C_{p_v} T_f) + U_p \pi D L (T_f - T_{amb})}{G_f (C_{p_f} + W C_{p_v})} \quad (3.36)$$

3.4.5. Balanço de Energia para o Sólido

Para a fase sólida, considera-se que o aquecimento da partícula se deve ao calor recebido pelo ar, descontando o calor necessário para vaporizar a água presente no mesmo e aquecê-la até a temperatura do gás. Assim, o balanço de energia para essa fase pode ser expresso pela Equação 3.37.

$$G_s h_s(x + dx) = G_s h_s(x) + U_{va} A \Delta x (T_f - T_s) - G_s [M(x) - M(x + dx)] [\lambda + C_{p_v} (T_f - T_s)] \quad (3.37)$$

Multiplicando o terceiro termo do lado direito da Equação 3.37 por $\Delta t / \Delta t$ obtém-se a Equação 3.38.

$$G_s h_s(x + dx) = G_s h_s(x) + U_{va} A \Delta x (T_f - T_s) - G_s \left[\frac{M(x) - M(x + dx)}{\Delta t} \right] [\lambda + C_{p_v} (T_f - T_s)] \Delta t \quad (3.38)$$

Substituindo a Equação 3.4 e 3.5 na Equação 3.38 é possível obter a Equação 3.39.

$$G_s h_s(x + dx) = G_s h_s(x) + U_{va} A \Delta x (T_f - T_s) - G_s R_w [\lambda + C_{p_v} (T_f - T_s)] \frac{\tau}{L} \Delta x \quad (3.39)$$

Rearranjando a equação, substituindo a Equação 3.8, dividindo os dois lados da expressão por Δx e aplicando $\lim_{\Delta x \rightarrow 0}$:

$$G_s \frac{dh_s}{dx} = U_{va}A(T_f - T_s) - \frac{R_w H^*}{L} [\lambda + Cp_v(T_f - T_s)] \quad (3.40)$$

Derivando a Equação 3.10 é possível obter a variação de entalpia do sólido com o comprimento do secador.

$$\frac{dh_s}{dx} = (Cp_s + MCp_l) \frac{dT_s}{dx} + Cp_l T_s \frac{dM}{dx} \quad (3.41)$$

Substituindo a Equação 3.41 na Equação 3.40.

$$G_s \left[(Cp_s + MCp_l) \frac{dT_s}{dx} + Cp_l T_s \frac{dM}{dx} \right] = U_{va}A(T_f - T_s) - \frac{R_w H^*}{L} [\lambda + Cp_v(T_f - T_s)] \quad (3.42)$$

Reescrevendo a Equação 3.42 em função do adimensional de comprimento obtém-se Equação 3.43.

$$G_s(Cp_s + MCp_l) \frac{dT_s}{Ldz} = U_{va}A(T_f - T_s) - G_s Cp_l T_s \frac{dM}{Ldz} - \frac{R_w H^*}{L} [\lambda + Cp_v(T_f - T_s)] \quad (3.43)$$

Substituindo a Equação 3.27 na Equação 3.43 e multiplicando os dois lados por L, obtém-se a Equação 3.44.

$$G_s(Cp_s + MCp_l) \frac{dT_s}{dz} = U_{va}V(T_f - T_s) + R_w H^* Cp_l T_s - R_w H^* [\lambda + Cp_v(T_f - T_s)] \quad (3.44)$$

Explicitando a Equação 3.44, o balanço de energia para a fase sólida que descreve a distribuição de temperatura do sólido em função do comprimento do secador pode ser expresso pela Equação 3.45.

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{U_{va}V(T_f - T_s) + R_w H^* C_{p_l} T_s - R_w H^* [\lambda + C_{p_v}(T_f - T_s)]}{G_s(C_{p_s} + M C_{p_l})} \quad (3.45)$$

3.4.6. Sistema de Equações

Desta forma, o modelo para determinar os perfis de umidade e temperatura do sólido e do ar de secagem no interior do secador rotoaerado pode ser descrito pelo seguinte sistema de equações diferenciais:

$$\frac{dW}{dz} = -\frac{R_w H^*}{G_f} \quad (3.22)$$

$$\frac{dM}{dz} = -\frac{R_w H^*}{G_s} \quad (3.27)$$

$$\frac{dT_f}{dz} = \frac{U_{va}V(T_f - T_s) + R_w H^* (\lambda + C_{p_v} T_f) + U_p \pi D L (T_f - T_{amb})}{G_f(C_{p_f} + W C_{p_v})} \quad (3.36)$$

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{U_{va}V(T_f - T_s) + R_w H^* C_{p_l} T_s - R_w H^* [\lambda + C_{p_v}(T_f - T_s)]}{G_s(C_{p_s} + M C_{p_l})} \quad (3.45)$$

As variáveis desse modelo são $T_f(z)$, $T_s(z)$, $W(z)$ e $M(z)$. No caso do secador rotoaerado operando com contato direto entre o material e o ar, o sistema de equações diferenciais obtido nesse trabalho deve ser resolvido simultaneamente para as quatro variáveis envolvidas, levando em consideração as seguintes condições de contorno, sendo 0 (zero) a posição adimensional correspondente a entrada de alimentação das sementes de soja do secador rotoaerado e 1 (um) a posição adimensional referente à saída do secador para as sementes, já para o ar de secagem, essa relação se inverte, a posição 1 é a entrada e 0 a saída:

$$T_f(1) = T_{f0}$$

$$T_s(0) = T_{s0}$$

$$W(1) = W_0$$

$$M(0) = M_0$$

3.4.7. Resolução do Modelo

Foi optado para a resolução do modelo proposto neste trabalho, a técnica de colocação normal com 10 pontos de colocação para a aproximação polinomial de quarta ordem. Esse número de pontos foi empregado mediante testes que mostraram que valores acima deste não traziam melhorias na precisão dos resultados. A tolerância relativa utilizada foi de 10^{-6} (ARRUDA, 2008). Foi empregado a sub-rotina ‘BVP4C’ do software Matlab® R2016a, esta resolve problemas de valor-limite pelo método de aproximação polinomial de quarta ordem. Esta rotina integra um sistema de equações diferenciais definidas por ‘odefun’, sujeitas às condições de contorno descritas por ‘bcfun’ e estimativa inicial definido por ‘solinit’. O código ‘odefun’ especifica como um identificador de função que define as funções a serem integradas. O ‘bcfun’ calcula o erro residual nas condições de contorno. Ambos devem aceitar o mesmo número de argumentos de entrada. Diferente dos problemas de valor inicial, um problema de valor limite pode não ter solução, um número finito de soluções ou infinitas soluções, uma parte importante do processo de resolução de uma BVP é fornecer uma estimativa para a solução necessária. A qualidade dessa estimativa pode ser crítica para o desempenho da sub-rotina e para a obtenção de um cálculo bem-sucedido, o código ‘solinit’ é o local para a entrada dessa estimativa (SHAMPINE, 2004).

3.5. Análise dos resultados experimentais e simulados

Com base no que foi exposto anteriormente, foi possível, a partir da resolução numérica do modelo e da obtenção dos dados experimentais, realizar a comparação entre os resultados experimentais e simulados para a distribuição de umidade das sementes de soja ao longo do comprimento do secador.

A Tabela 3.3 apresenta os resultados experimentais para a umidade final (M_f), o tempo de residência (τ) e a taxa de secagem (Taxa) para as sementes de soja após o processo de secagem em secador rotoaerado. Verificou-se que as variáveis estudadas, temperatura (T_f) e velocidade (v_f) superficial do ar de secagem, influenciaram de maneira significativa a taxa de secagem (Taxa). Os maiores valores de Taxa foram observados nas temperaturas e velocidades mais alta proporcionando os menores valores de umidade final das sementes de soja. Ao observar os experimentos 1, 2, 3 e 7, que possuem a mesma velocidade de entrada do ar, a Taxa aumenta significativamente com o aumento de temperatura. O mesmo ocorre com o aumento

da velocidade, constatado ao analisar os experimentos 7, 8 (ou 9) e 10, que possuem a mesma temperatura (55°C).

Tabela 3.3 – Resultados experimentais da secagem de semente de soja no secador rotoaerado.

<i>Exp.</i>	$T_f (^{\circ}C)$	$v_f (ms^{-1})$	$M_f (\% bu)$	$\tau (min)$	$Taxa (pp\ min^{-1})$
1	30	0,9	14,3	23,3	0,030
2	35	0,9	14,2	23,7	0,034
3	40	0,9	14,1	23,0	0,039
4	45	1,5	14,0	22,5	0,044
5	48	1,1	13,5	22,7	0,053
6	48	1,9	13,1	22,2	0,063
7	55	0,9	13,5	22,3	0,058
8	55	1,5	13,1	22,0	0,068
9	55	1,5	13,2	22,0	0,068
10	55	2,1	13,0	22,2	0,072
11	62	1,1	13,1	22,3	0,076
12	62	1,9	12,9	22,5	0,080
13	65	1,5	12,6	21,0	0,095

As Figuras 3.7 a 3.15 mostram os dados experimentais e os resultados das soluções numéricas do modelo para a umidade da soja (bu), nas diferentes posições ao longo do secador, sendo umidade inicial das sementes experimental a condição de contorno M_0 para a simulação. Os gráficos de todos os experimentos estão contemplados no Apêndice A deste trabalho.

Na Figura 3.7 é possível verificar que as diferenças ou desvios, entre os valores experimentais e simulados nas diferentes posições do secador, considerando a temperatura e velocidade do ar de secagem de 30°C e 0,9ms⁻¹, respectivamente, ficaram praticamente todos dentro da flutuação da incerteza da medida experimental, demonstrando a boa capacidade do modelo em prever essas medidas. O valor médio dos desvios para essa condição, este foi de apenas 0,03pp (pontos percentuais), correspondente a 0,23%.

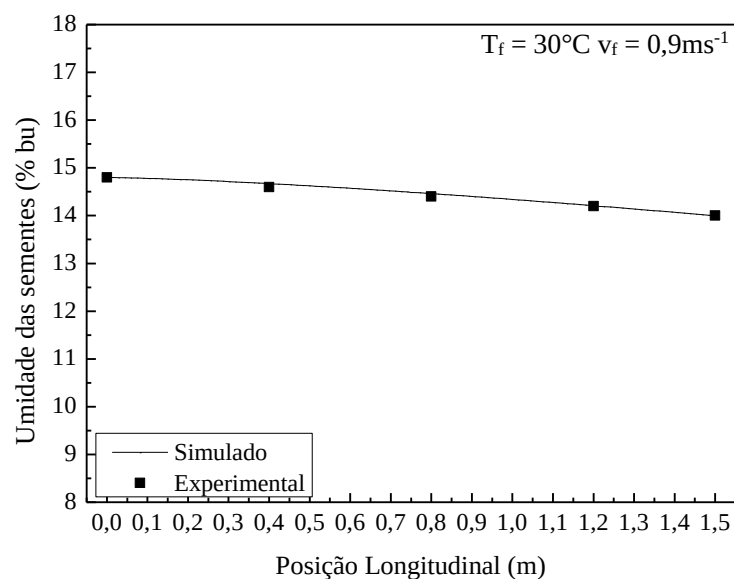


Figura 3.7 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 1.

Já a Figura 3.8 e 3.9, com T_f de 35°C e 40°C, respectivamente e v_f de 0,9ms⁻¹, os desvios médios foram de 0,21pp ou 1,47% para esse experimento e 0,14pp ou 0,99% para o outro.

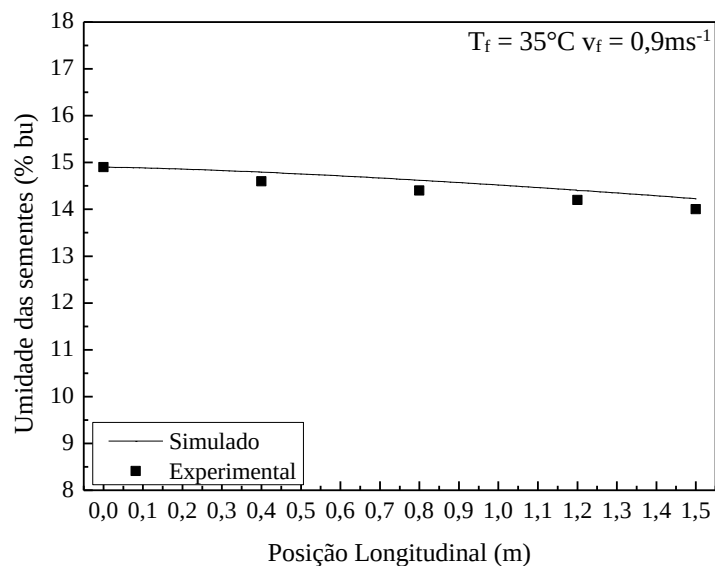


Figura 3.8 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 2.

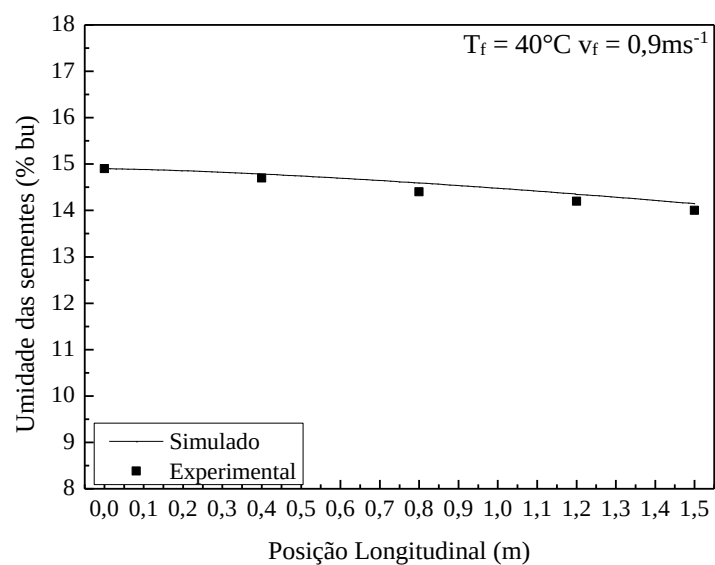


Figura 3.9 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 3.

Para a condição de 45°C e $1,5\text{ms}^{-1}$ (Figura 3.10), o valor médio das diferenças na umidade da soja foi de aproximadamente 0,08pp, ou 0,58%.

