

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial
Curso de Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Alimentos



Dissertação

Simulação Computacional para Secagem de Grãos

Rodrigo Menna Barreto Penteado
Engenheiro Agrícola

Pelotas, 2020.

Rodrigo Menna Barreto Penteado

Simulação Computacional para Secagem de Grãos

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Moacir Cardoso Elias

Coorientador: Prof. Dr. Volnei Luiz Meneghetti

Pelotas, 2020.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação:
Bibliotecária Daiane Schramm – CRB-10/1881**

P419s Pentead, Rodrigo Menna Barreto
Simulação Computacional para Secagem de Grãos. /
Rodrigo Menna Barreto Pentead; Prof. Dr. Moacir Cardoso
Elias, orientador. – Pelotas, 2021.
64p.

Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

1. Grau de umidade. 2. Simulação de secagem. 3. Modelagem matemática. 4. Grãos e sementes. I. Título.

CDD 630

Rodrigo Menna Barreto Penteado

Simulação Computacional para Secagem de Grãos

Dissertação aprovada como requisito parcial, para a obtenção do grau de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, da Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 20 de novembro de 2020.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Moacir Cardoso Elias (Orientador)
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas.

Prof. Dr. Volnei Luiz Meneghetti
Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Federal de Pelotas.

Prof. Dr. Jeferson Cunha da Rocha
Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Federal de Pelotas.

Prof. Dr. Ricardo Scherer Pohndorf
Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos pela Universidade Federal de Rio Grande.

Agradecimentos

A Deus, por propiciar a vida espiritual e a segui-la com fé.

Aos meus familiares que estando presentes ou não nos dias atuais, serão sempre essenciais em minha vida, em especial, aos meus filhos Rodrigo e Alícia, as minhas avós (in memoriam) Iracema Brauner Penteado e Leda Behrendorf Menna Barreto e avôs (in memoriam) Antônio Lemos Penteado e José Luiz Evangelho Menna Barreto, a minha mãe Elisabete Behrendorf Menna Barreto (in memoriam), ao meu pai Roberto Brauner Penteado, aos meus tios Jorge Derwek Sedlak (in memoriam) e Silma Penteado Sedlak.

À equipe da American Society of Agricultural and Biological Engineers – ASABE, a qual colaborou, diante de minhas indagações referentes à revisão bibliográfica.

Aos colegas do LABGRÃOS, por sua atenção e solidariedade para a realização das atividades do mestrado.

Aos professores Moacir Cardoso Elias e Volnei Luiz Meneghetti, pela dedicada orientação necessária para chegar à realização desta dissertação.

Aos colegas e professores da Faculdade de Engenharia Agrícola e do Curso de Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Pelotas, os quais transmitiram orientações e referências para realização de minhas atividades durante o curso.

À empresa Máquinas Vitória (situada em Pelotas, RS), que atua na área de equipamentos para pré-beneficiamento de grãos e sementes desde a década de 70.

Resumo

PENTEADO, Rodrigo Menna Barreto. Simulações computacionais para secagem de grãos. 2020. 64 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

Apresentam-se nesta dissertação, simulações computacionais e modelagens matemáticas, a partir de um processo de secagem de soja variedade *Monsoy 7575*, cuja a fonte de observações provém de um experimento laboratorial realizado em camadas delgadas por *Guimarães (2005)*, sob condições de secagem especificadas. Os resultados calculados dessas simulações, foram comparados às medições de grau de umidade (base úmida) em seus respectivos instantes, registrados nesse experimento. Através de análise estatística preditiva desses dados, foi desenvolvido, nesta dissertação, um modelo matemático geral e equações aplicadas para representar a secagem com aquecimento suplementar desse experimento; as variáveis consideradas foram: grau de umidade, peso específico e tempo de secagem. Foram considerados dois métodos de determinação de um coeficiente c_i , componente da equação geral desse modelo: o primeiro proveniente de uma média de resultados e o segundo calculado a cada instante da operação de secagem; os quais geraram resultados satisfatórios em ambos os casos. Os resultados calculados do grau de umidade de soja, com a utilização de um coeficiente médio c_i calculado para essa equação do modelo, demonstraram-se satisfatórios, com coeficiente de correlação médio igual a 0,99 em relação às medições realizadas por *Guimarães (2005)*. Do mesmo modo, ocorreu com a curva do tempo de secagem, calculada com uma equação desenvolvida a partir desse modelo matemático. Observa-se neste trabalho, que a equação geral, que representa o modelo proposto, elaborada através da análise estatística das medições experimentais registradas por *Guimarães (2005)*, é adequada para simulações de secagem de outros produtos agrícolas granulosos. Estima-se que a planilha eletrônica - elaborada para a produção dessas equações aplicadas à soja a partir do modelo de secagem desenvolvido - seja apropriada para produção de equações aplicadas para grãos e sementes de diferentes espécies. Demonstra-se neste trabalho também, como foi elaborado na planilha eletrônica, o procedimento estatístico empregado para aumentar a precisão nos resultados, reduzindo-se o resíduo.

Palavras-chave: grau de umidade, simulação de secagem, modelagem matemática, grãos e sementes.

Abstract

PENTEADO, Rodrigo Menna Barreto. Computational simulations for grain drying. 2020. 64 p. Dissertation (Professional Master in Food Science and Technology) – Postgraduate Program in Food Science and Technology, Faculty of Agronomy Eliseu Maciel, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

This dissertation presents computational simulations and mathematical modeling from a drying process of soybean of a cultivate *Monsoy 7575*, whose source of observations comes from a laboratory experiment carried out in thin layers by *Guimarães (2005)*, under specified drying conditions. The calculated results of these simulations were compared with the moisture content measurements (wet basis) in their respective instants, registered in this experiment. Through predictive statistical analysis of these data, a general mathematical model and equations applied to represent drying with supplementary heating of this experiment were developed in this dissertation; the variables considered were: moisture content, specific weight and drying time of these seeds. Two methods of determining a coefficient of c_i , component of the general equation of this model, were considered: the first from an average of results and the second calculated at each moment of the drying process; which generated good results in both cases. The calculated moisture content of the soybean, using a medium coefficient c_i calculated to this equation provenient of the model developed in this work, produced good results, with a correlation coefficient equal to 0,99 in relation to the measurements of the moisture content registered by *Guimarães (2005)*. Also the drying time curve calculated with an equation developed from this mathematical model, produced good results. It is observed in this work that the general equation, which represents the proposed model, elaborated through the predictive statistical analysis of the experimental data registered by *Guimarães (2005)*, is well indicated for drying simulations of others granular agricultural products. An electronic spreadsheet, elaborated to the production of the soybean equations, from the drying model developed, is appropriate to the production of equations for others species of grains and seeds. This study also demonstrates, as elaborated in the spreadsheet, the statistical procedure used to increase the accuracy in the results, reducing the residue.

Key-words: moisture content, drying simulation, mathematical model, grains and seeds.

Lista de Figuras

| | | |
|----------|--|----|
| Figura 1 | A equação de <i>Page</i> com os coeficientes para soja. | 33 |
| Figura 2 | Tubo de <i>Pitot</i> | 36 |
| Figura 3 | Características da célula de secagem utilizada no experimento de <i>Guimarães (2005)</i> | 36 |
| Figura 4 | Cotas dos pontos onde foram realizadas as medições na célula de secagem do experimento. | 37 |
| Figura 5 | Condições registradas do experimento de <i>Guimarães (2005)</i> e cálculo por interpolação. | 39 |
| Figura 6 | Resultados de simulação através da equação de <i>Page</i> para soja. | 42 |
| Figura 7 | Resultados das equações 28 e 35. | 43 |
| Figura 8 | Análise residual e estatística do modelo para sementes de soja <i>Monsoy 7575</i> , equação (28). | 46 |
| Figura 9 | Gráfico preliminar da curva de secagem, sem a equação 2 (29) de ajuste residual. | 47 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 10 | Gráfico da curva de secagem com o modelo ajustado pela equação 2 (29). | 48 |
| Figura 11 | Tempos de secagem registrados por <i>Guimarães (2005)</i> e calculados pela equação 35. | 52 |
| Figura 12 | Representação gráfica do tempo de secagem, considerado, proveniente do experimento de <i>Guimarães (2005)</i> | 53 |
| Figura 13 | Representação gráfica dos instantes calculados com a equação (35), em relação ao tempo de secagem total. | 53 |
| Figura 14 | Resultados das equações 37 e 38, para a determinação do tempo de secagem da soja. | 54 |
| Figura 15 | Análise estatística dos resultados da equação 40. | 55 |
| Figura 16 | Gráficos das equações 37, 38 e 39 comparados aos tempos registrados no experimento de <i>Guimarães (2005)</i> | 56 |
| Figura 17 | Comparativo entre os tempos de secagem calculados e registrados por <i>Guimarães (2005)</i> | 57 |
| Figura 18 | Resultados calculados com a equação 40. | 58 |

Lista de tabelas

| | | |
|----------|--|----|
| Tabela 1 | Total de perdas quantitativas, desvios e sinistros em armazenagem nas unidades armazenadoras da <i>CONAB</i> no Brasil. | 13 |
|----------|--|----|

SUMÁRIO

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 15 |
| 1.1.1 | Objetivos gerais | 15 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 15 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 | Qualidade no pré-processamento de grãos | 16 |
| 2.2 | Propriedades físicas dos grãos | 18 |
| 2.2.1 | Ângulo de repouso ou talude natural | 18 |
| 2.2.2 | Peso específico aparente | 18 |
| 2.2.3 | Porosidade | 19 |
| 2.2.4 | Condutibilidade térmica dos grãos | 19 |
| 2.2.5 | Teor de água ou grau de umidade dos grãos | 19 |
| 2.2.6 | Umidade de equilíbrio dos grãos - equilíbrio higroscópico | 22 |
| 2.3 | Teoria da secagem | 23 |
| 2.3.1 | Secagem estacionária | 25 |
| 2.3.2 | Seca-aeração | 26 |
| 2.3.3 | Secagem contínua | 26 |
| 2.3.4 | Secagem intermitente | 26 |
| 2.3.5 | Temperatura de secagem | 27 |
| 2.4 | Equações aplicadas à simulação da secagem de grãos | 27 |
| 2.4.1 | Equação do balanço de calor | 28 |
| 2.4.2 | Equação de <i>Henderson modificada</i> com a variável grau de equilíbrio higroscópico explicitada | 29 |
| 2.4.3 | Equação do balanço de calor com a variável tempo explicitada | 29 |
| 2.4.4 | Equação semiempírica para descrever a secagem em camadas delgadas de <i>PAGE</i> para grãos de arroz e outros | 30 |
| 2.4.5 | Equações indicadas pela <i>ASAE S448 de 1999</i> | 31 |
| 2.4.5.1 | Equação de <i>AGRAWAL & SINGH (1977)</i> para arroz com casca | 31 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.4.5.2 | Equação de <i>OVERHULTS et al. (1973)</i> para soja | 32 |
| 2.4.6 | Equação de <i>Page</i> com os coeficientes para soja | 33 |
| 2.4.7 | Determinação do calor específico para arroz com casca conforme <i>ASAE D243.4 de 2003</i> | 33 |
| 2.4.8 | Equações e métodos para determinação do calor latente de grãos e sementes e outras variáveis | 34 |
| 3 | METODOLOGIA | 35 |
| 3.1 | Materiais | 35 |
| 3.2 | Métodos | 37 |
| 3.2.1 | DESENVOLVIMENTO DO MODELO | 38 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 41 |
| 4.1 | O modelo matemático desenvolvido e ajustado para soja | 41 |
| 4.2 | As equações matematicamente desenvolvidas para soja | 48 |
| 4.2.1 | Determinação do coeficiente c_i da equação 1 (28) do modelo | 50 |
| 4.3 | Classificação do modelo desenvolvido para soja | 51 |
| 4.4 | Simulação do tempo de secagem através das equações 28 e 29 do modelo | 51 |
| 5 | CONCLUSÕES | 60 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS. | 61 |

1 Introdução

A necessidade de sistemas tecnológicos eficazes e econômicos, para conservação de grãos, incentivam e exigem a prevalência de determinados conceitos, relacionados diretamente ou indiretamente, à atividade de pré-processamento de grãos. As operações de secagem e aeração em grãos recém-colhidos ou posteriormente armazenados em silos, por exemplo, são algumas das técnicas para evitar a ocorrência de micotoxinas e outros problemas neles existentes. Observa-se, como demonstra a tabela 1, que as perdas durante a pós-colheita, podem atingir cifras expressivas.