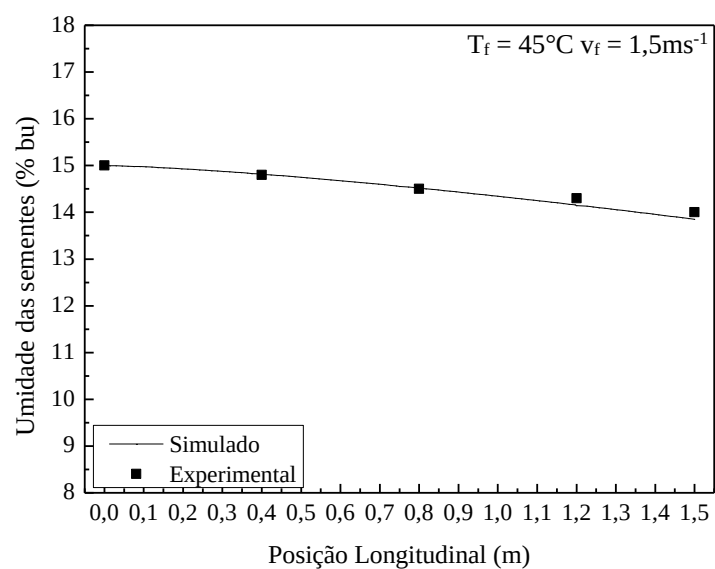


Figura 3.10 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o experimento 4.

Para outras condições como 48°C e $1,9\text{ms}^{-1}$, 55°C e $0,9\text{ms}^{-1}$ e 62°C e $1,1\text{ms}^{-1}$ (Figura 3.11, 3.12 e 3.13), o valor médio do desvio foi aproximadamente 0,26, 0,16 e 0,25pp ou 1,94%, 1,16 e 1,83%, respectivamente.

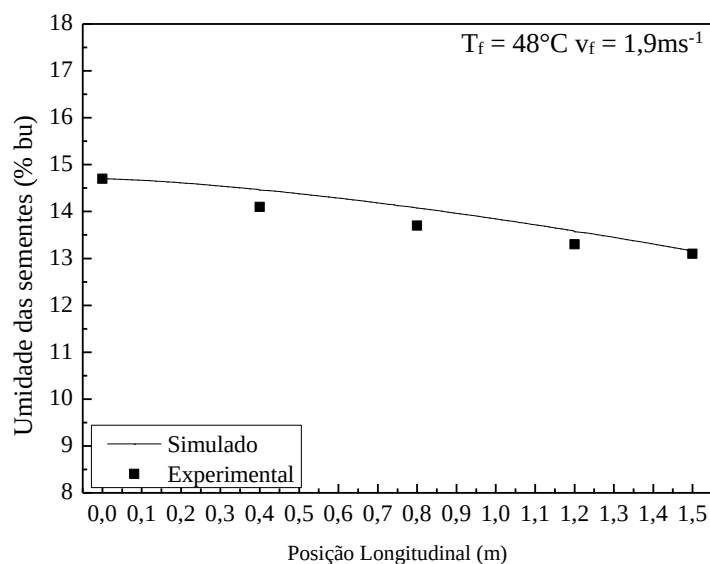


Figura 3.11 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 6.

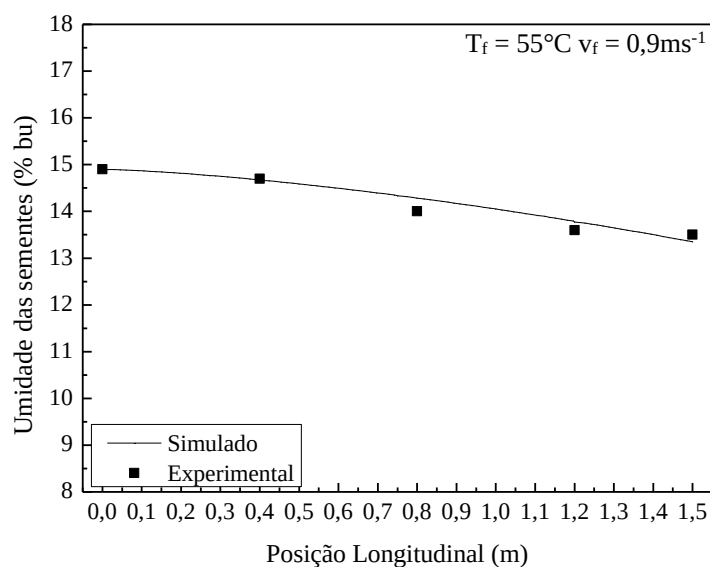


Figura 3.12 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 7.

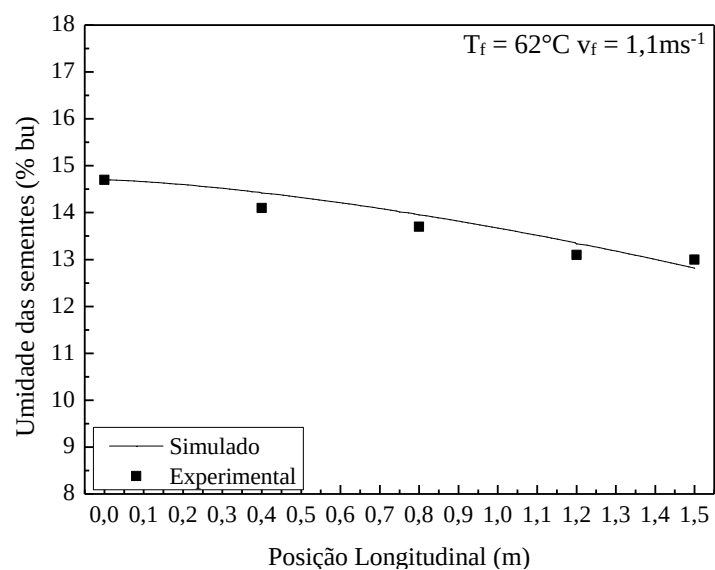


Figura 3.13 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 11.

Observa-se que para temperaturas e velocidades maiores (Figura 3.14 e 3.15), os desvios também foram maiores.

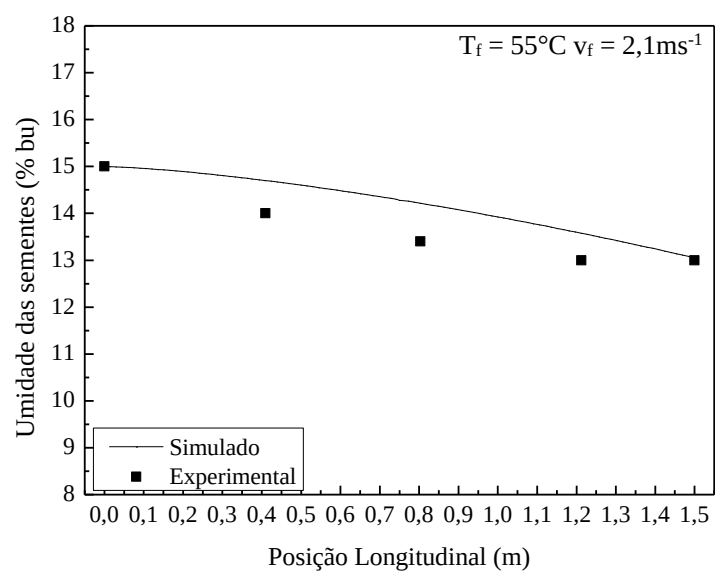


Figura 3.14 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 10.

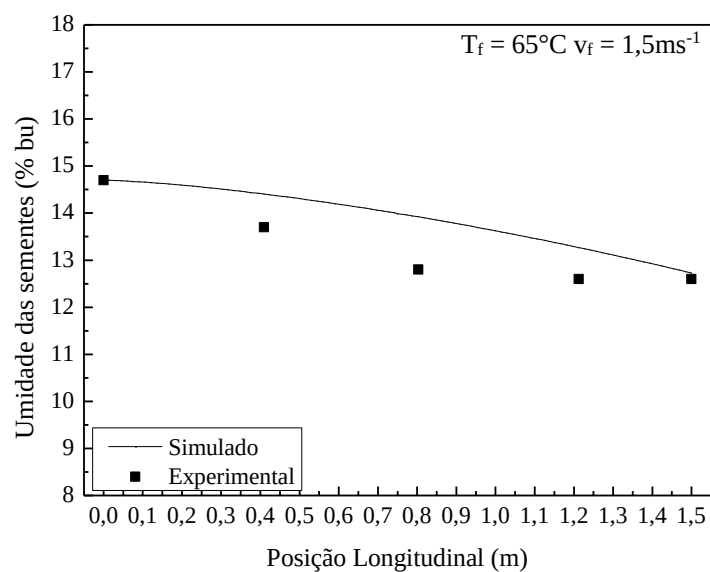


Figura 3.15 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 13.

Baseado nestes resultados, pode-se concluir que, a modelagem utilizada no presente trabalho foi capaz de prever os perfis da secagem de sementes de soja no secador rotoaerado. A Figura 3.16 traz os valores experimentais e simulados médios para M_f das sementes de soja.

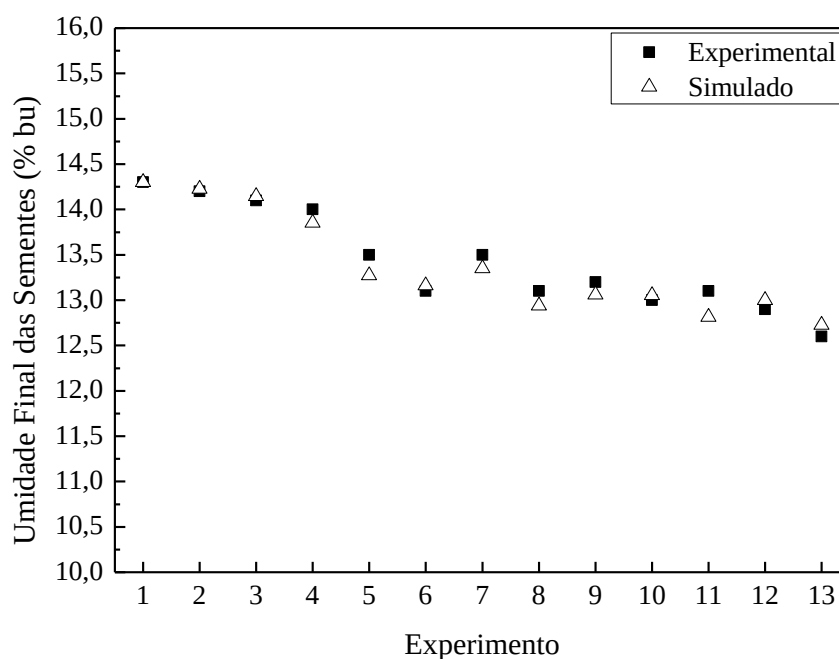


Figura 3.16 – Comparação entre as umidades experimentais e simuladas para as sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado.

O maior desvio apresentado na predição da umidade da semente foi de 1,12pp ou 8,76% para uma medida intermediária do Exp. 13, o que era esperado já que foi a condição com maior temperatura e velocidade do ar também elevada para o processo, podendo concluir um possível limite para o modelo. Contudo, tratando-se da predição dos valores médios finais de umidade após a secagem no secador rotoaerado, o maior desvio foi de 0,28pp ou 2,17% demonstrando uma boa aproximação do modelo para essa resposta.

Nota-se que a média dos desvios entre as umidades experimentais e simuladas finais, em módulo, na saída do secador rotoaerado foi de $0,14 \pm 0,02$ pp, sendo então $1,08 \pm 1,17\%$. As maiores diferenças foram observadas nos Exp. 11 e 5, com 0,28 e 0,26pp ou 2,17% e 1,98% respectivamente. Os menores desvios foram iguais a 0,02 e 0,04pp, ou 0,19 e 0,32% correspondentes as corridas experimentais 2 e 3, sendo que para o Exp. 1 a umidade simulada foi exatamente a mesma que a experimental.

Também foi realizado uma comparação entre os valores experimentais e simulados para a temperatura das sementes na saída do secador para todas as condições experimentais do planejamento experimental, que pode ser vista na Figura 3.17.

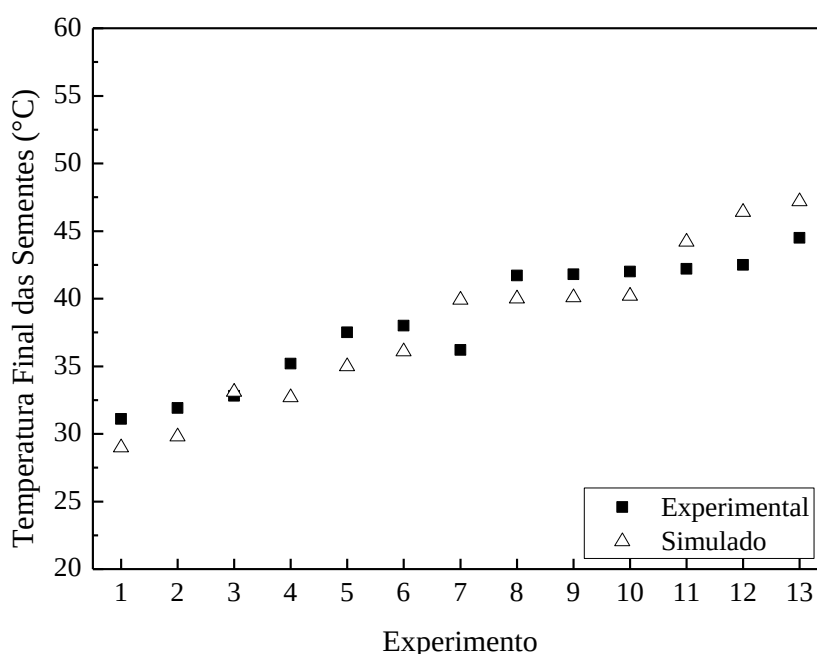


Figura 3.17 – Comparação entre as temperaturas experimentais e simuladas para as sementes de soja submetidas a secagem no secador rotoaerado.

O desvio médio para essa comparação foi de $2,2 \pm 0,6^{\circ}\text{C}$, correspondendo a $5,7 \pm 1,8\%$, sendo a maior diferença de $3,9^{\circ}\text{C}$ ou $9,2\%$ encontrada no Exp. 12 e a menor de $0,3^{\circ}\text{C}$ ou $0,9\%$ para o Exp. 3. Uma boa concordância entre os valores experimentais e simulados pode ser observada.

Foi possível também fazer uma análise sobre a predição da temperatura do ar de secagem na saída do secador. A Figura 3.18 compara os valores experimentais e simulados. Para este caso, o desvio médio foi de $5,6 \pm 2,3^{\circ}\text{C}$, correspondendo a $10,9 \pm 4,4\%$, sendo a maior diferença de $10,5^{\circ}\text{C}$ ou $19,1\%$ encontrada no Exp. 7 e a menor de $0,3^{\circ}\text{C}$ ou $1,0\%$ para o Exp. 1.

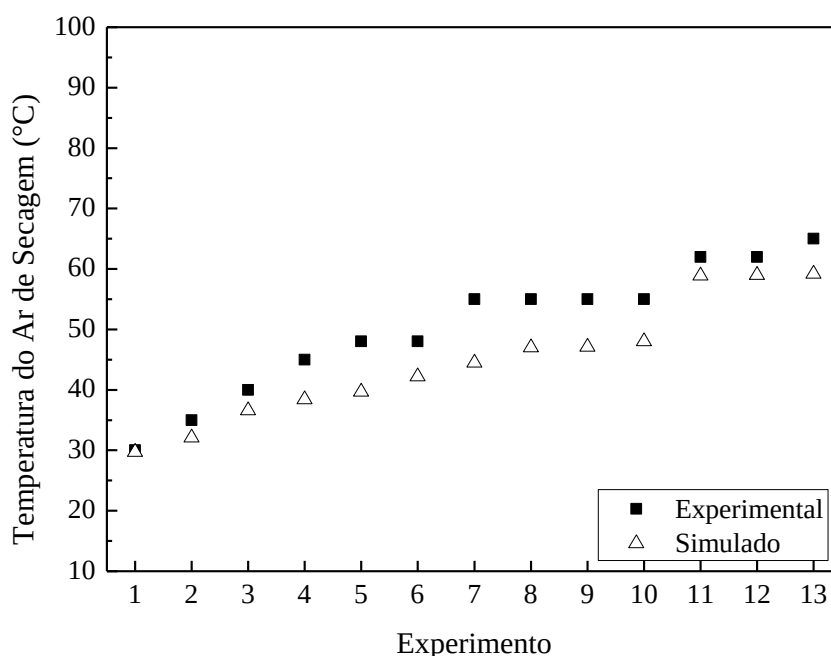


Figura 3.18 – Comparação entre as temperaturas experimentais e simuladas para o ar de secagem.

Avaliando os valores de desvio médio dos resultados simulados em relação aos experimentais observados foram, em valores absolutos, de $1,99 \pm 1,14\%$ para a umidade da semente, $5,7 \pm 1,8\%$ para a temperatura do sólido e $10,9 \pm 4,4\%$ para a temperatura do ar de secagem. Arruda (2008), trabalhando com fertilizantes, obteve valores médios de $14,5\%$, 8% e 10% para umidade do material, temperatura do sólido e temperatura do ar, respectivamente. Os

resultados mostram uma ótima concordância entre os perfis calculados pelo modelo e os obtidos experimentalmente.

A partir da comparação entre os resultados experimentais e simulados, pode-se confirmar que o modelo a duas fases proposto nesse trabalho, baseado nos balanços de massa e energia aplicados em elementos infinitesimais de volume do secador, atingiu os objetivos esperados. Desta forma, tal modelo pode ser utilizado em estudos de otimização do secador rotoaerado, levando em consideração as características intrínsecas do material a ser secado e a fluidodinâmica de escoamento característica desse secador.

Outra análise que pode ser feita é a dos perfis da temperatura e velocidade do ar de secagem no processo por meio da simulação. As Figuras 3.19 e 3.20 apresentam respectivamente, os efeitos da variação de temperatura para uma mesma velocidade e da velocidade para diferentes temperaturas, sobre a umidade das sementes ao longo do secador rotoaerado.

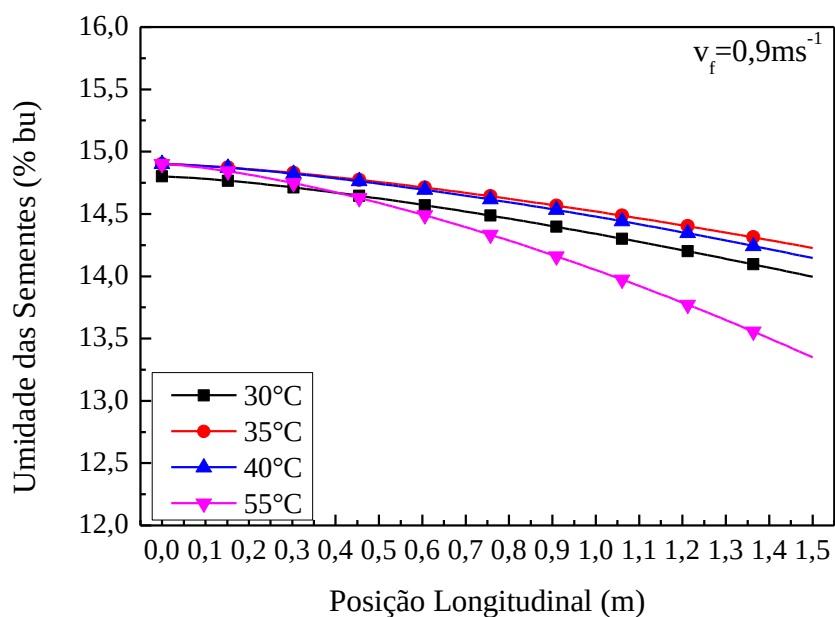


Figura 3.19 – Efeito isolado da temperatura de entrada do ar de secagem na umidade da semente de soja, resultados simulados.

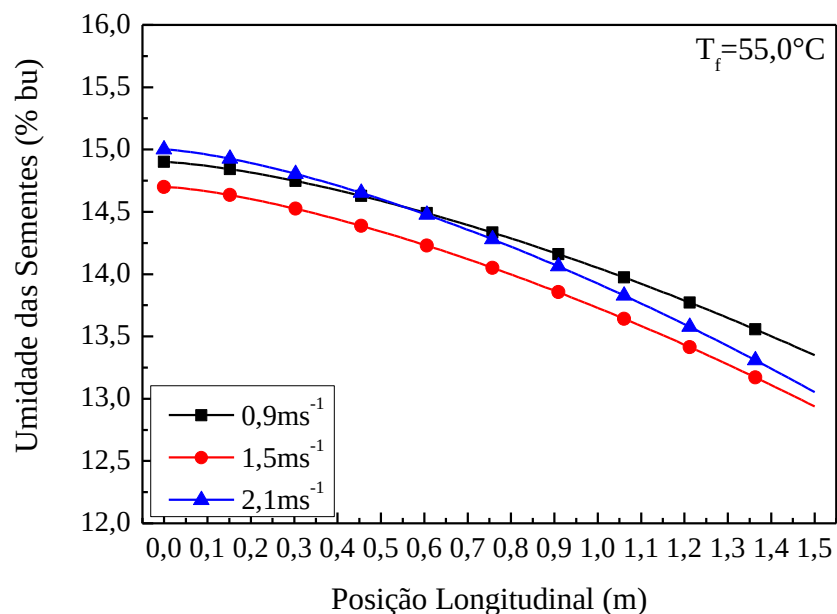


Figura 3.20 – Efeito isolado da velocidade de entrada do ar de secagem na umidade da semente de soja, resultados simulados.

Nota-se que ao aumentar a temperatura (Figura 3.19), a umidade das sementes de soja diminui e que quanto maior a temperatura do ar de secagem mais acentuada é a redução dessa variável resposta. O mesmo ocorre ao avaliar o comportamento isolado da velocidade do ar de entrada (Figura 3.20), quanto maior a velocidade, menor será a umidade. Quando se avalia o comportamento de três temperaturas em três velocidades partindo da mesma umidade inicial das sementes de soja, representados pela Figura 3.21 pode-se verificar que o aumento da variável temperatura tem maior influência na remoção de umidade do que a variável velocidade, consequentemente uma maior taxa de secagem. Mostrando consistência com os resultados obtidos experimentalmente e analisados na Tabela 3.3.

Contudo, quando se trata de sementes de soja outras variáveis relativas à qualidade das sementes devem ser ponderadas, como a germinação e fissura no tegumento dessas sementes. Essa discussão sobre a influência da temperatura do ar de secagem e da velocidade de entrada do ar é vista em maior detalhes no Capítulo 4 do presente trabalho.

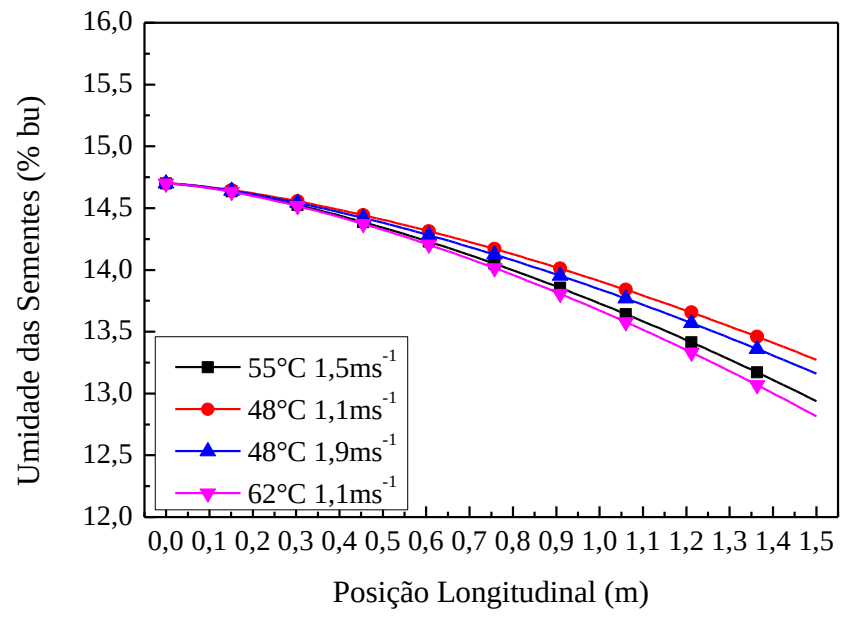


Figura 3.21 – Resultados simulados para três T_f e três v_f .

CÁPITULO 4 - QUALIDADE DA SEMENTE

4.1. Material utilizado e modificações nos experimentos de qualidade da semente e equipamento

Para os experimentos de qualidade das sementes foi utilizado um novo lote de sementes comerciais de soja geneticamente modificadas adquiridas no mercado formal. Com umidade inicial também de $9,0 \pm 0,2\%$ (bu). Foi realizado o mesmo procedimento de reumidificação descrito no subtópico 3.1 para definir a umidade inicial do processo, e foi também aplicado o método da estufa para aferir esses valores.

Conforme descrito nos subtópicos 3.2 e 3.3, o secador rotoaerado foi mantido com a mesma configuração. A inclinação ($0,2^\circ$), a rotação (1,5 rpm) e a vazão de alimentação das sementes ($0,06 \text{ kgmin}^{-1}$) foram mantidas constantes.

4.2. Metodologia e procedimento experimentais

Para avaliar a qualidade das sementes de soja após a secagem em secador rotoaerado um planejamento do tipo Planejamento Composto Central (PCC) com 2 repetições no ponto central foi elaborado para mensurar o efeito das variáveis temperatura do fluido (T_f) e velocidade do ar de secagem (v_f) na capacidade germinativa (qualidade fisiológica) e integridade física (qualidade física) das sementes. A Tabela 4.1 apresenta os níveis escolhidos para ambas as variáveis.

Tabela 4.1 – Níveis das condições experimentais.

	Níveis				
Variáveis	+1,41	+1	0	-1	-1,41
T_f (°C)	64,2	60	50	40	35,8
v_f (ms^{-1})	4,4	4,0	3,0	2,0	1,6

A Equação 4.1 representa as equações de codificações e a Tabela 4.2 traz os experimentos devidamente distribuídos conforme o planejamento em que T_f está em °C e v_f em ms^{-1} .

$$x_1 = \frac{T_f - 50}{10} \quad , \quad x_2 = \frac{v_f - 3,0}{1,0} \quad (4.1)$$

Tabela 4.2 – Experimentos para análise da qualidade das sementes de soja em secador rotoaerado.

<i>Experimento</i>	T_f (°C)	v_f (ms^{-1})	M_0 (% bu)
1	35,8	3,0	15,2
2	40	2,0	15,2
3	40	4,0	15,2
4	50	1,6	15,1
5	50	3,0	14,8
6	50	3,0	15,0
7	50	4,4	14,9
8	60	2,0	14,8
9	60	4,0	14,7
10	64,2	3,0	15,0

O procedimento experimental foi o mesmo daquele descrito e realizado no subitem 3.3.3. A única etapa distinta foi a retirada de alíquotas na entrada e saída do secador rotoaerado para os devidos testes de qualidade das sementes de cada corrida experimental.

4.3. Análise da qualidade das sementes de soja

Antes do início de cada procedimento de secagem de cada experimento, amostras de sementes foram colhidas para a avaliação da qualidade inicial. Ao final de cada experimento também foram retiradas amostras para realizar os testes de qualidade após a secagem. Ambos os testes de fissura e o de germinação foram aplicados nas amostras antes e após a secagem. Essas avaliações foram realizadas no Laboratório de Sistemas Particulados da Universidade Federal de Uberlândia seguindo as normas regulamentadas para os mesmos.

A qualidade fisiológica das sementes de soja foi avaliada pela porcentagem de germinação e a qualidade física por meio da porcentagem de sementes sem fissuras no tegumento pelo teste de hipoclorito de sódio, ambos descritos a seguir.

4.3.1. Teste de Germinação

O procedimento utilizado neste trabalho seguiu as Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 2009), sendo assim o teste de germinação foi realizado utilizando-se 200 sementes da amostra da entrada e da saída de cada experimento. Utilizou-se o substrato rolo de papel, embebido com água deionizada. As 200 sementes foram subdivididas em 4 repetições de 50 para garantir o espaçamento ideal destas no substrato. Após a montagem dos rolos, estes foram postos em uma câmara de germinação, com temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$. As avaliações foram realizadas no quinto dia após o início do teste, determinando a porcentagem de plântulas normais, anormais, mortas e duras, conforme a descrição das RAS (BRASIL, 2009). A porcentagem de plântulas normais do teste correspondeu a porcentagem de germinação das sementes. A partir dos resultados obtidos neste teste, foi possível o cálculo da razão entre as porcentagens de germinação encontrados para as amostras coletadas antes (Ge) e após (Ga) o processo de secagem para determinar o índice de germinação (IG), definido pela Equação 4.2.

$$IG = \frac{Ga}{Ge} * 100\% \quad (4.2)$$

Onde:

- IG - razão entre as porcentagens de germinação, adimensional;
- Ge - porcentagem de germinação antes do processo, adimensional;
- Ga - porcentagem de germinação após o processo, adimensional.