Tabela 1 - Total de perdas quantitativas, desvios e sinistros em armazenagem nas unidades armazenadoras da CONAB no Brasil

| Período | Valor Custo (R\$) |
|---------------------|-------------------|
| 01/01/15 a 31/12/15 | 9.620.025,00 |
| 01/01/16 a 31/12/16 | 41.858.723,24 |
| 01/01/17 a 31/12/17 | 11.759.868,29 |

Fonte: CONAB (2018).

O mal monitoramento ou a incorreta previsibilidade das condições da massa de grãos mantidas em unidades de armazenagem, são um dos fatores que geram essas perdas quantitativas citadas na tabela 1 acima.

Empresas, organizações e profissionais, de apoio tecnológico à agricultura brasileira, tais como, *EMBRAPA*, *EPAGRI*, *IRGA*, universidades com cursos na área das Ciências Agrárias, desenvolvem aplicativos para ambiente *Android/IOS*, softwares para computadores, planilhas eletrônicas e outros produtos com a finalidade de preservar a massa de grãos, monitorando as etapas de secagem e armazenagem. Através dessa ampla diversidade e competitividade, novas perspectivas para aperfeiçoamento e atualização dessas tecnologias são apresentadas.

As modelagens computacionais, nas instalações para armazenagem e secagem de grãos, visam otimizar resultados. É um diferencial que poderá ajudar na redução de custos operacionais, além de benefícios à qualidade dos grãos.

Guimarães (2005. p. 3) cita que “os recursos computacionais disponibilizam um instrumento eficiente de avaliação sistemática dos dados...” Através de simulações de um conjunto de camadas delgadas interligadas, numa mesma massa de grãos, com o uso de métodos computacionais, a simulação de secagem em camada espessa pode ser realizada (GUIMARÃES, 2005).

Este trabalho visa contribuir, demonstrando didaticamente, como desenvolveu-se um modelo matemático, que envolve as variáveis grau de umidade, peso específico do grão e tempo de secagem, através da análise estatística de dados, gerados em medições durante uma secagem estacionária em laboratório. Os resultados calculados do tempo de secagem e do grau de umidade desse modelo, foram comparados às medições registradas desse experimento laboratorial. Uma análise sobre a precisão e exatidão nessas simulações foi realizada, em função dos valores aferidos durante o experimento. A metodologia para redução do resíduo, oriundo dos resultados calculados nas equações preliminares do modelo, é apresentada. As equações redefinidas, com o resíduo reduzido por essa metodologia, são apresentadas e avaliadas graficamente. Conclusões e aplicabilidades, desse modelo desenvolvido, para simulações computacionais de secagem de produtos agrícolas, foram estabelecidas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Demonstrar que através de modelagens matemáticas computacionais, obtém-se resultados eficazes para monitoramento e produção tecnológica, através da coleta e inserção de informações iniciais, permitindo simulações técnicas para controlar os fenômenos biológicos, físicos e químicos.

1.1.2 Objetivos específicos

Apresentar metodologia para: reduzir o resíduo, como também, para tornar os resultados gerados (pelo modelo matemático desenvolvido) a desvios aceitáveis dentro dos limites reais possíveis (harmonização dos resultados), para simular o tempo e a variação do grau de umidade de soja para cada instante transcorrido numa operação de secagem.

Determinar coeficientes instantâneos para a simulação de modelos preditivos, sendo um desenvolvido nesta dissertação e outro de referência bibliográfica, para tempo de secagem e grau de umidade dos grãos. Analisando a resposta desses modelos preditivos com a utilização de coeficientes instantâneos e com a utilização de coeficientes médios.

Simular a utilização o modelo desenvolvido, em dimensionamentos de projetos de secagem e determinação de outras variáveis, associando-o a equações existentes e citadas na revisão bibliográfica, desde que haja um ajuste, através de análise estatística preditiva dos coeficientes e expoentes desse modelo, permitindo assim precisão satisfatória para esses resultados.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Qualidade no pré-processamento de grãos

As instalações industriais utilizadas para o pré-processamento de grãos, são denominadas de Unidades Beneficiadoras de Grãos - UBG e para pré-beneficiamento de sementes – UBS. O pré-processamento de grãos, basicamente pode ser dividido em operações distintas de processamento primário: recepção, limpeza, secagem, armazenagem e movimentação mecânica. Estas indústrias tem como finalidade principal, garantir o abastecimento normal da matéria prima agrícola (grãos) durante a safra e entressafra, evitando suas perdas, tanto qualitativas quanto quantitativas, ou seja, preservando as características do produto e a manutenção do estoque (MILMAN, 2002).

São realizadas simulações computacionais, nas operações de secagem e armazenagem, auxiliando na gestão da manutenção da qualidade dos grãos durante esses processos, para prever: “o tempo de secagem ou de aeração necessário sob uma massa de grãos, para ser mantida em boas condições; a variação do grau de umidade; como também, outras variáveis relacionadas à qualidade do produto que está sendo processado” (GUIMARÃES, 2005).

As condições físicas dos grãos podem afetar o desempenho dos equipamentos para pré-processamento de grãos, enquanto que a composição química dos grãos, pode afetar as características indispensáveis à industrialização. O monitoramento e a geração de simulações através das informações geradas neste, permitem rastrear possíveis focos de degradação na massa de grãos (MILMAN, 2002).

A operação de pré-limpeza de grãos e sementes, após a colheita é uma necessidade essencial para o bom planejamento, assim os riscos de incêndio são reduzidos e a atividade de secagem ocorre de uma maneira mais previsível, permitindo a passagem do ar sob os grãos e sementes uniformemente. Havendo também redução de custos, pois elementos graúdos ou finos, tais como poeiras e elementos sólidos (metais, raízes, folhas...), já foram descartados, antes da secagem, diminuindo as fontes de inóculo de micro-organismos e de pragas, cujas presenças

são indesejáveis na classificação e na conservação posterior. Esse procedimento é muito importante para realização de experimentos de secagem em laboratório, pois o produto que será estudado com medições através de aparelhos, não deve conter elementos estranhos que alterem os objetivos da pesquisa (MILMAN, 2002; GUIMARÃES, 2005).

O fator qualidade dos grãos para fins agroindustriais, é um conceito que poderá oscilar, dependendo de para qual fim será destinado. Para a pecuária, o valor nutricional dos grãos é importante. Algumas propriedades físicas dos cereais, tal como, a suscetibilidade a quebras, conservação das propriedades sensoriais, integridade e funcionalidade biológica, entre outras, são propriedades físicas importantes para o consumo humano. Para produtores de sementes, a capacidade de germinação é o objetivo principal (BAKKER-ARKEMA et al., 1999).

Grãos oleaginosos como os de soja, amendoim, girassol e outros, apresentam umidade de equilíbrio inferior aos dos cereais, como arroz. A disponibilidade de água em grãos de soja é maior do que no arroz, quando armazenados em condições de temperatura e umidade relativa iguais. Esse excedente de água fica disponível para os micro-organismos, que se não eliminados, deterioram os produtos armazenados (MILMAN, 2002; ELIAS et al., 2012).

De um modo geral, a umidade, a temperatura, os danos mecânicos e as impurezas, influenciam muito nas condições dos produtos armazenados. Os métodos primários de secagem, não tecnificados, ocasionam tempos de secagem longos, suscetíveis a variações climáticas, pois enquanto a umidade vai caindo, a infestação vai aumentando, acompanhada de perda de matéria seca. O pré-processamento adequado, permite assegurar aos grãos e sementes a boa preservação da qualidade, impedindo o surgimento e a proliferação de fungos e insetos, no primeiro momento, e logo após, o surgimento das indesejáveis micotoxinas (MILMAN, 2002). As simulações computacionais, auxiliam a atingir essa meta.

A qualidade nos grãos é assegurada com medidas, através da aplicação correta de normas, procedimentos e treinamentos de pessoal em todas as áreas do ciclo produtivo, com a inserção de novas tecnologias aplicadas à segurança do trabalho, à qualidade e produtividade agrícola. Para fins comerciais, os grãos são classificados de acordo com o teor de umidade, peso hectolítrico, porcentagem de grãos quebrados ou danificados e porcentagem de materiais estranhos (MILMAN, 2002).

O conhecimento do teor de umidade dos produtos agrícolas é fundamental para determinação das condições de processamento, secagem, armazenagem e comercialização. A ASABE disponibiliza o Standard *ANSI/ASAE D241.4 (2003)*, o qual trata dos métodos para determinação do peso específico de em uma gama de produtos em função de seu teor de umidade (CARVALHO, 1994).

2.2 Propriedades físicas dos grãos

As propriedades físicas dos grãos, são variáveis relacionadas a qualidade e ao estado ao qual se encontram. Assim, são consideradas nas modelagens matemáticas para a área de Ciência e Tecnologia de Alimentos, devido a sua importância.

2.2.1 Ângulo de repouso ou talude natural

O ângulo de repouso de grãos e sementes, determina a inclinação dos equipamentos e superfícies que escoam grãos por gravidade; a inclinação deverá ser maior que o ângulo de repouso do grão/semente (MILMAN, 2002). No standard *ASAE S413.1 FEB03*, apresentam-se considerações para cálculo da capacidade volumétrica de silos cilíndricos, levando-se em consideração o ângulo de talude natural, bem como a norma *ABNT 12:02.04.002*.