4.3.2. Teste de Fissura

Para a determinação do índice de sementes sem fissuras (ISSF), foi utilizado o teste de hipoclorito de sódio, em que as sementes foram postas em recipientes e cobertas com uma solução de hipoclorito de sódio a 5%. Foram utilizadas duas repetições de 100 sementes para as amostras coletadas tanto na entrada quanto na saída do secador. Decorridos 10 minutos, a

solução foi escorrida e as sementes distribuídas sobre folhas de papel toalha para a contagem do número de sementes não intumescidas. As sementes intumescidas são aquelas que apresentam fissuras ou microfissuras no tegumento. Os resultados foram expressos em porcentagem média de sementes não intumescidas por amostra (KRZYZANOWSKI et al., 2004). A partir desta porcentagem foi possível o cálculo da razão entre as porcentagens de sementes sem fissuras que relaciona os resultados encontrados antes (Fe) e após (Fa) o processo de secagem, para a determinação do índice de sementes sem fissuras (ISSF) pela Equação 4.3.

$$ISSF = \frac{Fa}{Fe} * 100\% \quad (4.3)$$

Onde:

- ISSF - razão entre as porcentagens de sementes sem fissuras, adimensional;
- Fe - porcentagem de sementes sem fissuras antes do processo, adimensional;
- Fa - porcentagem de sementes sem fissuras após o processo, adimensional.

A Tabela 4.3 traz as características das sementes quando foram recebidas no laboratório, antes de qualquer procedimento ser realizado. Tais valores foram utilizados para avaliar a perda de qualidade pelo processo de reumidificação artificial.

Tabela 4.3 – Qualidade das sementes comerciais de soja recebidas no laboratório antes de qualquer procedimento.

<i>Germinação (%)</i>	<i>Sementes sem fissura (%)</i>	<i>M (% bu)</i>
87	98,0	9,0 ± 0,2

Após a reumidificação, os atributos de qualidade foram novamente mensurados apresentando os valores médios segundo a Tabela 4.4, em que se observa que o processo de reumidificação não provocou perda de qualidade das sementes. Esses dados foram utilizados para normatizar as análises e ponderar apenas as perdas pelo processo de secagem das sementes no secador rotoaerado, determinando os valores de Ge e Fe das Equações 4.2 e 4.3.

Tabela 4.4 – Valores médios para a qualidade inicial das sementes de soja após reumidificação.

<i>Ge (%)</i>	<i>Fe (%)</i>	<i>M (% bu)</i>
87	98,0	14,9 ± 0,3

4.4. Resultados da avaliação da qualidade das sementes

Para determinar os efeitos das variáveis do processo de secagem na qualidade das sementes, os valores finais foram divididos pelos respectivos valores da amostra retirada após a reumidificação (qualidade inicial, antes da secagem), proporcionando assim o índice de germinação e o índice de sementes sem fissura.

Com o objetivo de analisar os efeitos isolados da temperatura ($x_1=T_f$) e velocidade do ar de secagem ($x_2=v_f$), bem como a interação entre ambas as variáveis, optou-se pela metodologia estatística utilizando a técnica de superfície de resposta (BOX *et. al.*, 1978). A análise foi feita no software STATISTICA 7.0 por meio da regressão múltipla, tendo como fatores, os termos isolados, de interação e quadráticos de ambas as variáveis. Os resultados da regressão múltipla, bem como as equações empíricas para a previsão da taxa de secagem e da qualidade das sementes de soja submetidas à secagem no rotoaerado estão descritas a seguir. Equações de regressão foram ajustadas por mínimos quadrados, sendo representadas na forma matricial $\hat{y} = b_0 + x'b + x'Bx$:

Em que:

- b_0 : coeficientes lineares;
- $x'b$: termos de primeira ordem;
- b : parâmetros ligados as variáveis isoladas;
- $x'Bx$: contribuição quadrática;
- B : parâmetros ligados às variáveis quadráticas e as interações;
- x : variáveis codificadas.

Os parâmetros com nível de significância superiores a 10% foram desprezados e, respectivamente, as variáveis vinculadas a eles consideradas não relevantes. A análise da variância da regressão foi apresentada por meio do teste de F e do coeficiente de correlação R^2 .

A Tabela 4.5 apresenta os resultados experimentais médios obtidos para a umidade final das sementes (M_f), o tempo de residência (τ), a taxa de secagem (Taxa), bem como para o índice de germinação (IG) e o índice de sementes sem fissura (ISSF) para cada condição experimental. Os dados experimentais da Taxa, do IG e do ISSF foram tratados incluindo todas as variáveis de interesse. Equações de regressão foram obtidas para cada resposta.

Tabela 4.5 – Resultados para as secagens das sementes de soja no secador rotoaerado.

Exp.	$T_f (^{\circ}\text{C})$	$v_f (\text{ms}^{-1})$	$M_f (\% \text{ bu})$	$\tau (\text{min})$	Taxa (ppmin^{-1})	IG (%)	ISSF (%)
1	35,8	3,0	14,0	24,5	0,051	99,0	98,5
2	40	2,0	13,8	24,9	0,056	98,6	98,0
3	40	4,0	13,7	23,0	0,065	99,0	96,0
4	50	1,6	13,4	24,1	0,071	96,4	93,9
5	50	3,0	13,2	24,3	0,074	94,2	85,6
6	50	3,0	13,2	23,7	0,074	94,1	85,7
7	50	4,4	13,0	22,4	0,085	95,0	82,5
8	60	2,0	12,8	23,0	0,089	83,0	35,7
9	60	4,0	12,7	22,5	0,091	84,0	24,5
10	64,2	3,0	12,5	22,2	0,113	66,0	10,3

O tempo médio de residência do material dentro do secador variou de 22,2min (Exp. 10) a 24,9min (Exp. 2). Este tempo é pequeno comparado com outros tipos de secadores muito utilizados para secagem de sementes, como o leito fixo, que pode requerer tempos acima de 3 horas para a secagem (SOUZA *et. al.*, 2015). O reduzido tempo necessário para a secagem em secador rotoaerado se deve ao bom contato fluido-partícula (SILVÉRIO *et. al.*, 2015). Os métodos de secagem clássicos geralmente empregam tempos maiores para a secagem, sendo a diminuição deste parâmetro possível através da utilização de secadores não tradicionais (LISBOA *et. al.*, 2007). Tempos de residência reduzidos favorecem a preservação da qualidade das sementes, constituindo-se, portanto, de uma vantagem do secador rotoaerado na secagem de sementes.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados dos parâmetros significativos da regressão múltipla para a taxa de secagem. Para esta resposta, tanto os efeitos isolados da temperatura quanto da velocidade do ar de secagem foram significativos, sendo o efeito da temperatura mais

acentuado. Tal análise se faz condizente com os resultados obtidos pelas simulações apresentadas no Capítulo 3 deste trabalho, no subitem 3.5, em que o aumento da temperatura do ar de secagem promove uma maior remoção da umidade proporcionando uma umidade final menor do que a velocidade de entrada do ar de secagem, consequentemente uma maior taxa de secagem. Contudo, ambas as variáveis contribuem positivamente (parâmetros positivos na regressão) para o aumento dessa resposta.

Tabela 4.6 – Dados da regressão para a taxa de secagem.

<i>Termos significantes</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>p</i>
<i>Constante</i>	0,076	0,000000
$x_1 (T)$	0,018	0,00003
$x_2 (v)$	0,0038	0,086385
<i>Análise de variância:</i> Fc: 22,7; Ft(95%): 3,28; R ² : 0,9308		

Com R² de 93,08% a Equação 4.4 representa a equação empírica para previsão da taxa de secagem.

$$Taxa = 0,076 + x^{(0,018)}_{(0,0038)} \quad (4.4)$$

A taxa de secagem variou de 0,051pp min⁻¹ (Exp. 1) a 0,113pp min⁻¹ (Exp. 10). A umidade final do material após as secagens ficou entre 14,0 e 12,5% (bu). Nas condições de temperatura de entrada do ar de 64,2 °C e 60 °C; e de velocidade do ar de 3,0 e 4,0 ms⁻¹ foram observadas as maiores taxas de secagem, 0,113 (experimento 10) e 0,091pp min⁻¹(experimento 9) , consequentemente, as maiores reduções de umidade das sementes (Tabela 4.5). Essas taxas foram bem superiores as apresentadas por Souza *et. al.*, (2015), usando um leito fixo, que obteve valores de taxa de cerca de 0,021pp min⁻¹ (35°C; 1,0ms⁻¹; 45 % UR), chegando a 0,028 pp min⁻¹ (47°C; 0,7ms⁻¹; 35 % UR), considerando a camada de 0,05m mais próxima da entrada do ar.

Uma taxa de secagem de $0,030 \text{ pp min}^{-1}$, utilizando também leito fixo ($34,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $8 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$) foi obtida por Krzyzanowski *et. al.* (2006). Portanto, observa-se que as taxas de secagem obtidas com o secador rotoaerado foi bem superior aquelas obtidas na secagem em leito fixo, que é a técnica mais usada para a secagem das sementes.

A Figura 4.1 apresenta a superfície de resposta da taxa de secagem das sementes de soja em função das variáveis independentes investigadas. Observa-se nesta figura, a maior intensidade do efeito de temperatura do que da velocidade do ar.

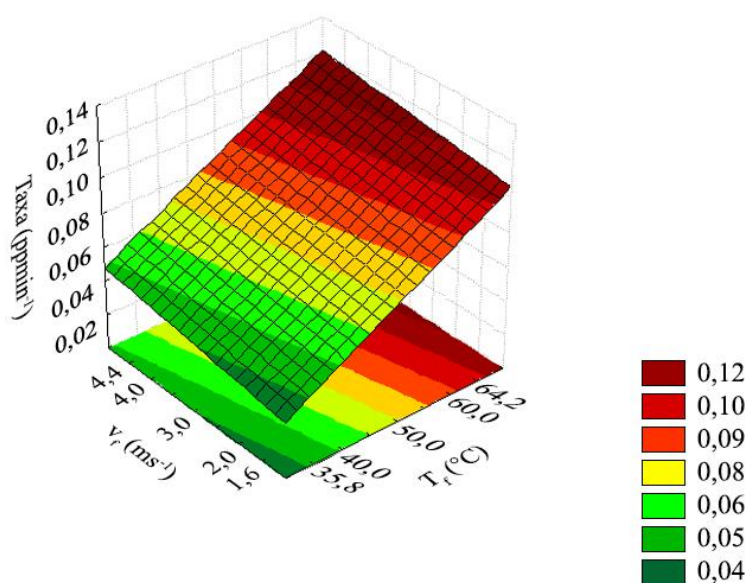


Figura 4.1 – Superfície de resposta para previsão da Taxa de secagem das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado.

A Tabela 4.7 traz os dados da regressão múltipla para o índice de sementes sem fissura, demonstrando os parâmetros significantes. O ISSF mostrou ser a resposta de qualidade mais afetada pelas condições de secagem alcançando valores acima de 90%, mas também índices muito baixos, inferiores a 50% (Tabela 4.5).

Tabela 4.7 – Dados da regressão para o ISSF das sementes de soja.

<i>Termos significantes</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>p</i>
<i>Constante</i>	84,9	0,000000
$x_1 (T)$	-32,3	0,000002
$x_2 (v)$	-3,1	0,083914
$x_1 * x_1 (T*T)$	-17,3	0,000181
<i>Análise de variância:</i> Fc: 16,2; Ft(95%): 3,78; R ² : 0,9854		

A Equação 4.5 apresenta a equação empírica para a previsão do ISSF das sementes de soja em função das variáveis independentes utilizadas, com R² de 98,54%.

$$ISSF = 84,9 + x' \begin{pmatrix} -32,3 \\ -3,1 \end{pmatrix} + x' \begin{pmatrix} -17,3 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} x \quad (4.5)$$

A influência das variáveis estudadas no ISSF pode ser visualizada na superfície de resposta apresentada na Figura 4.2. Observa-se que tanto a temperatura quanto a velocidade do ar de secagem causaram efeitos lineares negativos (Equação 4.5), sendo o efeito da temperatura bem mais acentuado. Os maiores valores de ISSF são obtidos nas menores temperatura do ar de secagem. Para a obtenção de índices acima de 90% é necessário utilizar temperaturas entre 35,8 a 50°C, desde que utilizadas baixas velocidades do ar de secagem, 1,6 ms⁻¹, para a temperatura de 50°C. Barrozo, *et. al.* (2006) operando com leito deslizante contracorrente e escoamento cruzado e Souza (2013) com leito fixo obtiveram valores de ISSF para sementes de soja também superiores a 90% nas faixas de temperatura entre 30 e 50°C, com baixas velocidades do ar de secagem (0,75 a 1,5ms⁻¹). Pfeifer *et. al.* (2010) utilizando múltiplos estágios num secador de leito deslizante de fluxo concorrente também alcançaram valores de ISSF superiores a 90%. Ao aumentar a quantidade de estágios, o range da temperatura também aumenta chegando a 48°C para velocidades do ar de 2,0 a 4,0ms⁻¹.

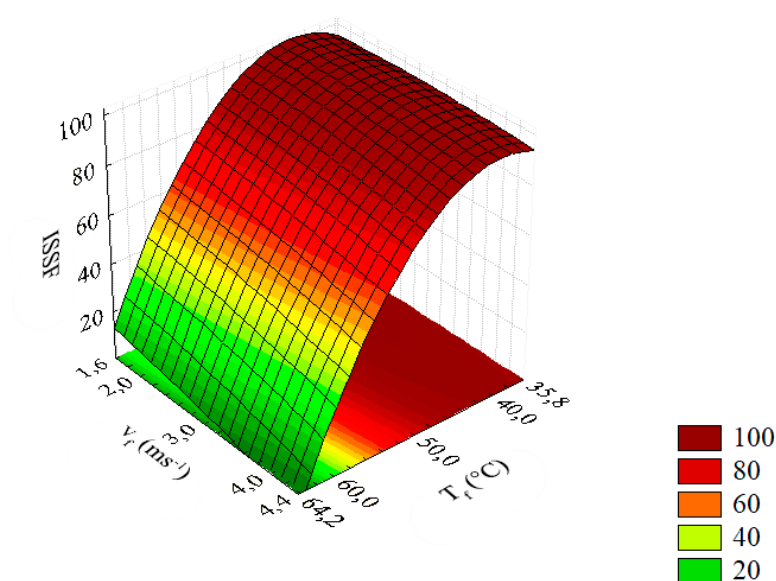


Figura 4.2 – Superfície de resposta para previsão do ISSF das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado.

Para o IG, observa-se valores elevados, superiores a 99% (Exp. 1 e 3), que foram obtidos em experimentos realizados nas temperaturas mais baixas, mas também próximos a 65% (Exp. 10), que foi obtido no experimento realizado na temperatura mais elevada (Tabela 4.5). A Tabela 4.8 apresenta os resultados da regressão para o IG das sementes de soja submetidas a secagem no secador rotoaerado, com os parâmetros significativos.

Tabela 4.8 – Dados da regressão para o IG das sementes de soja.

<i>Termos significantes</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>p</i>
<i>Constante</i>	95,6	0,000000
$x_1 (T)$	-9,7	0,000002
$x_1 * x_1 (T * T)$	-5,9	0,0012
<i>Análise de variância: Fc: 10,8; Ft(95%): 3,59; R²: 0,9508</i>		

A Equação 4.6 representa a equação empírica para a previsão do IG das sementes de soja utilizando-se o secador rotoaerado, com R² de 95,08%.

$$IG = 95,6 + x' \begin{pmatrix} -9,7 \\ 0 \end{pmatrix} + x' \begin{pmatrix} -5,9 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} x \quad (4.6)$$

No índice de germinação se observa a influência negativa da temperatura e que a velocidade do ar não foi significativa. Desta forma, temperaturas até 60°C favorecem a manutenção do índice acima de 80, porém é evidente a queda na germinação quando a temperatura varia de 40 para 50°C, cerca de 5pp, e de 50 para 60°C, cerca de 10pp. A superfície de resposta da Figura 4.3 apresenta o comportamento do efeito das variáveis investigadas em relação ao IG, em que pode ser visualizado o importante efeito da temperatura e a não significância do efeito da velocidade.

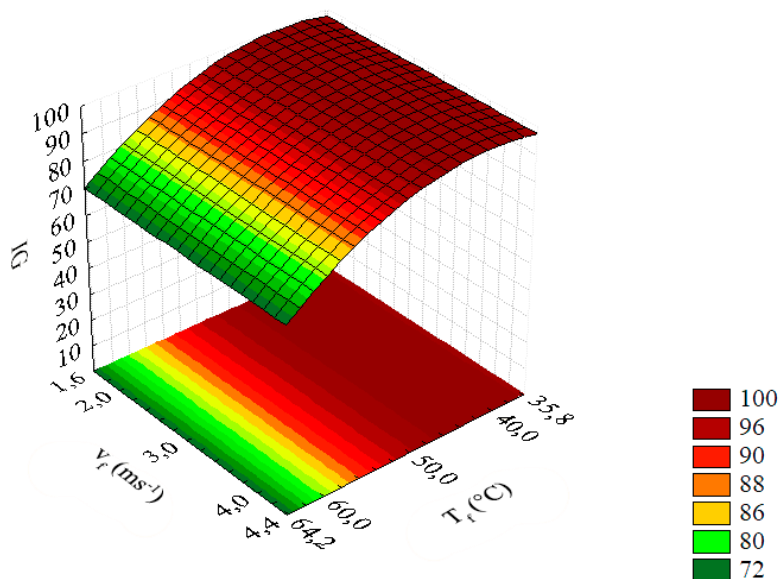


Figura 4.3 – Superfície de resposta para previsão do IG das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado.

Tratando-se do índice de germinação de sementes de soja, Barrozo, *et. al.* (2006) e Souza (2013), usando secadores de leito deslizante e leito fixo, respectivamente, também alcançaram valores superiores a 90% na mesma faixa de temperatura, em torno de 40°C.

Barrozo et. al. (2005), operando com secador de leito deslizante com fluxo paralelo também obtiveram os melhores valores para IG em faixas de temperatura e velocidade do ar de secagem de 35 a 44°C e 0,7 a 1,6ms⁻¹, respectivamente.

Barrozo (1995) constatou que além da temperatura do fluido e da velocidade intersticial do ar, a vazão de sólidos e a umidade inicial das sementes também influenciaram de alguma forma a germinação das sementes de soja quando secas em leito deslizantes e escoamento cruzados. Esta diferença pode ser justificada pelas diferenças das configurações dos secadores. Boyd (1974), estudando secagem de sementes de soja em silo estacionário de fundo falso perfurado também relata que temperatura de 54,4°C e umidade relativa inferior a 40% no ar de secagem promovem a redução na germinação. Já a elevada temperatura, segundo Popinigis (1985) e Lacerda *et. al.* (2003) pode não causar um grande efeito imediato nas sementes em termos de germinação, pois, seu efeito latente pode se manifestar após certo período de armazenamento influenciando no vigor das sementes que reduz drasticamente.

De qualquer maneira, tanto para danos mecânicos imediatos, que geralmente são visíveis, quanto para os latentes, danos mais internos de difícil visualização, o desempenho das sementes de soja é diretamente afetado, tornando a semente incapaz de germinar ou diminuindo seu potencial de armazenamento (SOUZA, 2013).

Os resultados obtidos são importantes para adequação do processo de secagem no secador rotoaerado com o objetivo de se operar adequadamente este equipamento visando a obtenção de sementes de soja com qualidade superior para comercialização. Foi possível operar este novo secador com um desempenho promissor de secagem, mantendo os altos níveis de qualidade das sementes.

CÁPITULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Com base nos resultados apresentados no Capítulo 3, pode-se concluir que por meio dos balanços de massa e energia realizados sobre elementos infinitesimais de volume do secador, o modelo a duas fases para descrever as distribuições de umidade e temperatura do ar e do sólido ao longo do comprimento do secador rotoaerado apresenta boa previsão para a secagem de sementes de soja no secador rotoaerado. A divisão do modelo de secagem em modelo do equipamento e modelo do material mostrou-se apropriada para o estudo de secagem de semente de soja para o secador rotoaerado. Essa metodologia aborda de maneira completa as características do material e a transferência de calor e massa, contemplada pelas características operacionais e de projeto do secador.

Os valores de desvios médios dos resultados simulados em relação aos experimentais observados foram, em valores absolutos, de $1,08 \pm 1,17\%$ para a umidade final da semente, $5,7 \pm 1,8\%$ para a temperatura do sólido e $10,9 \pm 4,4\%$ para a temperatura do ar de secagem.

Já, os resultados do Capítulo 4, relativo ao efeito das variáveis do processo na qualidade das sementes, por meio dos índices de germinação e sementes sem fissura pode-se concluir que, de um modo geral, o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem influenciam negativamente a qualidade. Em relação a taxa de secagem, a mesma é favorecida com o aumento destas duas variáveis. Desta forma, um ponto de equilíbrio foi encontrado para maximizar a taxa de secagem e reduzir os danos provenientes do processo de secagem que prejudicam a qualidade das sementes. O tempo médio de residência (22,2 a 24,9min) pode ser considerado baixo quando comparado a outros secadores, como o leito fixo que possui tempos superiores a 3h, mesmo considerando o tempo total de operação do secador rotoaerado para o experimento (aproximadamente 2h e 30min). O que contribui para alcançar melhores índices de qualidade, já que as sementes ficam menos tempo expostas às condições de secagem.

Assim, para índices de germinação e de sementes sem fissura superiores a 90% e excelentes taxas ($0,051$ a $0,071$ pp min⁻¹) a temperatura do ar de secagem pode chegar a 50°C, sendo que até 40°C para qualquer velocidade do ar ($1,6$ a $4,4$ m s⁻¹), e para 50 °C a velocidade do ar de entrada deve ser a menor possível ($1,6$ ms⁻¹). As equações empíricas propostas

permitiram quantificar os efeitos das variáveis de secagem no secador rotoaerado na taxa de secagem e na qualidade física e fisiológica das sementes com ótimos ajustes.

Quando comparado a condições similares em outros secadores, pode-se concluir que o secador rotoaerado é uma boa alternativa para a secagem de sementes de soja, pois obtém-se uma taxa de secagem maior e um tempo médio de residência inferior (que favorece a qualidade das sementes) aos secadores tradicionalmente usados para a secagem de sementes, assegurando também alta qualidade das sementes.

5.2. Sugestão de trabalhos futuros

Por se tratar de um novo equipamento, diversos estudos podem e precisam ser feitos. No caso de secagem de sementes de soja no secador rotoaerado algumas possibilidades podem ser listas:

- Variar os parâmetros: inclinação e rotação do tambor, vazão de alimentação de sólidos e umidade relativa do ar de secagem para otimizar a operação do secador rotoaerado para soja;
- Trabalhar com diferentes configurações de mini tubos como Silvério (2012) realizou para fertilizantes e descobrir a configuração ótima para secagem de sementes de soja;
- Acoplar sistemas e métodos de pré-secagem como utilização de etanol, infravermelho, ultravioleta ou até mesmo plasma;
- Realizar uma modelagem em fluidodinâmica computacional (CFD) para compreender melhor os fenômenos envolvidos e poder otimizar o secador para sementes de soja;
- Realizar uma análise comparativa de consumo energético com outros tipos de secadores.

CÁPITULO 6 - REFERÊNCIAS

AGUIRRE, R.; PESKE, S. T. **Manual para el beneficio de semillas**. 2 ed. Cáli, Colômbia. CIAT. 1992, 248p.

ARNOSTI JUNIOR, S. **Análise da Influência da Velocidade e Temperatura do Fluido a Secagem de Sementes em Leito Deslizante e Escoamentos Cruzados**. 1993. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1993.

ARRUDA, E. B. **Comparação do desempenho do secador roto-fluidizado com o secador rotatório convencional: secagem de fertilizantes**. 2008. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

ARRUDA, E. B.; FAÇANHA, J. M. F.; PIRES, L. N.; ASSIS, A. J.; BARROZO, M. A. S. Conventional and modified rotary dryer: Comparison of performance in fertilizer drying. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. n. 48, p. 1414-1418. 2009a. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.07.007>

ARRUDA, E. B.; LOBATO, F. S.; ASSIS, A. J.; BARROZO, M. A. S. Modeling of Fertilizer Drying in Roto-Aerated and Conventional Rotary Dryers. **Drying Technology**. n. 27, p. 1192-1198. 2009b. <https://doi.org/10.1080/07373930903263129>

BARROZO, M. A. S. **Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados**. 1995. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.

BARROZO, M. A. S.; FELIPE, C. A. S.; LACERDA, A. F.; LISBOA, M. H. Analysis of soybean seed quality related to drying in parallel flow sliding bed. **Seed Science & Technology**, n. 33, p. 675-685, 2005. <https://doi.org/10.15258/sst.2005.33.3.15>

BARROZO, M. A.; FELIPE, C. A. S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. Quality of Soybean Seeds Undergoing Moving Bed Drying: Countercurrent and Crosscurrent Flows. **Drying Technology: An International Journal**, n. 24, p. 415-422, 2006. <https://doi.org/10.1080/07373930600611638>

BAUDET, L. M. L.; VILLELA, F. A.; CAVARIANI, C. Princípios de secagem. **Seed News**, Pelotas, n. 10, p. 20-27, 1999.

BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. **A soja no Brasil: História e Estatística**. Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 1987. 61p.

BOX, M. J.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building**. John Wiley & Sons, New York, 1978.

BOYD, A. F. **Heated air drying of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) seed**. Mississippi: Mississippi State University, 1974. 90p. Ph.D. Thesis.

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

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, O. W. **Drying Cereal Grains**, 2nd Ed. The AVI Publishing Company Inc. Westport, CT, 1974.

BRUIN, S.; LUYBEN, K. C. A. M. Drying of food materials: A review of recent developments. In: **Advances in Drying**. Ed. Arum S. Mujumdar. Hemisphere Publishing Corporation, Washington. v.1. p. 155-215. 1980.

DANIELL, J. W.; CHAPPELL, W. E.; COUCH, H. B. Effect of sublethal and lethal temperature on plant cells. **Plant Physiology**. v. 44, p. 1684-1689, 1969.
<https://doi.org/10.1104/pp.44.12.1684>

DELOUCHE, J. C. **Germinação, deterioração e vigor de semente**. Pelotas, RS, v. 6, n. 6, nov/dez 2002. Disponível em: <<https://seednews.com.br/artigos/2018-germinacao-deterioracao-e-vigor-da-semente-edicao-novembro-2002>>. Acesso em: 26 de jan. 2020.

DOUGLAS, P. L.; KWADE, A.; LEE, P. L.; MALLICK, S. K.; WHALEY, M. G. Simulation of rotary dryer for sugar crystalline, **Drying Technology**, v. 11, p. 129-155, 1993.
<https://doi.org/10.1080/07373939308916806>

ESDRAS, J. G. M. **Efeito da Secagem Sobre Sementes de Soja em Leito Deslizante e Escoamentos Cruzados**. 1993. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1993.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Inovação, tecnologia, Resultados**. Londrina: Embrapa Soja, Folder n. 5, 2018, 20 p.

_____. **História da Soja.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/historia>>. Acesso em: 12 de jul. 2019.

_____. **Soja em números (safra 2019/20).** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 05 de nov. 2020.

FLAUZINO, R. S. **Influência do Teor de Umidade do Sólido na Secagem de Sementes em Leito Deslizante e Escoamentos Cruzados.** 1993. 61 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1993.

FRANÇA NETO, J. B. Qualidade fisiológica de sementes de soja. In: FRANÇA NETO, J. B.; HENNING, A. A. **Qualidades fisiológica e sanitária de sementes de soja.** Londrina: Embrapa-CNPSo, 1984. p. 1-24. (Embrapa-CNPSo. Circular técnica, 9).

FRANÇA-NETO, F. C.; KRZYZANOWSKI, F.C.; PÁDUA, G. P.; HENNING, A. A. **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade.** – Série sementes. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 8 p. (Embrapa Soja: Circular Técnica, 40).

FRANÇA-NETO, F. C.; KRZYZANOWSKI, F.C.; HENNING, A. A.; PÁDUA, G. P.; LORINI, I.; HENNING, F. A. **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade.** Londrina: Embrapa Soja, 2016. 82 p. (Embrapa Soja: Documentos, 380).

FRIEDMAN, S. J.; MARSHAL, W. R. Studies in rotary drying. Part II: Heat and mass transfer. **Chemical Engineering Progress.** v. 45, n. 9, p. 573-588, 1949.