2.2.2 Peso específico aparente

Define-se peso específico aparente de uma massa de grãos, como sendo a relação entre o “peso total” e “volume total desta massa”, sendo que a relação inversa entre essas duas variáveis, denomina-se volume específico.

Muitos pesquisadores, têm desenvolvido equações para determinar o peso específico de produtos agrícolas, em função do teor de umidade desses. No standard *ASAE D.241.4 Feb03* e em *Guimarães & Baudet (2002)*, estão disponibilizadas algumas dessas equações.

O peso específico está relacionado ao teor de água e ao coeficiente de compactação dos grãos que, por sua vez, depende: do coeficiente de atrito interno

dos grãos, da forma da célula, do modo de enchimento e da estrutura da matéria que compõe a massa (grãos, sementes, madeira, sujeiras ou corpos estranhos, etc). De uma maneira geral, numa massa de grãos, há um gradiente de peso específico crescente com a profundidade dos grãos.

2.2.3 Porosidade

“O grão armazenado em massas (graneleiras), é um material poroso, do qual 30 a 50% em volume, é ocupado pelo espaço intersticial (intergranular). Quanto menor for o grão, menor será o espaço intersticial” (MILMAN, 2002, p. 20). Na tabela 2 do standard *ANSI/ASAE D241.4 OCT1992 (R2008)*, encontram-se percentuais de porosidade para produtos agrícolas.

A estrutura granular tem grande importância. Deve ser considerada no cálculo para determinar a perda de carga de ar que circula dentro de uma massa de grãos em processos de secagem e aeração de sementes e grãos, por exemplo.

2.2.4 Condutibilidade térmica dos grãos

“A condutibilidade térmica dos grãos é medida pela intensidade de calor que passa de uma zona mais quente para uma mais fria. No caso de um metal, o calor passa rapidamente; nos grãos, o processo é diferente” (MILMAN, 2002, p. 20). No standard *ASAE D243.4 MAY03*, página 2, encontra-se uma tabela com equações para determinar o valor da condutibilidade térmica de grãos e outros produtos agrícolas, em função do teor de umidade - M (%), desses grãos. Por exemplo, para arroz com casca, tamanho médio, a equação indicada é: $k = 0.08661 - 0.0013 M$ ”

2.2.5 Teor de água ou grau de umidade dos grãos

O conceito de grau de umidade provém no fato dos grãos serem formados de um conjunto de substâncias sólidas, denominado de matéria seca, e de certa quantidade de água, sob diversas formas (SILVA, 2000). O teor de água contido nos grãos é um fator muito importante que interfere na qualidade do produto, deve ser

monitorado desde a colheita até a etapa final do processo agroindustrial ao qual foi destinado (MILMAN, 2002).

Segundo Leopold & Vertucci (1989), constam na semente, pelo menos três tipos de água ligada à mesma. A água existente nos grãos, está classificada sob três diferentes formas, segundo Hunt e Pixton (1974), estão relacionadas à intensidade com que se liga às camadas dos grãos/sementes: a primeira forma é chamada de água adsorvida (ou água presa), e está aderida à superfície sólida do grão através de forças moleculares e/ou químicas; a segunda forma é denominada de água absorvida, de ligação mais fraca, sendo retida por forças capilares, nos microinterstícios do material sólido. A terceira forma é a chamada água de constituição e está aderida à matéria seca por quimiosorção (CARVALHO, 1994).

“Na determinação do grau de umidade, são consideradas as águas adsorvida e absorvida, como águas livres que são possíveis de serem separadas do material sólido, sem alterar a sua constituição” (MILMAN, 2002, p. 21). Segundo Carvalho (1994, p. 4), “para os estudos de secagem e de armazenagem de grãos e sementes, a água que realmente interessa, é a adsorvida, dentro da faixa de 0 a 25% de teor de umidade.”

O resultado do teor de umidade em grãos e sementes é expresso em duas formas possíveis percentual ou decimal: a) Relação entre o peso de água existente em relação ao peso total de grãos, denominada de grau de umidade base úmida; b) a relação entre o peso de água e o peso de matéria seca, denominada de grau de umidade, base seca (MILMAN, 2002).

Carvalho (1994, p. 16), define que “os métodos para determinação do grau de umidade de grãos e sementes, são classificados em: diretos (ou primários) e indiretos (ou secundários)”. O método direto com o uso da estufa, devido a sua boa precisão e exatidão, é considerado o principal. Através desse método, mede-se a perda de peso promovida pela secagem total de uma amostra de grãos ou sementes, sendo que o grau de umidade é obtido pela relação entre o peso da água removida e o peso da amostra inicial, percentualmente.

No Brasil, o método oficial de determinação do grau de umidade dos grãos e sementes de soja e outros grãos e sementes, é o da estufa à 105 °C com uma tolerância de ± 3 °C (BRASIL, 2009).

Na linha de métodos indiretos, podem ser destacados os elétricos, devido à sua ampla utilização na área de pré-beneficiamento de grãos e sementes. São de fácil

manuseio, de leitura direta e apresentam rapidez na operação, medindo o grau de umidade sempre em base úmida. O método indireto considera que a resistência elétrica indica o grau de umidade, ou seja, em função da maior ou menor facilidade da corrente elétrica atravessar a massa de grãos ou de sementes. Os instrumentos de medição da linha dos métodos indiretos, embora não tão precisos quanto os diretos, para apresentarem boa confiabilidade, devem estarem corretamente calibrados e serem utilizados conforme a orientação do fabricante. (MILMAN, 2002).

Há dois modos para expressar a umidade contida num produto, ou seja, base úmida (bu), e base seca (bs), (ELIAS, 2008).

- Base úmida

A umidade contida nos grãos em base úmida é a razão entre o peso da água (Pa) e o peso total (Pt) dessa amostra.

$$U_{bu} = [(Pa) / (Pa + Pms)] \cdot 100 \quad (1)$$

Sendo:

- U_{bu} = percentual de umidade em base úmida;
- Pa = peso da água;
- Pms = peso da matéria seca;
- $Pa + Pms = Pt =$ Peso total.

- Base seca

A umidade contida nos grãos em base seca é a razão entre o peso da água (Pa) e o peso da matéria seca (Pms) dessa amostra.

$$U_{bs} = [(Pa) / (Pms)] \cdot 100 \quad (2)$$

Sendo

- U_{bs} = percentual de umidade em base seca;
- Pa = peso da água;
- Pms = peso da matéria seca.

- Mudança de base

Passar de base úmida para seca (BAKKER-ARKEMA et al., 1999, p. 2) :

$$U_{bs} = [(U_{bu}) / (100 - U_{bu})] \cdot 100 \quad (3)$$

Passar de base seca para base úmida:

$$U_{bu} = (U_{bs}) / (100 + U_{bs}) \quad (4)$$

- Redução de peso de uma amostra

A equação abaixo permite calcular a variação de peso de uma amostra, com a sua variação de umidade (ELIAS, 2008).

$$Pf \cdot (100 - Uf) = Pi \cdot (100 - Ui) \quad (5)$$

Sendo:

- Pf = peso final da amostra, em kgf;
- Uf = % de umidade final da amostra;
- Pi = peso inicial da amostra em kgf;
- Ui = % de umidade inicial da amostra.

2.2.6 Umidade de equilíbrio dos grãos - equilíbrio higroscópico

“Umidade de equilíbrio higroscópico, é o grau de umidade dos grãos, quando em equilíbrio com o ar que os envolve” (MILMAN, 2002, p. 24). “Segundo Brooker et al. (1992), o equilíbrio higroscópico, é o grau de umidade alcançado pela semente, depois de ter sido exposto por um longo período de tempo, a um ambiente controlado” (GUIMARÃES, 2005). “A umidade de equilíbrio depende ainda se o grão sorve ou desorve umidade para atingir o equilíbrio. Este fenômeno é conhecido por histerese” (MILMAN, 2002, p. 24).

A umidade de equilíbrio é muito utilizada no estudo da secagem e armazenagem de grãos e sementes, pois os grãos e as sementes são armazenados em condições iniciais de umidade, em conformidade com a meta de boa conservabilidade dessa massa de grãos. Porém, as condições higroscópicas poderão

mudar, perdendo ou recebendo umidade durante o período de armazenamento e assim, poderão ocorrerem prejuízos aos produtos armazenados (MILMAN, 2002).

A *equação de Henderson*, possibilita determinar, de forma simples e com boa precisão, a umidade de equilíbrio higroscópico de alguns grãos com o ar ambiente, em função da temperatura e da umidade relativa (ASAE D245.5 OCT1995 -R2001; GUIMARÃES, 2005, p. 23; MILMAN, 2002):

$$1 - UR = \exp [- A . (T + C)] . (100 . M_{eq})^B \quad \text{equação (6)}$$

Sendo:

- UR = umidade relativa do ar, decimal;
- \exp = base do logaritmo neperiano;
- T = temperatura do ar, °C;
- M_{eq} = umidade de equilíbrio do grão, base seca (decimal);
- A , C e B = Constantes que dependem do tipo de grão.

2.3 Teoria da secagem

Para a maioria dos autores, a secagem é a operação mais importante no beneficiamento de grãos/sementes, a qual tem por objetivo reduzir a umidade até níveis que permitam a conservação de sua qualidade, visando reduzir as perdas quantitativas e qualitativas, que iniciam algumas vezes, na época de plantio/colheita, e continuam após a sua maturidade fisiológica. É um processo de conservação de grãos e sementes que através do controle, reduzindo-se o grau de umidade e temperatura desses, gera-se benefícios (ELIAS et al., 2012; MILMAN, 2002). É o principal procedimento para prevenção de ataques de micro-organismos, e indireto no combate às pragas, para evitar-se o expurgo na massa de grãos e sementes.

A secagem de grãos propicia os seguintes benefícios:

- permite antecipar a colheita;
- permite a armazenagem por períodos mais longos;
- propiciar a capacidade germinativa por longos períodos;
- inativar o desenvolvimento de micro-organismos e insetos;
- reduzir as perdas do produto na lavoura.

Se realizarmos uma avaliação da composição de matéria, em uma quantidade qualquer de ar captada, verifica-se que é constituída de gases (ar seco) e de vapor d'água (CARVALHO, 1994). A secagem, é um processo de transferência simultânea de calor e de matéria entre o produto e o ar de secagem. O ar, ao mesmo tempo em que fornece calor ao sistema, absorve água do produto em forma de vapor. Com a transferência de água dos grãos e sementes, por convecção, para o ar de secagem, esse é acompanhado por um resfriamento do ar. Contudo, observa-se que o ar absorve em forma de vapor, o que cedeu sob a forma de calor, caracterizando um processo adiabático ou isoentálpico. Grãos e sementes são produtos higroscópicos e, portanto, sofrem variações no seu conteúdo de água, de acordo com as condições do ar ambiente. O aquecimento do ar de secagem com a finalidade de diminuir sua umidade relativa, aumentar sua entalpia e sua capacidade evaporativa, deve ser controlado, para que os grãos e sementes não sofram alterações irreversíveis nas suas características físicas, químicas e biológicas (MILMAN, 2002; SILVA, 2000).