GARCIA, D.C.; BARROS, A.C.S.A.; PESKE, S.T.; MENEZES, N.L. A secagem de sementes. **Ciência Rural,** v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000200045>

GOMES, F. P.; GOMES, R. P. **A soja.** Nobel, São Paulo, 5ª ed., 1990, 152 p.

GUIMARÃES, D. S. **Desenvolvimento de modulo computacional para a secagem estacionária de sementes.** 2005. 155 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2005.

HERTER, U.; BURRIS, J. S. Changes in moisture, temperature, and quality of soybeans seed during high-temperature drying. **Canadian Journal of Plant Science.** v. 69, n. 3, p. 749-761, 1989a. <https://doi.org/10.4141/cjps89-091>

_____. Effect of drying rate and temperature on drying injury of corn seed. **Canadian Journal of Plant Science**. v. 69, n. 3, p. 763-774, 1989b. <https://doi.org/10.4141/cjps89-092>

IGUAZ, A.; ESNOZ, A.; MARTINEZ, G.; LÓPEZ, A.; VÍRSEDA, P. Mathematical Modelling and Simulation for the Drying Process of Vegetable Wholesale by-products in a Rotary Dryer. **Journal of Food Engineering**. v. 59, p. 151-160, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00451-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00451-X)

KEMP, I. C.; OAKLEY, D. E. Simulation and scale-up of pneumatic conveying and cascading rotary dryers. **Drying Technology**. v. 15, p. 1699-1710, 1997. <https://doi.org/10.1080/07373939708917319>

KRZYŻANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B.; COSTA, N. P. **Teste do Hipoclorito de Sódio para Semente de Soja**. Circular Técnica n. 37, Londrina: Embrapa Soja, 2004. 4 p. (Embrapa Soja: Circular Técnica, 37).

KRZYŻANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B.; HENNING, A. A. **A alta qualidade da semente de soja: fator importante para a produção da cultura**. Circular Técnica n. 136, Londrina: Embrapa Soja, 2018. 24 p. (Embrapa Soja: Circular Técnica, 136).

KRZYŻANOWSKI, F. C.; WEST, S. H.; FRANÇA-NETO, J. B. Drying soybean seed using air ambient temperature at low relative humidity. **Revista Brasileira de Sementes**. V. 28, n.2, p. 77-83, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222006000200010>

LACERDA, A. L. S.; LAZARINI, E.; SÁ, M. E.; FILHO, W. V. V. Armazenamento de sementes de soja dessecadas e avaliação da qualidade fisiológica, bioquímica e sanitária. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 25, n. 2, p. 97-105, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222003000400014>

LISBOA, M. H. **Estudo de Secadores Rotatórios na Secagem de Fertilizantes**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) 43 p- Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

LISBOA, M. H.; VITORINO, D. S.; DELAIBA, W. B.; FINZER, J. R. D.; BARROZO, M. A. S. A study of particle motion in Rotary dryer. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 24, p. 365, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322007000300006>

LÓPEZ, A.; PIQUÉ, M. T.; ROMERO, A. Simulation of deep bed drying of hazelnuts. **Drying Technology**, 16 (3-5), p. 651-665, 1998. <https://doi.org/10.1080/07373939808917428>

MATCHETT, A. J.; BAKER, C. G. J. Particle residence times in Cascading rotary dryers. Part 2: Application of the two-steam model to experimental and industrial data. **Journal of Separation Process Technology**. v. 9, 1988.

MAYTA, S. M.; MASSARANI, G.; PINTO, J. C. Modeling of Grain Drying in Continuous Cross-Flow Sliding Bed Dryers. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 74, p. 797-805, out 1996. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450740532>

MENEGHELLO, G. E. Qualidade de sementes: Umidade e Temperatura. **Seed News** [online]. v. 18, 06 nov. 2014. Disponível em: <<https://seednews.com.br/edicoes/43-qualidade-de-sementes:-umidade-e-temperatura-xviii-%7C-06-novembro-2014>> Acesso em: 26 set. 2019.

MILLER, C. O.; SMITH, B. A.; SCHUETTE, W. H. Factor Influencing the operation of Rotary Dryers. **Trans AIChE**. v. 38, p. 841. 1942.

MOYERS, C. G.; BALDWIN, G. W. Psychrometry, Evaporative Cooling and Solids Drying. In: PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. Nova York, Estados Unidos, Ed. Mac Graw-Hill, 7th edition, 1999, CD-ROM, p. 12-1: 12-90.

MYSKLESTAD, O. Heat and Massa transfer in rotary dryers. **Chemical Engineering Progress**. v. 13, p. 129-137, 1963.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. L. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas: CT&EA, 2007.

PARRY, J. L. Mathematical Modeling and computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Agricultural Grain Drying: A review. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 33, p. 1-29, 1985. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90116-7](https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90116-7)

PEREIRA, F. S.; PEREIRA, L. S.; CONTINI, R. E.; STEMPKOWSKI, L. A.; ZANELLA, E. J.; SANTOS, K. C. Testes fisiológicos de diferentes lotes de sementes de soja. **Congrega Urcamp**. v. 15, n. 15, p. 1520-1529, 2018.

PERES, W. B. Secagem de Sementes. **Seed News** [online]. v. 20, 06 nov. 2016. Disponível em: <<https://seednews.com.br/edicoes/artigo/816-secagem-de-sementes:-edicao-novembro-2016>> Acesso em: 26 set. 2019.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineer's Handbook**. Mac Graw-Hill, 7th CD-ROM, Nova York, Estados Unidos, 1999.

PESKE, S. T.; PERES, W. B. Secagem de Sementes. **Seed News** [online]. v. 23, 03 mai. 2019. Disponível em: < <https://seednews.com.br/edicoes/artigo/2972-secagem-de-sementes-edicao-maio-2019>> Acesso em: 26 set. 2019.

PFEIFER, A. A., MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. Modelling of soybean seed drying in concurrent sliding bed dryers: Effect of number of stages on seed quality and drying performance. **Biosystems Engineering**. n. 107, p. 341-348, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.09.008>

POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. Brasília, 2ª ed. 1985. 289p.

REAY, D. A scientific approach to the desing of continuous flow dryers for particulate solids. **Multiphase Science & Technology**, Hewitt, G. F.; Dlhaye, J. M.; Zuber, N. Eds.: Hemisphere Pub. Corp.: ISBN 0891166491, v. 4, p. 1-102, 1989. <https://doi.org/10.1615/MultScienTechn.v4.i1-4.10>

ROBERTS, E. H. Physiology of ageing and its application to drying and storage. **Seed Science and Technology**, v. 9, p. 359-372, 1981.

SAEMAN, W. C.; MITCHELL, T. R. Jr. Analysis of Rotary Dryer and Cooler performance. **Chemical Engineering Progress**. v. 50, p. 467-475, 1954.

SARTORI, D. J. M. **Transferência de calor em leito deslizante**. 1986. 95p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia / Programa de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1986.

SCHEIBER, E. **Influência da Umidade Relativa do Ar na Secagem de Sementes em Leito Deslizante e Escoamentos Cruzados**. 1991. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1991.

SHAMPINE, L.F.; REICHEL, M. W.; KIERZENKA, J. **Solving Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations in MATLAB with bvp4c**. MATLAB File Exchange, 2004.

SILVA, P. B. **Secagem de resíduos de frutas em secador roto-aerado**. 2014. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

SILVA, P. B. **Secagem híbrida do resíduo de acerola em secador roto-aerado com infravermelho e extração de compostos bioativos**. 2018. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SILVA, P. B.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Dehydration of acerola (*Malpighia emarginata* D. C.) residue in a new designed rotary dryer: Effect of process variables on main bioactive compounds. **Food and Bioproducts Processing**. v. 98, p. 62-70, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.12.008>

_____. A novel system for drying of agro-industrial acerola (*Malpighia emarginata* D. C.) waste for use as bioactive compound source. **Innovative Food Science and Emerging Technologies Processing**. v. 52, p. 350-357, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.01.018>

SILVÉRIO, B. C. **Estudos fluidodinâmicos e de secagem de fertilizantes em diferentes tipos de secadores rotatórios**. 2012. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SILVÉRIO, B. C.; FAÇANHA, J. M. F.; ARRUDA, E. B.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. Fluid Dynamics in Concurrent Rotary Dryers and Comparison of their Performance with a Modified Dryer. **Chemical Engineering & Technology**. v. 34, p. 81-86. 2011. <https://doi.org/10.1002/ceat.201000338>

SILVÉRIO, B. C.; ARRUDA, E. B.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. A novel rotary dryer for drying fertilizer: Comparison of performance with conventional configurations. **Powder Technology**. v. 270, p. 135-140. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.10.030>

SOUZA, G. F. M. V. **Secagem de sementes de soja em leito fixo: equilíbrio e cinética da sílica gel para controle de umidade, modelagem do processo e análise da qualidade das sementes**. 2013. 157 p., Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SOUZA, G. F. M. V.; MIRANDA, R. F.; LOBATO, F. S.; BARROZO, M. A. S. Simultaneous heat and mass transfer in a fixed bed dryer. **Applied Thermal Engineering**. v. 90, p. 38-44. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.088>

TÓRREZ, N.; GUSTAFSSON, M.; SCHREIL, A.; MARTÍNEZ, J. Modeling and Simulation of crossflow moving bed grain dryers. **Drying Technology: An International Journal**. v. 16, n. 9, p. 1999-2015. 1998. <https://doi.org/10.1080/07373939808917508>

APÊNDICE A

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS DA MODELAGEM DA
TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE MASSA E ENERGIA NO SECADOR
ROTOAERADO PARA SEMENTES DE SOJA

Tabela A.1 – Comparação dos valores experimentais e simulados de todos os experimentos para umidade final do material, temperatura do sólido e temperatura do ar.

<i>Experimento</i>	$v_f (ms^{-1})$	$T_f (°C)$	$T_f (°C)$	$M_f (bu)$	$M_f (bu)$	$T_s (°C)$	$T_s (°C)$
		<i>Exp.</i>	<i>Sim.</i>	<i>Exp.</i>	<i>Sim.</i>	<i>Exp.</i>	<i>Sim.</i>
1	0,9	30	29,7	14,3	14,3	31,1	29,0
2	0,9	35	32,1	14,2	14,2	31,9	29,8
3	0,9	40	36,6	14,1	14,1	32,8	33,1
4	1,5	45	38,4	14,0	13,9	35,2	32,7
5	1,1	48	39,7	13,5	13,3	37,5	35,0
6	1,9	48	42,2	13,1	13,2	38,0	36,1
7	0,9	55	44,5	13,5	13,3	36,2	39,9
8	1,5	55	47,0	13,1	13,0	41,7	40,0
9	1,5	55	47,1	13,2	13,1	41,8	40,1
10	2,1	55	48,0	13,0	13,0	42,0	40,2
11	1,1	62	58,9	13,1	12,8	42,2	44,2
12	1,9	62	59,0	12,9	12,9	42,5	46,4
13	1,5	65	59,2	12,6	12,7	44,5	47,2

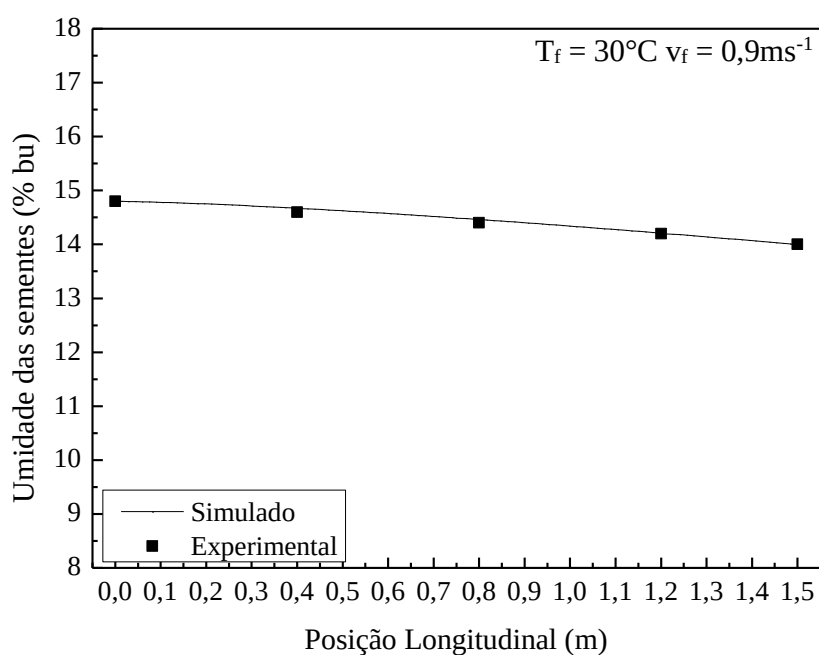


Figura A.1 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 1.

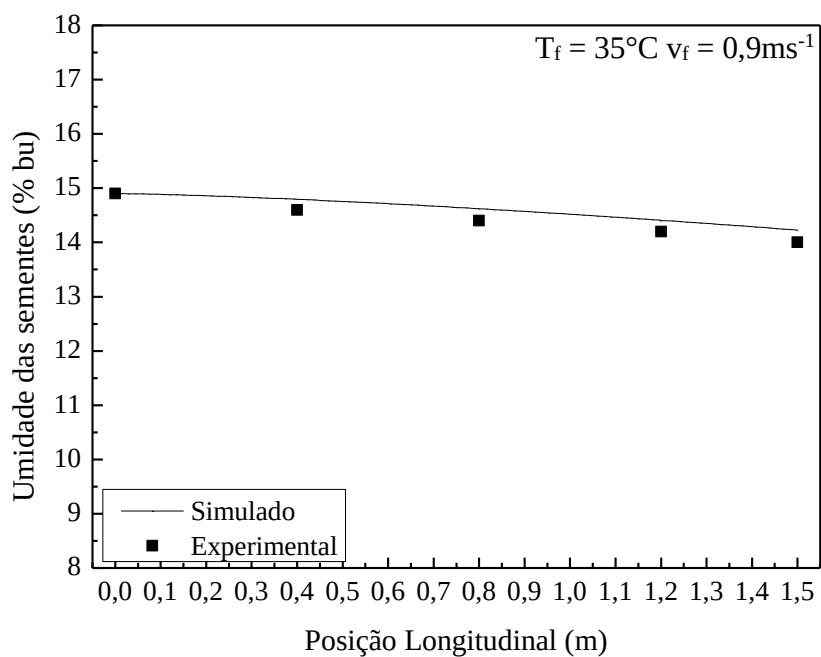


Figura A.2 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 2.