A secagem pode ser dividida em fases: até a faixa de 16 a 17% de umidade, de um modo geral, o teor de água contido em grãos e sementes, decresce a taxa constante, ou seja, a quantidade de água removida na unidade de tempo é sempre a mesma. Após atingir um grau de umidade crítico (geralmente entre 16 a 17%), a taxa de secagem torna-se variável e decrescente à medida que o processo avança (CARVALHO, 1994).

A secagem é realizada, na maior parte dos casos, sob temperaturas inferiores a de ebulição do líquido que se quer eliminar, evitando-se danos irreversíveis na matéria do produto (MILMAN, 2002).

Um processo denominado secagem com aquecimento suplementar, realizado com ar não aquecido, ao qual, contudo, em determinadas circunstâncias, é aquecido a uma faixa de temperatura compreendida entre 5,5 a 11 °C em relação à temperatura ambiente. Esse processo é utilizado, quando o grau de umidade das sementes é inferior à 18% e a U.R. é superior a 75% (CARVALHO, 1994, p. 60). No capítulo 3 desta dissertação, o experimento de Guimarães (2005) apresentado, foi realizado com aquecimento suplementar.

O vapor d'água presente nos grãos e nas sementes, tende a ocupar todos os espaços intercelulares disponíveis, resultando pressões em todas as direções, inclusive na camada superficial de contato entre o grão e o ar. Esse fenômeno é denominado pressão parcial de vapor d'água na superfície do grão/semente; por sua

vez, o vapor d'água contido no ar, exerce, também, uma pressão parcial, designada pressão parcial de vapor d'água no ar. Para que os grãos ou sementes cedam vapor d'água ao ar, há a necessidade de um diferencial de pressão de vapor entre o produto e o ar de secagem. O processo de secagem envolve a retirada parcial de água do grão através da transferência simultânea de calor do ar para o grão, e de água do grão para o ar, por meio de fluxo de vapor (MILMAN, 2002). A superfície do grão não resiste a tensões mecânicas muito elevadas. As fissuras, trincamentos e quebras ocorrem quando as tensões são superiores a sua plasticidade ou capacidade elástica. (MILMAN, 2002).

“A secagem com ar aquecido, é a que mais se adapta a esquemas de produção de sementes, tendo em vista a rapidez com que os teores elevados de água podem afetar a germinação e o vigor” (CARVALHO, 1994, p. 61).

A 21 °C e 41 °C de umidade relativa, a diferença de pressão de vapor entre o ar e o grão é de apenas 3,51 g/cm². Porém, aquecendo-se o ar de secagem, a 43,3 °C na massa de grãos, a pressão de vapor do grão passa para 89,98 g/cm² e a diferença de potencial de pressão de vapor entre o ar e o grão aumenta para 80,84 g/cm². Desse modo, a eficiência da capacidade de secagem aumenta em 23 vezes. Quando o ar de secagem de saída do secador atinge o nível máximo de saturação de vapor d'água (temperatura do ponto de orvalho), significa que a eficiência de secagem é máxima (MILMAN, 2002).

2.3.1 Secagem estacionária

A secagem estacionária tem sido usada mais à nível de propriedade, quando a finalidade é o pré-beneficiamento de grãos (CARVALHO, 1994). é um método artificial que, basicamente, se caracteriza pela passagem forçada do ar em fluxo axial ou radial, geralmente por insuflação, sob a camada de grãos em repouso, em compartimentos de secagem (ou células). Os chamados silos-secadores, são fabricados para a secagem estacionária com ar aquecido ou não.

2.3.2 Seca-aeração

Tem a finalidade de modificar o sistema convencional de secagem, reduzindo-se o consumo de energia, assim como os danos térmicos (SILVA, 2000).

A seca-aeração utiliza um secador convencional (tecnificado) contínuo adaptado, em que a câmara originalmente destinada ao resfriamento recebe ar aquecido, passando o secador a ter duas câmaras de secagem, dali, os grãos saem ainda quentes e parcialmente secos, indo diretamente a um secador estacionário (silo), onde permanecem em repouso durante um determinado tempo. Como a energia interna dos grãos na saída do secador convencional ainda é elevada, a água migra para a periferia, sendo removida através do processo de aeração com ventilação forçada de ar não aquecido (a uma determinada taxa de vazão de projeto), concluindo o processo de secagem dessa massa de grãos, o qual pode também ser realizado na forma sequencial ou em multíciclo (MILMAN, 2002).

2.3.3 Secagem contínua

Os secadores contínuos, foram os primeiros desenvolvidos para a atividade de secagem de grãos e sementes (CARVALHO, 1994).

A secagem contínua é um método artificial que, se caracteriza pela ação contínua do ar aquecido sobre a massa de grãos que está em movimento. Os secadores contínuos, ainda são muito utilizados, principalmente para alguns tipos de grãos, tal como a soja (MILMAN, 2002).

2.3.4 Secagem intermitente

CARVALHO (1994), descreve que “os secadores intermitentes se caracterizam pelo fato de que as sementes passam mais de uma vez pela câmara de secagem, cedendo 2 a 3 pontos percentuais por passagem”. A secagem intermitente é caracterizada pela passagem descontínua (alternada) do ar aquecido pela massa de grãos também em movimento (MILMAN, 2002, 130).

2.3.5 Temperatura de secagem

A temperatura do ar de secagem, o teor de umidade inicial dos grãos, o sistema de secagem utilizado e a taxa de resfriamento são elementos que podem provocar a suscetibilidade à quebra de grãos e sementes (MILMAN, 2002).

Na secagem em camadas profundas, de sementes, a temperatura do ar de secagem deve ser elevada apenas até o ponto necessário para o controle da umidade relativa (CARVALHO, 1994).

Dependendo da temperatura de secagem, as características físicas e químicas, como consistência, conteúdo de energia, palatabilidade, dureza, cor, umidade, teor de proteínas e aminoácidos, são afetadas (MILMAN, 2002).

O prejuízo em um lote de sementes, devido a fatores que envolvem a qualidade, pode estar relacionado a: sementes quebradas ou fissuras, devido ao calor, cor da semente, ao tamanho, capacidade de germinação, germe danificado, apodrecimento (teor de umidade excessivo), forma da semente, ataques causados por insetos e micro-organismos e ao peso específico da semente (BAKKER-ARKEMA, 1999).

2.4 Equações aplicadas à simulação da secagem de grãos

Na simulação de secagem, utilizam-se modelos que, em sua grande maioria, partem do estudo da secagem da camada delgada, para que após seja efetuado, através de processo iterativo, o estudo em camada espessa (GUIMARÃES; 2005).

Através da aplicação das equações da teoria da secagem em planilhas eletrônicas, com o uso de algoritmos e comandos do Microsoft Excel, as simulações nestas, são facilitadores para realização de projetos e aferições. Na secagem da camada elementar, estacionária (em leito fixo), se considera que a semente tenha alcançado o equilíbrio térmico e higroscópico com o ar de secagem. A razão de secagem em função do tempo, é obtida, através de um tratamento mais aprimorado. Os modelos de secagem, visam representar a secagem de uma camada elementar de grãos/sementes, através de equações (GUIMARÃES, 2005; MENEGHETTI, 2008).

Guimarães (2005, p.42), expõe que as equações de camada delgada (ou camada elementar) podem ser classificadas em três grandes grupos:

- Equações teóricas;

- Equações semiteóricas ou semiempíricas;
- Equações empíricas.

Guimarães (2005, p. 57) enfatiza que “os modelos de secagem, são classificados e ordenados por diversos pesquisadores, considerando-se os princípios físicos aos quais foram concebidos”.

2.4.1 Equação do balanço de calor

O balanço de energia pode ser representado pela igualdade: (GUIMARÃES, 2005, p. 37)

$$Q_{S_{ar}} = Q_{L_{sem}} \quad (7)$$

Sendo:

- $Q_{S_{ar}}$ = calor sensível do ar (J);
- $Q_{L_{sem}}$ = calor latente necessário de vaporização da água da semente (J).

$$m_{ar} \cdot C_{ar} (T_I - T_f) = m_{H_2O} \cdot L_{sem} \quad (8)$$

Sendo:

- m_{ar} = massa do ar de secagem (kg);
- T_I = massa de água a ser evaporada (kg);
- T_f = temperatura inicial (°C);
- m_{H_2O} = temperatura final (°C)
- L_{sem} = calor específico da semente.

2.4.2 Equação de Henderson modificada com a variável grau de equilíbrio higroscópico explicitada (GUIMARÃES, 2005)

$$M_{eq=0,01} = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-A * (T + C)} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (9)$$

Sendo:

- M_{eq} = grau de umidade de equilíbrio (base seca, decimal);
- T = temperatura em ($^{\circ}C$);
- A , B e C = são constantes que dependem do produto.

2.4.3 Equação do balanço de calor com a variável tempo explicitada

GUIMARÃES (2005, p. 37 apud GUIMARÃES & BAUDET, 2001), expõe a equação do balanço de calor, que é expressa da seguinte forma para determinação do tempo de secagem de grãos e sementes:

$$t = \frac{\mu_{esp} * L_{sem} * m_{ms} * (M_0 - M_{eq})}{C_a * (T_0 - T_c) * V_{az}} \quad (10)$$

Sendo:

- t = tempo de secagem (s);
- μ_{esp} = volume específico do ar de secagem ($m^3.kg^{-1}$ ar seco);
- L_{sem} = calor latente de vaporização da água da semente ($J.kg^{-1}$);
- m_{ms} = peso da matéria seca (kg);
- M_0 = grau de umidade inicial do grão (base seca, decimal);
- M_{eq} = grau de equilíbrio higroscópico do grão (base seca, decimal);
- C_a = Calor específico do ar seco ($J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$);
- T_0 = temperatura inicial do ar de secagem ($^{\circ}C$);
- T_c = temperatura final do ar de secagem ($^{\circ}C$);
- V_{az} = vazão ou fluxo de ar fornecido pelo ventilador ($m^3.s^{-1}$).

Conforme Guimarães (2005) e Guimarães & Baudet (2001) o controle dessas variáveis durante o experimento é de fundamental importância para o sucesso da determinação do tempo de secagem t , em segundos, bem como citações de indicações de caráter geral sobre: as características do produto a ser analisado e a disposição ao qual ele será disposto durante a secagem; o equipamento de secagem; e, as características atmosféricas nesse local.

O fluxo de ar (vazão específica) a ser utilizado deve estar compreendido entre 4 (quatro) e 18 (dezoito) metros cúbicos de ar por minuto por tonelada de grão/semente (GUIMARÃES, 2005).

2.4.4 Equação semiempírica para descrever a secagem em camadas delgadas de PAGE para grãos de arroz e outros

Considerando-se que a razão de umidade (MR) ou taxa de secagem, é definida por ambas equações abaixo:

$$MR = \frac{M_{t-M_e}}{M_0 - M_e} \quad (11)$$

Sendo:

- $M_{(t)}$ = grau de umidade num determinado instante “ t ” (base seca, decimal);
- M_{eq} = grau de equilíbrio higroscópico do grão (base seca, decimal);
- M_0 = grau de umidade inicial do grão (base seca, decimal);

$$MR = \exp(-k' \cdot t^{n'}) \quad (12)$$

Sendo:

- n' = constante;
- k' = constante de secagem modificada;
- t = tempo de secagem (para grãos de arroz deve ser em horas).

Conforme recomendação do standard *ASABE S448.2 SEP2014 (R2018)*, se no instante de conclusão da secagem, a razão de umidade for igual ou inferior a 0,05, o teor de umidade final deverá ser especificado.

Assim, igualando-se as equações (11) e (12), chega-se à expressão:

$$\frac{M(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-k' * t^{n'}) \quad (13)$$

Sendo:

- $M(t)$ = grau de umidade num determinado instante “t” (base seca, decimal);
- M_{eq} = grau de equilíbrio higroscópico do grão (base seca, decimal);
- M_0 = grau de umidade inicial do grão (base seca, decimal);
- n' = constante;
- k' = constante de secagem modificada;
- t = tempo de secagem (para grãos de arroz deve ser em horas).

2.4.5 Equações indicadas pela ASAE S448 (1999)

Essas equações têm o objetivo de determinar os parâmetros K' e N' da equação (12) de PAGE.

Com o tempo expresso em horas, são apresentadas as equações de “AGRAWAL & SINGH” e “OVERHULTS et al.” (ASAE S448, 1999) para grãos de arroz com casca e soja, respectivamente.

2.4.5.1 Equação de AGRAWAL & SINGH (1977) para arroz com casca

$$k' = 0,02958 - 0,4456 * UR\% + 0,01215 * T \quad (14)$$

$$n' = 0,13365 + 1,93653 * UR\% - 1,77431 * (UR\%)^2 + 0,009468 * T \quad (15)$$

Requisitos para as equações de Agrawal & Singh:

- $32 \ll T$ (°C) \ll e $19 \ll UR\% \ll 85$

Sendo:

- n' = constante da equação de Page;

- k' = constante de secagem modificada da equação de *Page*;
- t = tempo de secagem (para grãos de arroz deve ser em horas);
- UR = umidade relativa do ar (decimal);
- T = temperatura do ar (°C).

2.4.5.2 Equação de *OVERHULTS et al. (1973)* para soja

- Para umidade inicial ' M_i ' = 0,250 (decimal, base seca)

$$k' = \left\{ \exp. \left[\frac{(11,752 - 7,912,7)}{(1,8.T + 492)} \right] \right\}^{n'} \quad (16)$$

- Para umidade inicial ' M_i ' = 0,299 (decimal, base seca)

$$k' = \left\{ \exp. \left[\frac{(10,906 - 7,357,0)}{(1,8.T + 492)} \right] \right\}^{n'} \quad (17)$$

- Para umidade inicial ' M_i ' = 0,493 (decimal, base seca)

$$k' = \left\{ \exp. \left[\frac{(10,375 - 6,779,3)}{(1,8.T + 492)} \right] \right\}^{n'} \quad (18)$$

- O coeficiente n' é determinado pela seguinte equação:

$$n' = 0.39642 + 0.002448T \quad (19)$$

Requisito:

Abrange a seguinte faixa de temperatura: $37,8 < T$ (°C) $< 104,4$

Sendo:

- n' = constante da equação de *Page*;
- k' = constante de secagem modificada da equação de *Page*;
- t = tempo de secagem (horas);
- UR = umidade relativa do ar (decimal);

- T = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

2.4.6 Equação de *Page* com os coeficientes para soja

Equação de *Page* para soja, com os coeficientes k' e N' , descritos em Bakker-Arkema (1999, p. 31, eq. 1.6).

$$MR = \exp (- k' \cdot t ^{ n' }) \quad (20)$$

$$ABS [\ln MR / k'] = (t)^{n'} \quad (21)$$

$$k' = 0,0333 + 0,0003 \cdot T \quad (22)$$

$$n' = 0,3744 + 0,00916 \cdot T \cdot RH \quad (23)$$

Sendo:

- t = tempo de secagem em minutos;
- T = temperatura - entre 32 at 49 $^{\circ}\text{C}$;
- RH = umidade relativa do ar de secagem - entre 34 a 65%;
- MR = razão de umidade do produto a cada instante.

Figura 1 - A equação de *Page* com os coeficientes para soja.

2.4.7 Determinação do calor específico para arroz com casca conforme *ASAE D243.4 de 2003*

$$c_p = 1,110 + 0,0448 \cdot M_{bu} \quad (24)$$

Sendo:

- M_{bu} = Teor de umidade dos grãos, base úmida, na faixa de 10,2 a 17%;
- c_p = calor específico [$\text{kJ} \cdot (\text{kg K})^{-1}$].

2.4.8 Equações e métodos para determinação do calor latente de grãos e outras variáveis

Dentre as equações disponíveis para a determinação do calor latente de grãos/sementes, a descrita em GUIMARÃES (2005, p. 32 apud BROOKER et al., 1992) foi a escolhida, como segue-se abaixo:

$$L_{sem} = (2502,2 - 2,39.T) \cdot [1 + A_3 \cdot \exp(-B_3 \cdot M_{bs})] \quad (25)$$

Sendo:

- L_{sem} = calor latente de vaporização ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$);
- T = temperatura em ($^{\circ}\text{C}$);
- M_{bs} = grau de umidade da semente, base seca (decimal);
- A_3 = 2,0692 para arroz com casca;
- B_3 = 21,739 para arroz com casca.

A vazão de ar aquecido necessária para secagem é dada pela equação (MILMAN, 2002, p. 150):

$$Q_i = 0,286 \cdot V_i \cdot \Delta T_i \quad (26)$$

Sendo:

- Q_i = quantidade de calor ($\text{kcal} \cdot \text{h}^{-1}$);
- V_i = vazão de ar ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$);
- ΔT_i = Diferença de temperatura em que o ar deve ser aquecido ($^{\circ}\text{C}$).

3 Metodologia

3.1 Materiais

Para realização do experimento de *Guimarães (2005)*, ao qual foram realizadas as medições e estabelecidas as séries de dados utilizadas nesta dissertação, é importante ressaltar que: as amostras de sementes de soja foram pré-limpas, ou seja, os materiais tais como palhas, folhas, resíduos graúdos ou miúdos, foram removidos. Essa limpeza foi realizada através de máquina de ar e peneiras, existente na Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM). Após pré-limpas, as mesmas são pesadas e o teor de umidade inicial identificado (% , bu.), no início dos ensaios laboratoriais previstos.

Apresenta-se a seguir, uma descrição, dos principais equipamentos e materiais utilizados durante o experimento de *Guimarães (2005)*, e para esta dissertação, com o objetivo de desenvolvimento do modelo matemático e de suas equações aplicadas para simular a secagem desse experimento com soja:

A - Unidade de informática (CPU);

B - software para a produção das planilhas eletrônicas: *Microsoft Excel versão 2019*, utilizado para realizar os cálculos planejados, desta dissertação;

C - formulários para registrar os resultados do experimento laboratorial;

D - secador de leite fixo (célula de secagem) laboratorial com termometria e equipamentos para oscilar a potência do exaustor e a temperatura do ar de secagem;

E - estufa e equipamentos acessórios para determinação do teor de umidade pelo método gravimétrico (BRASIL, 1992);

F - equipamentos portáteis para realização de medições: termoanemômetro digital; termômetro digital; multíteste;

G - instrumentos de medição: Higrômetro; psicrômetro; *tubo de Pitot* e/ou manômetro.

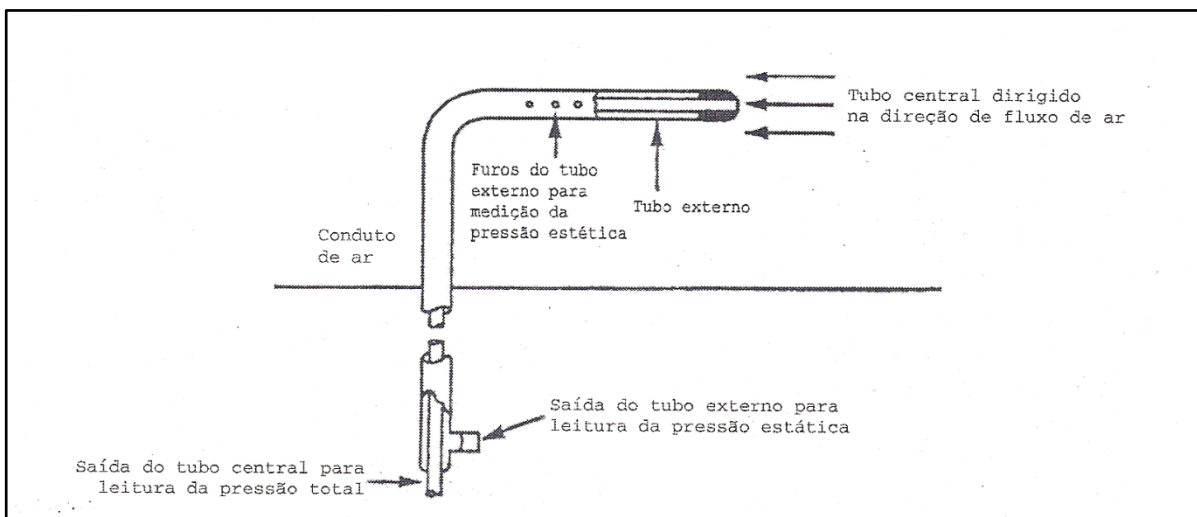


Figura 2 - *Tubo de Pitot*.
 Fonte Milman, M. J., 2003 p. 41.

Características da célula de secagem, onde os dados experimentais foram obtidos

Volume de grãos na célula de secagem: 3,252511 m³
 Tipo de grão: soja (707 kg/m³, umidade inicial; 709 kg/m³, umidade final)
 Variedade do grãos de soja: Monsoy 7575
 Peso seco de grãos: 2.306,77 kg

Número de repetições: 3

Altura da camada de grãos na célula de secagem: 1,21 m

Medidas da célula de secagem cilíndrica, corrugada:

Altura: 1,75 m
 Diâmetro: 1,85 m
 Fundo com chapa de aço perfurada na cota 0,25 m da base
 - área aberta 7,5 %, furo diâmetro 2 mm.

Ventilador centrífugo, motor 1,5 hp (IV pólos - 1720 rpm) com rotor de 400 mm de diâmetro acoplado diretamente.

Identificação dos pontos de medição na célula:

- Temperatura e grau de umidade: nas cotas (1), (2), (3), (4) e (5).
- Pressão estática/dinâmica: cotas A, B, C, D, E e F, conforme figura abaixo.