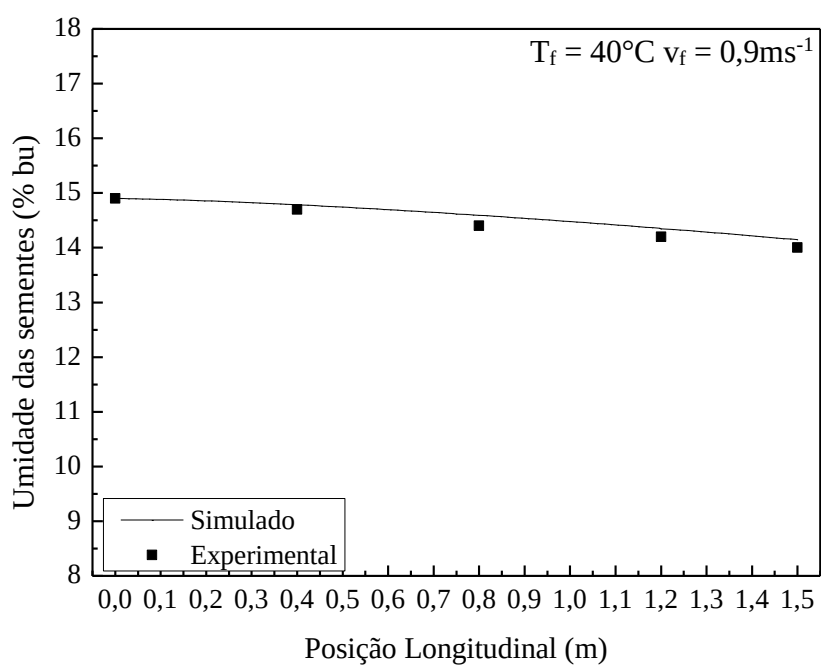


Figura A.3 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 3.

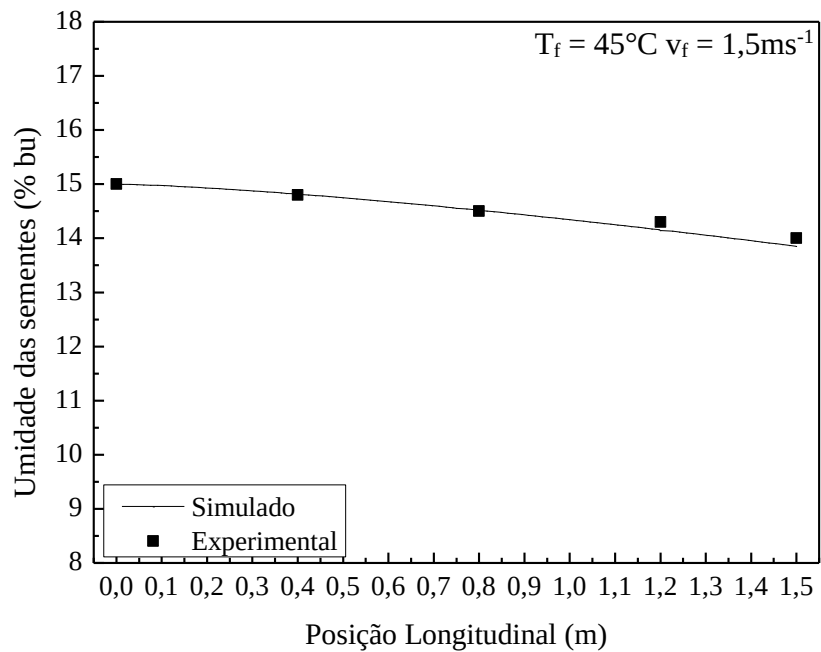


Figura A.4 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 4.

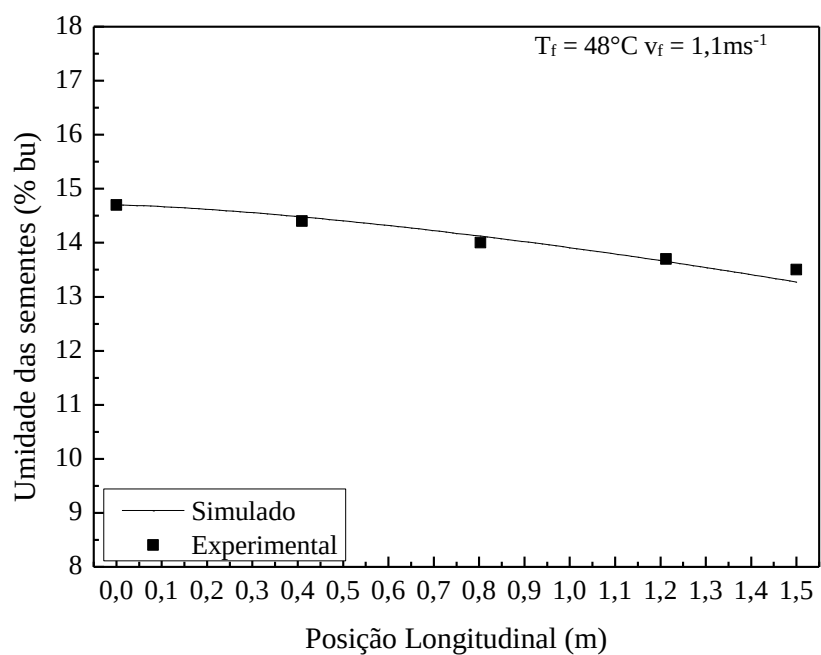


Figura A.5 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 5.

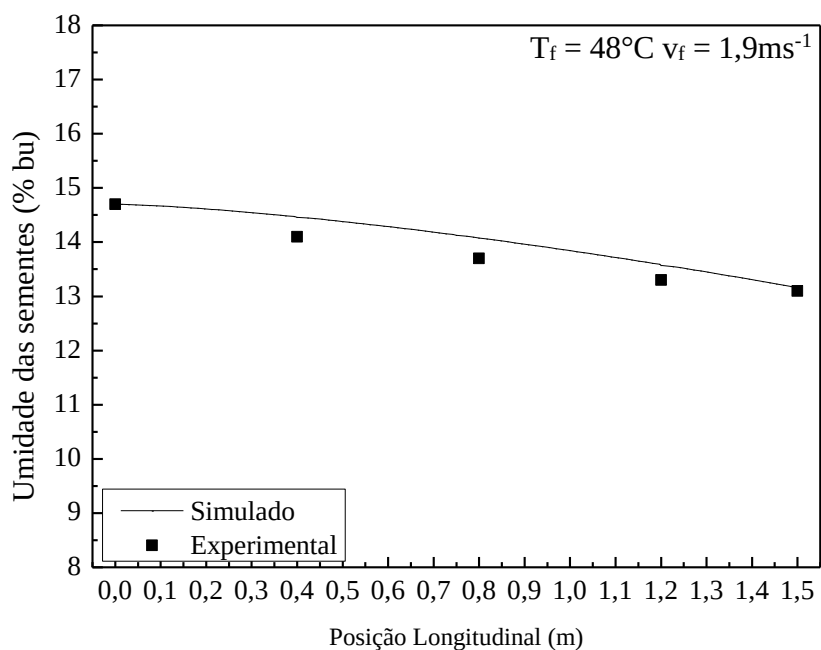


Figura A.6 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 6.

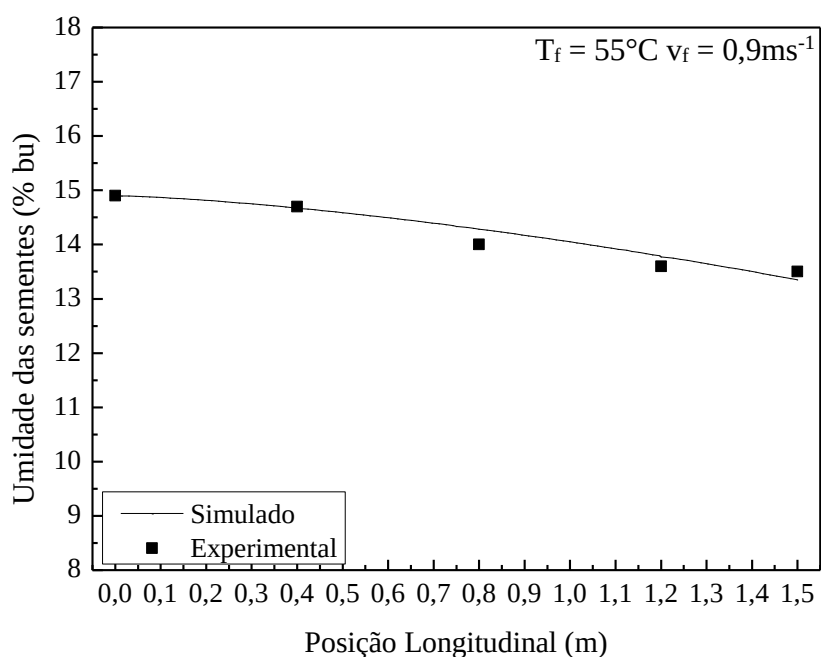


Figura A.7 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 7.

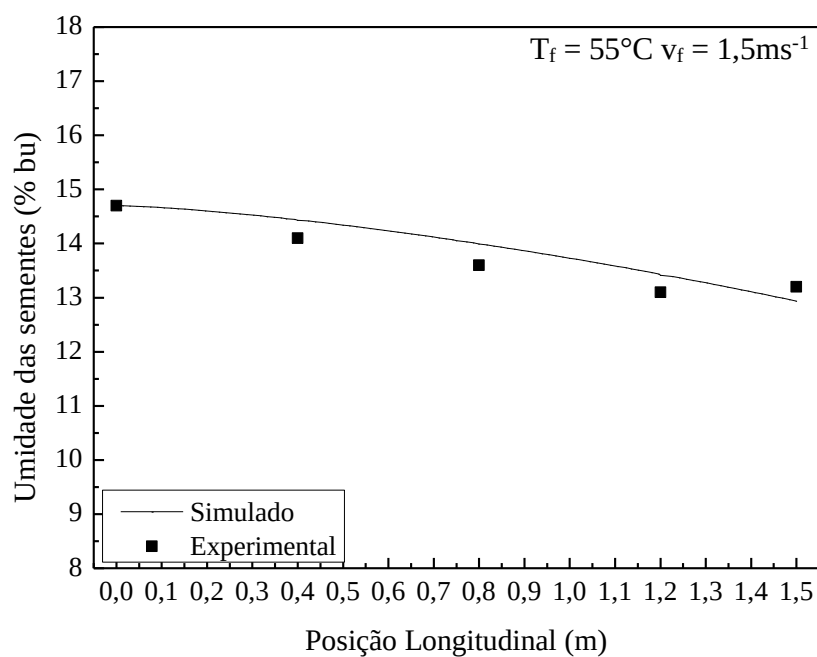


Figura A.8 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 8.

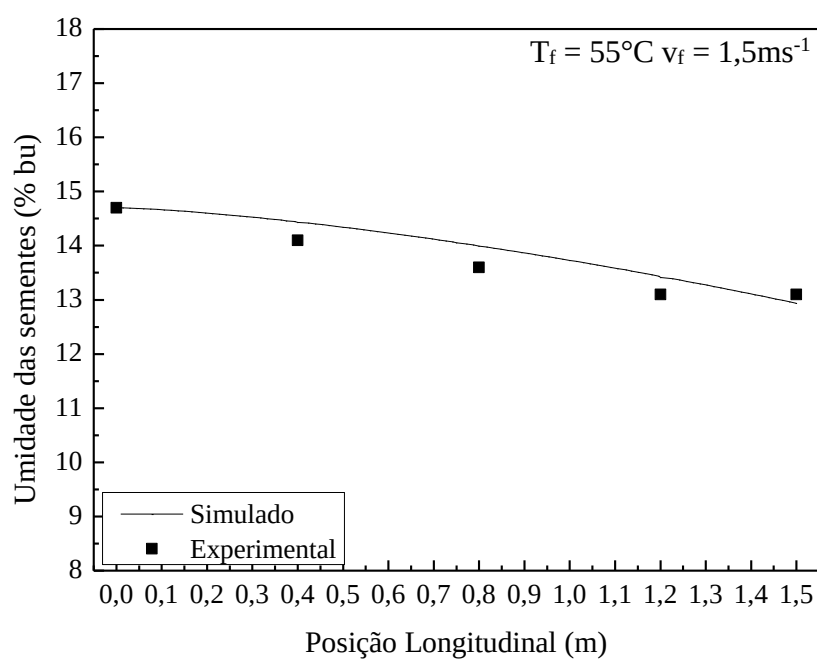


Figura A.9 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 9.

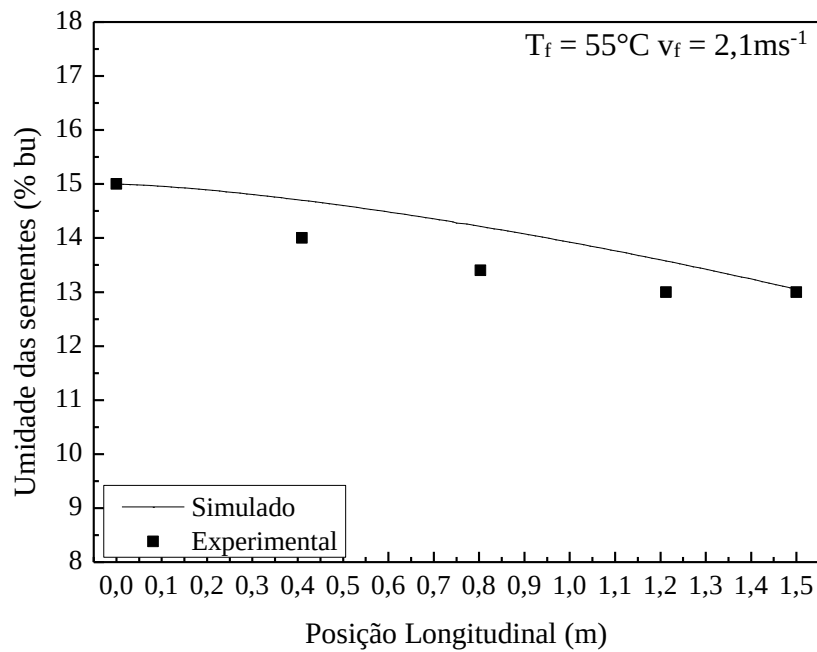


Figura A.10 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 10.