Duto de passagem de ar que conduz ar aquecido pelo fundo com chapa perfurada, composto de 6 resistências elétricas, com o objetivo de aumentar a temperatura do ar de secagem em até 5 °C. Composto de controle de temperatura com inversor de frequência e termostato.

Fonte: GUIMARÃES, 2005, p. 95-98.

Figura 3 - Características da célula de secagem utilizada no experimento de *Guimarães* (2005).

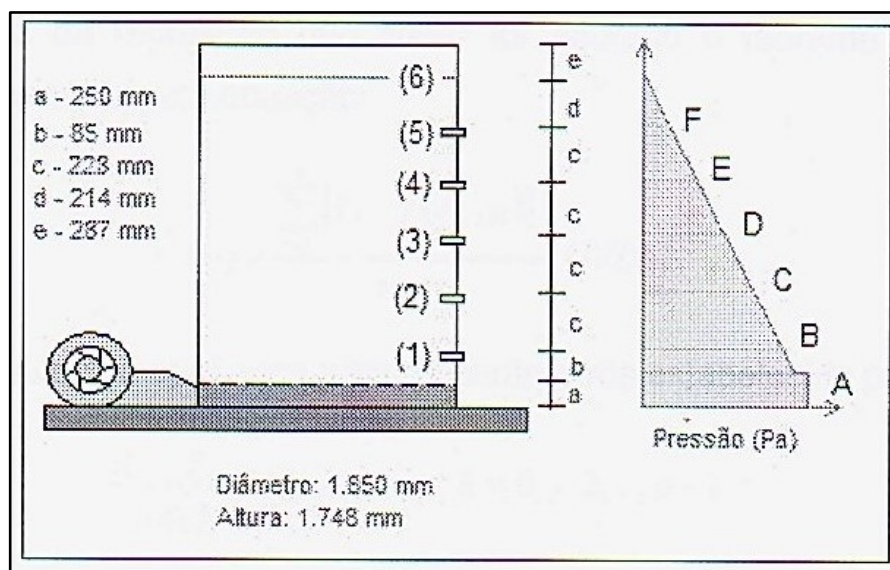


Figura 4 - Cotas dos pontos onde foram realizadas as medições na célula de secagem do experimento.

Fonte: Guimarães, 2005, p. 100.

3.2 Métodos

Estudando a série de dados experimentais de *Guimarães (2005)*, observou-se que o grau de umidade das sementes de soja *Monsoy 7575*, medidos em intervalos consecutivos nas três repetições do experimento de sua tese, apresentou forte correlação com:

- a variável “tempo de secagem”, para os instantes i_n do processo de secagem, divididos em intervalos consecutivos para as três repetições do experimento, com coeficiente de correlação linear igual a -0,97 para 40 observações;

- a variável peso específico das sementes de soja, coletadas para medição nos instantes estabelecidos do experimento. O peso específico para cada instante foi calculado por interpolação, associando-se a tabela de *Brooker et al (1973)* existente na tese de *Guimarães (2005)*, com os graus de umidade (% bu) medidos no experimento de *Guimarães (2005)*. O coeficiente de correlação linear entre o peso específico das sementes de soja, calculados por interpolação, e o grau de umidade destas, a cada instante de medição do experimento foi de -1.

Ficou estabelecido que o parâmetro inicial de referência do modelo, é o próprio grau de umidade inicial dos grãos (% bu).

Para determinação do coeficiente de correlação, utilizou-se a equação existente na lista de fórmulas do *Microsoft Excel 2019*.

Desenvolveu-se uma equação geral do modelo com as variáveis: grau de umidade a um dado instante do processo de secagem, grau de umidade inicial, tempo de secagem para o instante “i” e peso específico do grão no instante “i” do processo de secagem, para grãos e sementes, na seguinte forma (a qual, não foram encontrados trabalhos científicos em pesquisas de busca por referências bibliográficas com essa notação):

$$M_{t(i)} = M_{o(i)} - (F_i) \times (c_i) \times (\gamma_{esp.i})^{[r(M_{o(i)}; \gamma_{esp.i})]^2} \times (t_{sec.i})^{[r((M_{o(i)}; t_{sec.i})]^2} \pm D_i \pm R_i \quad (27)$$

Sendo:

- D_i, F_i = constantes;
- R_i = valor residual ajustável;
- $M_{t(i)}$ = grau de umidade do grão, a um dado instante do processo de secagem (bu; %);
- $M_{o(i)}$ = grau de umidade inicial do grão (bu; %);
- $\gamma_{esp.i}$ = peso específico do grão a um dado instante do processo de secagem (kg / m³);
- $t_{sec.i}$ = tempo de secagem para o instante “i” (horas);
- c_i = coeficiente ajustável para o tipo de grão/semente e condições de secagem. Ver explicação na seção 4.2.1 desta dissertação;
- $r(M_{o(i)}; \gamma_{esp.i})$ = coeficiente de correlação entre as variáveis $M_{o(i)}$ e $\gamma_{esp.i}$;
- $r((M_{o(i)}; t_{sec.i})$ = coeficiente de correlação entre as variáveis $M_{o(i)}$; $t_{sec.i}$.

3.2.1 Desenvolvimento do modelo

Reintera-se que, a fonte de dados, para o estudo de desenvolvimento do modelo matemático (equação 27), provém de medições experimentais em laboratório, extraídas e adaptadas aos objetivos deste trabalho. São provenientes da tese de **Guimarães (2005)**: séries de dados, cujas atividades de medições, através de coletas de informações com aparelhos, foram registradas em

intervalos de tempo, durante uma secagem de soja em camadas delgadas. Algumas dessas variáveis, apresentadas por *Guimarães (2005)*, foram observadas nesta pesquisa, com o objetivo de formular um modelo matemático, tais como: grau de umidade dos grãos, tempo de secagem, temperatura ambiente e temperatura do ar de secagem; em instantes “i.(n)”. As medições foram intercaladas em intervalos de 30 minutos cada, conforme figura 14, com três repetições (lote 1, lote 2 e lote 3).

Para o trabalho desta dissertação, considerou-se 40 observações (n) para cada variável estudada.

O modelo desenvolvido nesta dissertação, e apresentado na seção 3.2.1 deste capítulo, foi elaborado e testado, inicialmente, em função do produto ao qual o experimento de *Guimarães (2005)* foi realizado: sementes de soja *Monsoy 7575*.

No standard da *ASAE ANSI S448.2 SEP2014 (R2018)*, cujo o assunto é secagem de produtos agrícolas em camada delgada, constam recomendações para a correta realização do experimento de secagem em camadas delgadas, tais como: terminologia sobre o assunto, a correta preparação das amostras, quando iniciar o experimento no equipamento de secagem e em quais condições este deve funcionar, como as medições devem ser realizadas em função das condições higroscópicas, acuracidade dos sensores e determinação do tempo estipulado para finalizar a secagem, tal como o experimento de *Guimarães (2005)* foi realizado.

| n | LOTE / CAMADA / INSTANTE | TEOR DE UMIDADE INICIAL (bu; %) | T ambiente (°C) | T ar de secagem (°C) |
|----|--------------------------|---|---------------------------------|---------------------------|
| 1 | 1 / 6 / 1 | 12,8000 | 12,2800 | 16,53 |
| 2 | 1 / 6 / 2 | 12,8000 | 12,2800 | 16,53 |
| 3 | 1 / 6 / 3 | 12,8000 | 12,2800 | 16,53 |
| 4 | 1 / 6 / 4 | 12,8000 | 12,2800 | 16,53 |
| 5 | 1 / 6 / 5 | 12,8000 | 12,2800 | 16,53 |
| 6 | 1 / 6 / 6 | 12,8000 | 12,2800 | 16,53 |
| 7 | 1 / 6 / 7 | 12,8000 | 12,2800 | 16,53 |
| 8 | 1 / 6 / 8 | 12,8000 | 12,2800 | 16,53 |
| 9 | 1 / 6 / 9 | 12,8000 | 12,2800 | 16,53 |
| 10 | 1 / 6 / 10 | 12,8000 | 12,2800 | 16,53 |
| 11 | 1 / 6 / 11 | 12,8000 | 12,2800 | 16,53 |
| 12 | 1 / 6 / 12 | 12,8000 | 12,2800 | 16,53 |
| n | LOTE / CAMADA / INSTANTE | t(sec.),i por medição de M (t).i (horas) | γ (peso esp. grão).i (kg/m³) | M med (bu, %) |
| 1 | 1 / 6 / 1 | 0,5000 | 748,385 | 12,75 |
| 2 | 1 / 6 / 2 | 1,0000 | 748,769 | 12,7 |
| 3 | 1 / 6 / 3 | 1,5000 | 749,154 | 12,65 |
| 4 | 1 / 6 / 4 | 2,0000 | 749,615 | 12,59 |
| 5 | 1 / 6 / 5 | 2,5000 | 750,0 | 12,54 |
| 6 | 1 / 6 / 6 | 3,0000 | 750,385 | 12,49 |
| 7 | 1 / 6 / 7 | 3,5000 | 750,846 | 12,43 |
| 8 | 1 / 6 / 8 | 4,0000 | 751,231 | 12,38 |
| 9 | 1 / 6 / 9 | 4,5000 | 751,615 | 12,33 |
| 10 | 1 / 6 / 10 | 5,0000 | 752,077 | 12,27 |
| 11 | 1 / 6 / 11 | 5,5000 | 752,462 | 12,22 |
| 12 | 1 / 6 / 12 | 6,0000 | 752,846 | 12,17 |

Fonte: Guimarães 2005; e cálculo por interpolação.

Figura 5 - Condições registradas do experimento de *Guimarães (2005)* e cálculo por interpolação.

Na figura 5, apresenta-se algumas das medições registradas durante a secagem experimental de *Guimarães (2005)* para o lote 1, e resultados de simulação por interpolação da variação do peso específico das sementes de soja para os intervalos desse lote do experimento.

As pressões estática e dinâmica na massa de grãos, para determinação das vazões, são calculadas pela *equação de SHEDD (30)*, e/ou através de medições com manômetro, em cotas distanciadas simetricamente na célula de secagem, como realizado em *Guimarães (2005)*.

Durante às simulações computacionais desta dissertação, a origem das variáveis e de seus respectivos valores atribuídos (pertencentes às equações físicas aplicadas a este trabalho e através do modelo desenvolvido nesta dissertação, para determinação do “grau de umidade e do tempo de secagem, a um instante i desse processo de secagem) provieram de: dados medidos durante o experimento da tese de *Guimarães (2005)*, como também oriundos de tabelas (constante na bibliografia citada).

Assim foi realizada esta pesquisa científica, através de análise estatística preditiva, visando a formulação de equações para: determinação do grau de umidade, e do tempo de secagem necessário para atingi-lo, considerando-se a variação do peso específico desses grãos, no transcorrer desse processo de secagem. Sendo que, esta última variável, também pode ser determinada por essas equações.

4 Resultados e discussão

4.1 O Modelo matemático desenvolvido e ajustado para sementes de soja

Há excelente exatidão no modelo desenvolvido (equação 27) nesta dissertação, cuja a demonstração foi através da simulação da operação de secagem estacionária (com aquecimento suplementar) de soja *Monsoy 7575* (equação 28), considerando-se que: quando os seus coeficientes são calculados instantaneamente, o saldo residual é zero (nulo), em relação aos valores experimentais registrados e medidos através de método direto (ver figura 7) por *Guimarães (2005)*. Do mesmo modo, o modelo de *Page* (equações 12, 20, 21, 22 e 23), com os coeficientes k' e n' para soja: quando calculados a cada instante (ou seja, sem a aplicação de coeficientes médios para obtenção dos resultados), o tempo de secagem calculado também não apresenta saldo residual (figura 6). Demonstram-se nas figuras a seguir, esses resultados.

| ln MR = k' . (t)^n' - Equação de Page (equações 20, 21, 22 e 23) | | LOTE / CAMADA / INSTANTE |
|---|-----------------------------|--------------------------------|
| MR | t secagem calculado (horas) | |
| 0,82690 | 0,50 | 1 / 6 / 1 |
| 0,76836 | 1,00 | 1 / 6 / 2 |
| 0,72688 | 1,50 | 1 / 6 / 3 |
| 0,69398 | 2,00 | 1 / 6 / 4 |
| 0,66643 | 2,50 | 1 / 6 / 5 |
| 0,64260 | 3,00 | 1 / 6 / 6 |
| 0,62153 | 3,50 | 1 / 6 / 7 |
| 0,60263 | 4,00 | 1 / 6 / 8 |
| 0,58546 | 4,50 | 1 / 6 / 9 |
| 0,56972 | 5,00 | 1 / 6 / 10 |
| 0,55518 | 5,50 | 1 / 6 / 11 |
| 0,54167 | 6,00 | 1 / 6 / 12 |
| 0,80753 | 0,50 | 2 / 6 / 1 |
| 0,73969 | 1,00 | 2 / 6 / 2 |
| 0,69161 | 1,50 | 2 / 6 / 3 |
| 0,65357 | 2,00 | 2 / 6 / 4 |
| 0,62182 | 2,50 | 2 / 6 / 5 |
| 0,59446 | 3,00 | 2 / 6 / 6 |
| 0,57039 | 3,50 | 2 / 6 / 7 |
| 0,54887 | 4,00 | 2 / 6 / 8 |
| 0,52940 | 4,50 | 2 / 6 / 9 |
| 0,51163 | 5,00 | 2 / 6 / 10 |
| 0,49529 | 5,50 | 2 / 6 / 11 |
| 0,48018 | 6,00 | 2 / 6 / 12 |
| 0,46611 | 6,50 | 2 / 6 / 13 |
| 0,45297 | 7,00 | 2 / 6 / 14 |
| 0,78634 | 0,50 | 3 / 6 / 1 |
| 0,70802 | 1,00 | 3 / 6 / 2 |
| 0,65262 | 1,50 | 3 / 6 / 3 |
| 0,60897 | 2,00 | 3 / 6 / 4 |
| 0,57274 | 2,50 | 3 / 6 / 5 |
| 0,54171 | 3,00 | 3 / 6 / 6 |
| 0,51456 | 3,50 | 3 / 6 / 7 |
| 0,49044 | 4,00 | 3 / 6 / 8 |
| 0,46875 | 4,50 | 3 / 6 / 9 |
| 0,44907 | 5,00 | 3 / 6 / 10 |
| 0,43109 | 5,50 | 3 / 6 / 11 |
| 0,41454 | 6,00 | 3 / 6 / 12 |
| 0,39924 | 6,50 | 3 / 6 / 13 |
| 0,38502 | 7,00 | 3 / 6 / 14 |

Figura 6: Resultados de simulação através da equação de Page para soja.

Observa-se na figura 6: que os coeficientes k' e n' , são calculados a cada instante dos intervalos estabelecidos no experimento de *Guimarães (2005)* e que a razão de umidade, também oscila a cada instante (equações 12, 20, 21, 22 e 23).

| Lote / camada / instante | Resultado: equação 35 | | | | Resultado: equação 28 | Guimarães (2005) |
|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|---|--------------------------------|
| | $(\gamma)_i$ (kg/m ³) | (Mo) _i (bu; %) | (tsec) _i (horas) | (c) _i | (Mt) _i ¹ (bu; %) | (Mt) _i (bu; %) |
| 1 / 6 / 1 | 748,0 | 12,8000 | 3,0000 | 0,00002228 | 12,7500 | 12,7500 |
| 1 / 6 / 2 | 748,0 | 12,8000 | 9,0000 | 0,00001485 | 12,7000 | 12,7000 |
| 1 / 6 / 3 | 748,0 | 12,8000 | 18,0000 | 0,00001114 | 12,6500 | 12,6500 |
| 1 / 6 / 4 | 748,0 | 12,8000 | 30,0000 | 0,00000936 | 12,5900 | 12,5900 |
| 1 / 6 / 5 | 748,0 | 12,8000 | 45,0000 | 0,00000772 | 12,5400 | 12,5400 |
| 1 / 6 / 6 | 748,0 | 12,8000 | 63,0000 | 0,00000658 | 12,4900 | 12,4900 |
| 1 / 6 / 7 | 748,0 | 12,8000 | 84,0000 | 0,00000589 | 12,4300 | 12,4300 |
| 1 / 6 / 8 | 748,0 | 12,8000 | 108,0000 | 0,00000520 | 12,3800 | 12,3800 |
| 1 / 6 / 9 | 748,0 | 12,8000 | 135,0000 | 0,00000465 | 12,3300 | 12,3300 |
| 1 / 6 / 10 | 748,0 | 12,8000 | 165,0000 | 0,00000429 | 12,2700 | 12,2700 |
| 1 / 6 / 11 | 748,0 | 12,8000 | 198,0000 | 0,00000392 | 12,2200 | 12,2200 |
| 1 / 6 / 12 | 748,0 | 12,8000 | 234,0000 | 0,00000360 | 12,1700 | 12,1700 |
| 2 / 6 / 1 | 748,0 | 12,8000 | 3,0000 | 0,00000446 | 12,7900 | 12,7900 |
| 2 / 6 / 2 | 748,0 | 12,8000 | 9,0000 | 0,00001337 | 12,7100 | 12,7100 |
| 2 / 6 / 3 | 748,0 | 12,8000 | 18,0000 | 0,00001040 | 12,6600 | 12,6600 |
| 2 / 6 / 4 | 748,0 | 12,8000 | 30,0000 | 0,00000936 | 12,5900 | 12,5900 |
| 2 / 6 / 5 | 748,0 | 12,8000 | 45,0000 | 0,00000802 | 12,5300 | 12,5300 |
| 2 / 6 / 6 | 748,0 | 12,8000 | 63,0000 | 0,00000700 | 12,4700 | 12,4700 |
| 2 / 6 / 7 | 748,0 | 12,8000 | 84,0000 | 0,00000637 | 12,4000 | 12,4000 |
| 2 / 6 / 8 | 748,0 | 12,8000 | 108,0000 | 0,00000582 | 12,3300 | 12,3300 |
| 2 / 6 / 9 | 748,0 | 12,8000 | 135,0000 | 0,00000525 | 12,2700 | 12,2700 |
| 2 / 6 / 10 | 748,0 | 12,8000 | 165,0000 | 0,00000478 | 12,2100 | 12,2100 |
| 2 / 6 / 11 | 748,0 | 12,8000 | 198,0000 | 0,00000446 | 12,1400 | 12,1400 |
| 2 / 6 / 12 | 748,0 | 12,8000 | 234,0000 | 0,00000411 | 12,0800 | 12,0800 |
| 2 / 6 / 13 | 748,0 | 12,8000 | 273,0000 | 0,00000382 | 12,0200 | 12,0200 |
| 2 / 6 / 14 | 748,0 | 12,8000 | 315,0000 | 0,00000357 | 11,9600 | 11,9600 |
| 3 / 6 / 1 | 748,0 | 12,8000 | 3,0000 | 0,00000000 | 12,8000 | 12,8000 |
| 3 / 6 / 2 | 748,0 | 12,8000 | 9,0000 | 0,00001188 | 12,7200 | 12,7200 |
| 3 / 6 / 3 | 748,0 | 12,8000 | 18,0000 | 0,00000966 | 12,6700 | 12,6700 |
| 3 / 6 / 4 | 748,0 | 12,8000 | 30,0000 | 0,00000891 | 12,6000 | 12,6000 |
| 3 / 6 / 5 | 748,0 | 12,8000 | 45,0000 | 0,00000802 | 12,5300 | 12,5300 |
| 3 / 6 / 6 | 748,0 | 12,8000 | 63,0000 | 0,00000679 | 12,4800 | 12,4800 |
| 3 / 6 / 7 | 748,0 | 12,8000 | 84,0000 | 0,00000621 | 12,4100 | 12,4100 |
| 3 / 6 / 8 | 748,0 | 12,8000 | 108,0000 | 0,00000557 | 12,3500 | 12,3500 |
| 3 / 6 / 9 | 748,0 | 12,8000 | 135,0000 | 0,00000505 | 12,2900 | 12,2900 |
| 3 / 6 / 10 | 748,0 | 12,8000 | 165,0000 | 0,00000462 | 12,2300 | 12,2300 |
| 3 / 6 / 11 | 748,0 | 12,8000 | 198,0000 | 0,00000432 | 12,1600 | 12,1600 |
| 3 / 6 / 12 | 748,0 | 12,8000 | 234,0000 | 0,00000400 | 12,1000 | 12,1000 |
| 3 / 6 / 13 | 748,0 | 12,8000 | 273,0000 | 0,00000372 | 12,0400 | 12,0400 |
| 3 / 6 / 14 | 748,0 | 12,8000 | 315,0000 | 0,00000382 | 11,9000 | 11,9000 |

Figura 7: Resultados das equações 28 e 35.

As equações foram desenvolvidas e avaliadas nesta dissertação, com grãos de soja *Monsoy 7575*. Na figura 7, seus coeficientes c_i foram calculados a cada instante, em relação às medições de *Guimarães (2005)*.

O coeficiente C_i mostrado na figura 7, é referente à equação 35, para determinação do tempo de secagem. Os resultados da equação 28 expostos, para determinação do grau de umidade das sementes de soja, nos intervalos registrados por *Guimarães (2005)*, resultam em valores de C_i instantâneos diferentes a esses, ou seja, não são os que estão presentes nesta figura.

Obteve-se o modelo elaborado para esta dissertação em função do somatório de instantes (i) em relação ao tempo de secagem total do experimento, considerando-se as variáveis: grau de umidade médio, grau de umidade inicial da soja, tempo de secagem e peso específico dessa.