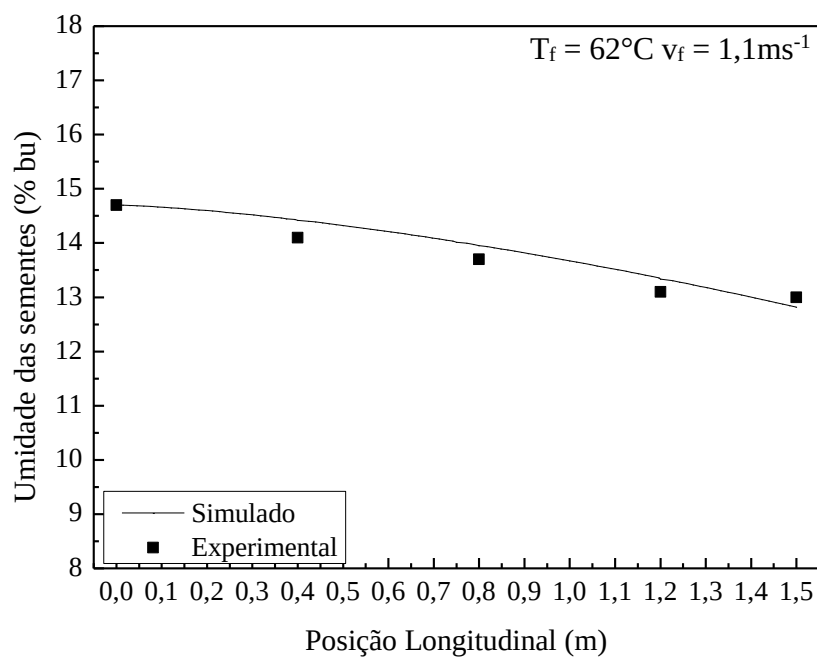


Figura A.11 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 11.

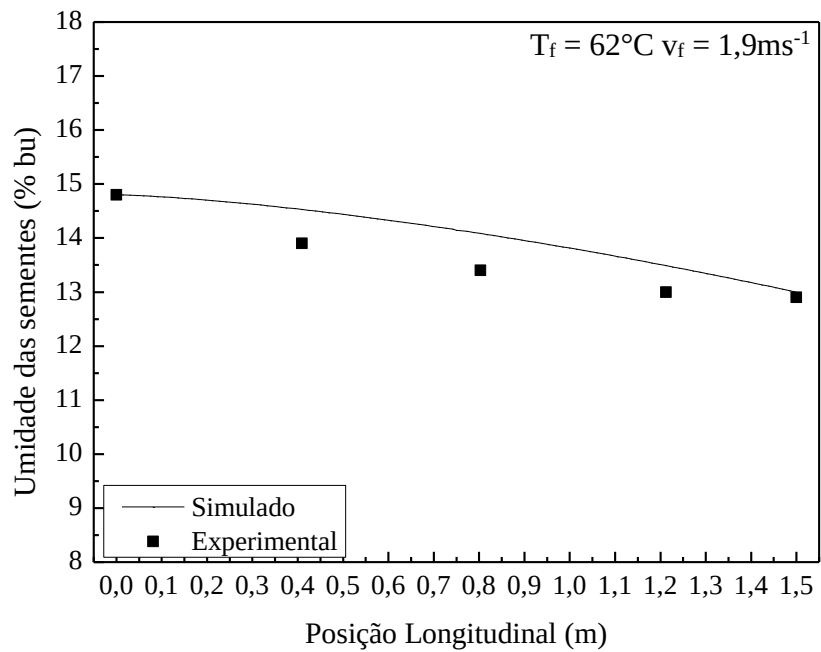


Figura A.12 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 12.

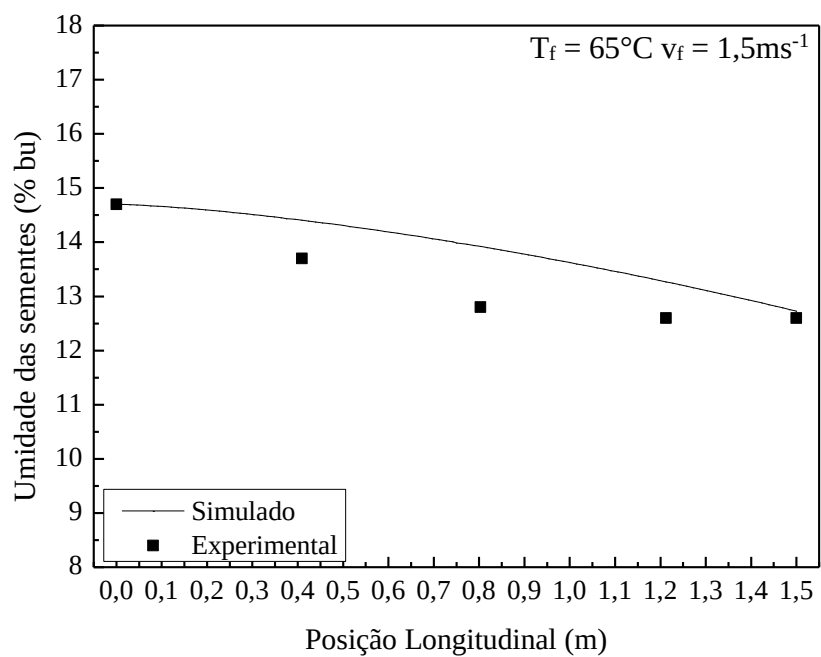


Figura A.13 – Perfis experimental e simulado para a umidade das sementes de soja submetidas a secagem em secador rotoaerado para o Exp. 13.

APÊNDICE B

PROPRIEDADES FÍSICAS DO MATERIAL E DO AR DE SECAGEM

Valores para as principais propriedades físicas da semente de soja e do ar de secagem usadas na solução numérica do modelo apresentado no Capítulo 3.

$$Cp_s = 1,046 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$$

$$Cp_f = 1 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$$

$$Cp_l = 4,187 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$$

$$Cp_v = 1,1715 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$$

$$MM_{ar} = 28,9 \frac{g}{mol}$$

$$\mu_{ar} = 0,185 * 10^{-5} kg/ms$$

$$k_f = 2,66 * 10^{-5} \frac{kW}{m^{\circ}C}$$

$$R = 8,2 * 10^{-5} \frac{atm m^3}{mol K}$$

$$P = 0,91 atm$$

APÊNDICE C

PROGRAMA EM MATLAB

A seguir o programa em Matlab desenvolvido para esse presente trabalho. Este foi modificado para se adequar a cada caso em estudo.

```
function modelo

clc
close all
clear all
format long

% entrada para Uva que será usada pelo programa: x=[k m n Up]

xup=[0.227 0.879];

%=====
% Condições de Entrada
%=====
%
MMar=28.9; % massa molecular do gás [g/gmol]
R=8.2e-5; % cte dos gases ideais [atm.m3/mol.K]
P=0.91; % atm

% Características de Projeto do Secador

r=0.15; % Raio do tambor [m]
L=1.50; % Comprimento efetivo do tambor [m]
A=pi*r^2; % Área da seção transversal do secador [m2]
V=L*A; % Volume do secador [m3]
D=2*r;
Tamb=30;

% Características Operacionais:

n=1;
TR=22.7*60; % Tempo de residência [s]
tr=TR/n; % tempo de residência em cada volume de controle [s]
NR=1.5; % Rotação do tambor [rpm]

% Condições de Entrada do Ar:

Tfo=48; % Temperatura de entrada
do gás [oC]
Wo=0.03; % Umidade absoluta de
entrada do gás [kgvp/kgarseco]
UR=0.40; % Umidade relativa do
gás [-]
var=1.1; % Velocidade do gás
[m/s]
Gf=(var*A*P*MMar/1000)/(R*(Tfo+273.15)*(1+Wo)); % Vazão mássica do gás
[kg/s]

% Condições de Entrada do Sólido:

Mo=0.147; % Umidade do material na entrada [kg vapor/kg de
sól. seco]
Gs=60.4/(1000*60*(1+Mo)); % Vazão mássica de sólido seco [kg/s]
```

```

Tso=30; % Temperatura de entrada do produto [oC]

% Equação para o adimensional de umidade (MR) ajustada pela equação de
OVERHULTS:

%Barrozo(1995) - leite deslizante e escoamento cruzado
AA=13.58;
BB=-6287.1;
CC=0.412;

% Equação para a umidade de equilíbrio (We) ajustada pela equação de HALSEY
modificada:

aa=-0.00672;
bb=1.508;
cc=3.02;

%Característica da soja para o cálculo do coeficiente de transferência de
%calor

kf=2.665e-5; %condutividade térmica [kW/m°C]
dp=6.3e-3; % diâmetro da partícula de igual volume [m]
visc=0.185e-5; %viscosidade do ar [kg/ms]
Cpf=1; % Cp do ar seco [kJ/kg°C]

% Parâmetros de U para secador deslizante (contracorrente):
%Pfeifer (2011)
a=1.54*0.4;
b=0.57/3;

UaV=(A/V) * (kf/dp) * a * (visc*Cpf/kf) ^ (1/3) * ((Gf/A) * dp/visc) ^ b;
Up=xup(1) * (Gf) ^ xup(2); % [kW/m²°C]

%=====
% Correlações Termodinâmicas
%=====
%
Cps=1.046; % Cp do sólido seco [kJ/kg°C]
Cpl=4.187; % Cp do fluido [kJ/kg°C]
Cpv=1.1715; % Cp do vapor [kJ/kg°C]

%=====

% pontos de colocação %chute inicial (M W Ts Tf)
solinit = bvpinit(linspace(1e-5,1,10),[0.16 0.04 30 45]); % chute inicial
solution = bvp4c(@sys_edo,@boundary_conditions,solinit,[],...
MMar,R,P,r,L,A,V,TR,tr,NR,Tfo,Wo,UR,var,Gf,Gs,Tso,Mo,AA,BB,CC,aa,bb,...
cc,UaV,Cps,Cpf,Cpl,Cpv,D,Tamb,Up);

zint = linspace(1e-5,1,100); % interpolação de pontos com 100 pontos
em z
Solution = deval(solution,zint); % avalia os pontos de zint na edo
naux=length(zint); % ver a quantidade de elementos que tem o
vetor zint

```

```

for i=1:naux
    KK(i)=(1/60)*exp(AA+BB/(Solution(4,i)+273.15));
    MRR(i)=exp(-(KK(i)*(TR*zint(i)))^CC);
    Meqq(i)=((-exp(aa*Solution(3,i)+cc)/log(UR))^(1/bb))/100;
    taxa(i)=(1-MRR(i))*(Mo-Meqq(i))/(TR*zint(i));
end

saida=[zint' Solution(1,:) ' Solution(2,:) ' Solution(3,:) ' Solution(4,:) '
TR*zint'];
save ('resultados_48_1.1.txt', 'saida', '-ASCII')

figure(1)
subplot(2,2,1)
plot(zint,Solution(1,:), 'r.-')
xlabel('z')
ylabel('M')

subplot(2,2,2)
plot(zint,Solution(2,:), 'b.-')
xlabel('z')
ylabel('W')

subplot(2,2,3)
plot(zint,Solution(3,:), 'r.-')
xlabel('z')
ylabel('Ts')

subplot(2,2,4)
plot(zint,Solution(4,:), 'b.-')
xlabel('z')
ylabel('Tf')

figure(2)
plot(zint,taxa, 'r.-')
xlabel('z')
ylabel('Rw')

figure(3)
plot(zint,Solution(1,:), 'r.-', zint,Solution(2,:), 'b.-')
xlabel('z')
ylabel('M e W')
legend('M', 'W', 0)

figure(4)
plot(zint,Solution(3,:), 'r.-', zint,Solution(4,:), 'b.-')
xlabel('z')
ylabel('Ts e Tf')
legend('Ts', 'Tf', 0)

function dYdZ = sys_edo(z,Y,MMar,R,P,r,L,A,V,TR,tr,NR,Tfo,Wo,UR,var,Gf,...
    Gs,Tso,Mo,AA,BB,CC,aa,bb,cc,UaV,Cps,Cpf,Cpl,Cpv,D,Tamb,Up)

M=Y(1); % solido
W=Y(2); % ar
Ts=Y(3); % temperatura do solido
Tf=Y(4); % temperatura do ar

```

```

H=(Gs)*TR*z; % Holdup de sólido seco no secador [kg]
K=(1/60)*exp(AA+BB/(Tf+273.15));
MR=exp(-(K*(TR*z))^CC);

Ma=var*A*(TR*z)*(P*(MMar/1000)/(R*(Tfo+273.15))*(1+Wo)); % Holdup de ar
seco [kg]
rhoar=(P*MMar/1000)/(R*(Tf+273.15)); % Densidade do ar [kg/m3]
Meq=((-exp(aa*Ts+cc)/log(UR))^(1/bb))/100; % [kg/kg-bs]

Cpfy=Cpf+Cpv*W;
Delta=((Tf-Tso)-0.999*(Tfo-Ts))/(log(0.999*(Tf-Tso)/(Tfo-Ts))); % [oC]
Qp=Up*pi*2*r*L*(Tf-25); % Calor perdido [kJ/s]

qlat=2492.71-2.144*Ts-0.001577*Ts^2-7.3353e-6*Ts^3; % Calor Lat. de
vaporização da água pura [kJ/kg°C]

Rw=(1-MR)*(Mo-Meq)/(TR*z); % [1/s]

dYdZ = [ -Rw*H/Gs % solido
          -Rw*H/Gf % ar
          (1/(Gs*(Cps+M*Cpl)))*(UaV*(Tf-Ts)+Rw*Cpl*Ts*H-Rw*H*(qlat+Cpv*(Tf-
Ts))) % temperatura do solido
          (1/(Gf*(Cpf+W*Cpv)))*(UaV*(Tf-
Ts)+Rw*(qlat+Cpv*Tf)*H+Up*pi*D*L*(Tf-Tamb)) % temperatura do ar
        ];

function conditions = boundary_conditions(Ya,Yb,MMar,R,P,r,L,A,V,TR,tr,...
NR,Tfo,Wo,UR,var,Gf,Gs,Tso,Mo,AA,BB,CC,aa,bb,cc,UaV,Cps,Cpf,Cpl,Cpv,D,Tamb,
Up)

conditions = [ Ya(1)-Mo % cond. inicial para o solido em z=0
              Yb(2)-Wo % cond. final para o ar em z=1
              Ya(3)-Tso % cond. inicial para a temp em z=0
              Yb(4)-Tfo % cond. inicial para a temp em z=1
            ];

```