O coeficiente c_i da equação 27 que compõe o modelo, foi determinado por duas metodologias: 1) A primeira equação, considera os efeitos instantâneos e o coeficiente de correlação entre os fatores, com os dados experimentais de *Guimarães (2005)* interligado à expressão matemática. Na figura 7, constam os valores calculados do coeficiente c_i a cada instante e o resultado de M_{t_i} calculado com esse coeficiente (equações 31, 32, 34, 27 e 28 respectivamente). 2) a segunda forma, é uma média desses resultados provenientes de 40 observações (equação 28). Tendo-se o coeficiente médio c_i , basta apenas calcular os resultados em função das variáveis: grau de umidade inicial, peso específico e tempo de secagem para se obter o resultado calculado do grau de umidade a cada instante (os coeficientes aplicados, não são calculados a cada instante). Desse modo, o modelo da equação 27, adaptado para soja *Monsoy 7575* (equações 28 e 39), com seu coeficiente médio c_i calculado em função dos resultados de *Guimarães (2005)*, pode ser aplicado a simulações com essas variáveis, para estudos de monitoramento de secagem e novos projetos de equipamentos, similares à célula experimental utilizada nesse experimento.

Cálculos em planilhas eletrônicas do Microsoft Excel, foram realizados para se buscar o melhor coeficiente c_i médio para essa equação.

Observou-se graficamente na equação original, já com o coeficiente médio " c_i " estabelecido, a existência de um resíduo, constante em toda a curva. O fator 0,66 foi inserido à equação, aumentando a precisão nos resultados. Novamente, cálculos e simulações na planilha foram realizados para se determinar o valor de uma outra constante: 0,011898747530955.

O resíduo (R) que inicialmente o modelo para secagem de sementes de soja resultava, foi reduzido, avaliando-se graficamente os resultados da equação 1 (28), comparados aos resultados medidos experimentalmente. Verificou-se que havia uma simetria no resíduo do modelo (ver figura 9) em relação à curva experimental, que poderia ser reduzido com uma equação de regressão linear.

Considerando-se que o coeficiente de correlação linear mais baixo, em relação ao grau de umidade medido nos instantes estabelecidos do experimento de *Guimarães*

(2005), das variáveis que envolvem o modelo desta dissertação foi o tempo de secagem ($t_{sec.i}$). Definiu-se uma equação linear do tipo $Y = a + b.x$ (30), para determinar esse resíduo em função do tempo de secagem a cada instante dessa série de dados n . Assim o resíduo foi definido, como está descrita a equação 2 da na seção 3.3.2, que é a equação (29) desta dissertação.

Na figura 8, constam: os resultados do grau de umidade médio das sementes de soja, $M(\text{med})_i$, determinados no experimento de *Guimarães (2005)*; resultados do grau de umidade para cada instante, $M(t)_i$, do processo de secagem, calculados através da equação (28) com o coeficiente médio c_i desta, estabelecido (equações 31, 32 e 33); o resultado do resíduo para cada instante i entre $M(\text{med})_i$ e $M(t)_i$; bem como o valor do coeficiente de correlação linear entre $M(\text{med})_i$ e $M(t)_i$, valores “médios, mínimos e máximos para as colunas $M(\text{med})_i$ e $M(t)_i$ ”, para $n = 40$.

| M(med)j: Método gravimétrico (Brasil, 1992) | Resíduo: $Y_i = [M(\text{med})_i] - [M(t)_i \text{ calc}]$ | Calculando M(t)j através da equação "28" |
|--|---|--|
| M(med)j (bu, %) | Yi (bu, %) | M(t)i calculado (bu, %) |
| lote 1 12,75 % bu | 0,08 | 12,67 % bu |
| lote 1 12,70 % bu | 0,07 | 12,63 % bu |
| lote 1 12,65 % bu | 0,05 | 12,60 % bu |
| lote 1 12,59 % bu | 0,02 | 12,57 % bu |
| lote 1 12,54 % bu | 0,01 | 12,53 % bu |
| lote 1 12,49 % bu | -0,01 | 12,50 % bu |
| lote 1 12,43 % bu | -0,03 | 12,46 % bu |
| lote 1 12,38 % bu | -0,05 | 12,43 % bu |
| lote 1 12,33 % bu | -0,06 | 12,39 % bu |
| lote 1 12,27 % bu | -0,09 | 12,36 % bu |
| lote 1 12,22 % bu | -0,11 | 12,33 % bu |
| lote 1 12,17 % bu | -0,12 | 12,29 % bu |
| lote 2 12,79 % bu | 0,12 | 12,67 % bu |
| lote 2 12,71 % bu | 0,08 | 12,63 % bu |
| lote 2 12,66 % bu | 0,06 | 12,60 % bu |
| lote 2 12,59 % bu | 0,02 | 12,57 % bu |
| lote 2 12,53 % bu | 0,00 | 12,53 % bu |
| lote 2 12,47 % bu | -0,03 | 12,50 % bu |
| lote 2 12,40 % bu | -0,06 | 12,46 % bu |
| lote 2 12,33 % bu | -0,10 | 12,43 % bu |
| lote 2 12,27 % bu | -0,12 | 12,39 % bu |
| lote 2 12,21 % bu | -0,15 | 12,36 % bu |
| lote 2 12,14 % bu | -0,19 | 12,33 % bu |
| lote 2 12,08 % bu | -0,21 | 12,29 % bu |
| lote 2 12,02 % bu | -0,24 | 12,26 % bu |
| lote 2 11,96 % bu | -0,27 | 12,23 % bu |
| lote 3 12,80 % bu | 0,13 | 12,67 % bu |
| lote 3 12,72 % bu | 0,09 | 12,63 % bu |
| lote 3 12,67 % bu | 0,07 | 12,60 % bu |
| lote 3 12,60 % bu | 0,03 | 12,57 % bu |
| lote 3 12,53 % bu | 0,00 | 12,53 % bu |
| lote 3 12,48 % bu | -0,02 | 12,50 % bu |
| lote 3 12,41 % bu | -0,05 | 12,46 % bu |
| lote 3 12,35 % bu | -0,08 | 12,43 % bu |
| lote 3 12,29 % bu | -0,10 | 12,39 % bu |
| lote 3 12,23 % bu | -0,13 | 12,36 % bu |
| lote 3 12,16 % bu | -0,17 | 12,33 % bu |
| lote 3 12,10 % bu | -0,19 | 12,29 % bu |
| lote 3 12,04 % bu | -0,22 | 12,26 % bu |
| lote 3 11,90 % bu | -0,33 | 12,23 % bu |
| 495,960 = soma | -2,304 = soma | 498,264 = soma |
| 12,40 = Média | -0,06 = Média | 12,46 = Média |
| 12,80 = Maior valor | 0,13 = Maior valor | 12,67 = Maior valor |
| 11,90 = Menor valor | -0,33 = Menor valor | 12,23 = Menor valor |
| Fonte de M(med)j: Guimarães, 2005. | Coef. correlação, lote 1: 0,9998 Coef. correlação, lote 2: 0,9998 Coef. correlação, lote 3: 0,9976 | Coef. correlação "série única" os três lotes: 0,9946 (n = 40) |
| O peso específico da soja Monsoyo 7575 considerado nesta tabela, foi o extraído das séries de medições laboratoriais de Guimarães (2005). | | |

Figura 8 - Análise residual e estatística do modelo para sementes de soja *Monsoyo 7575*, equação (28).

A análise acima, apresenta resultados com seus coeficientes médios calculados.

Comparando-se os gráficos das figuras 9 e 10, verifica-se que, com a equação 2 (39), o modelo para determinação do grau de umidade em função do tempo de secagem e do peso específico, apresenta resultados com maior precisão e exatidão.

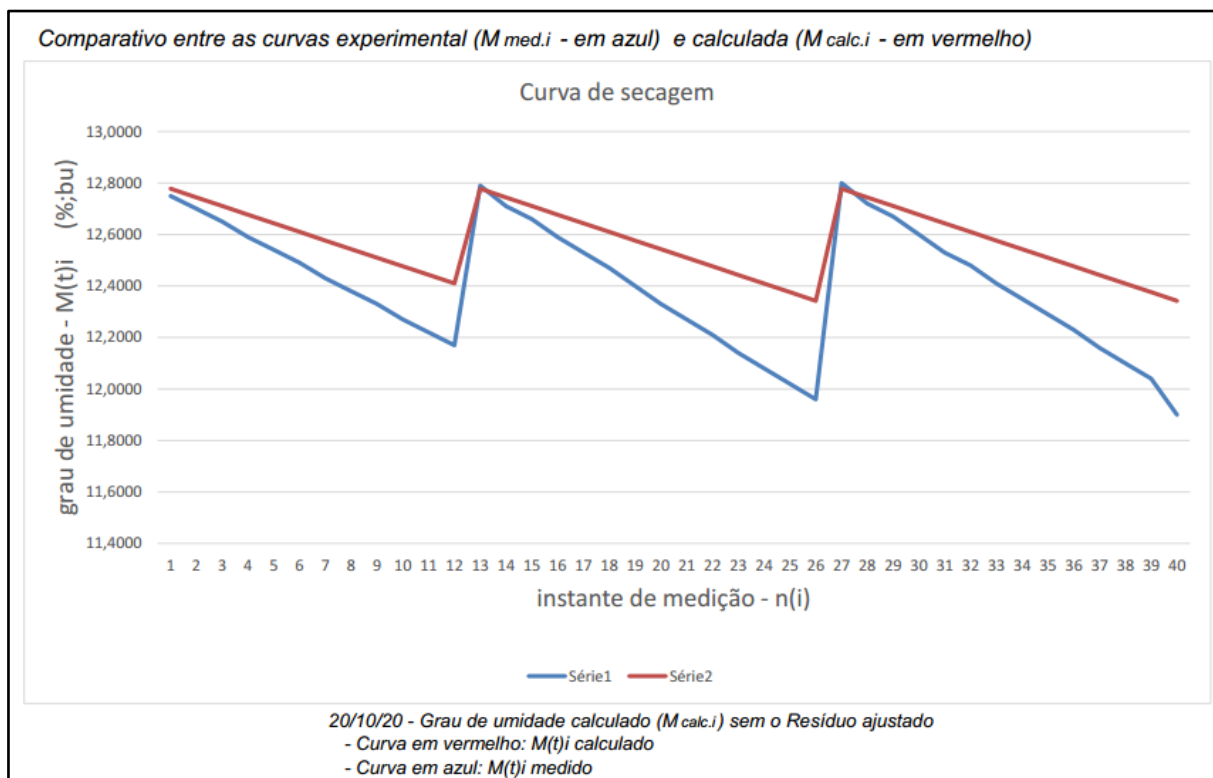


Figura 9 - Gráfico preliminar da curva de secagem, sem a equação 2 (29) de ajuste residual.

A figura 9, apresenta resultados da equação 28, curva em vermelho, considerando-se o coeficiente médio (c_i) calculados pelas equações 31, 32 e 33.

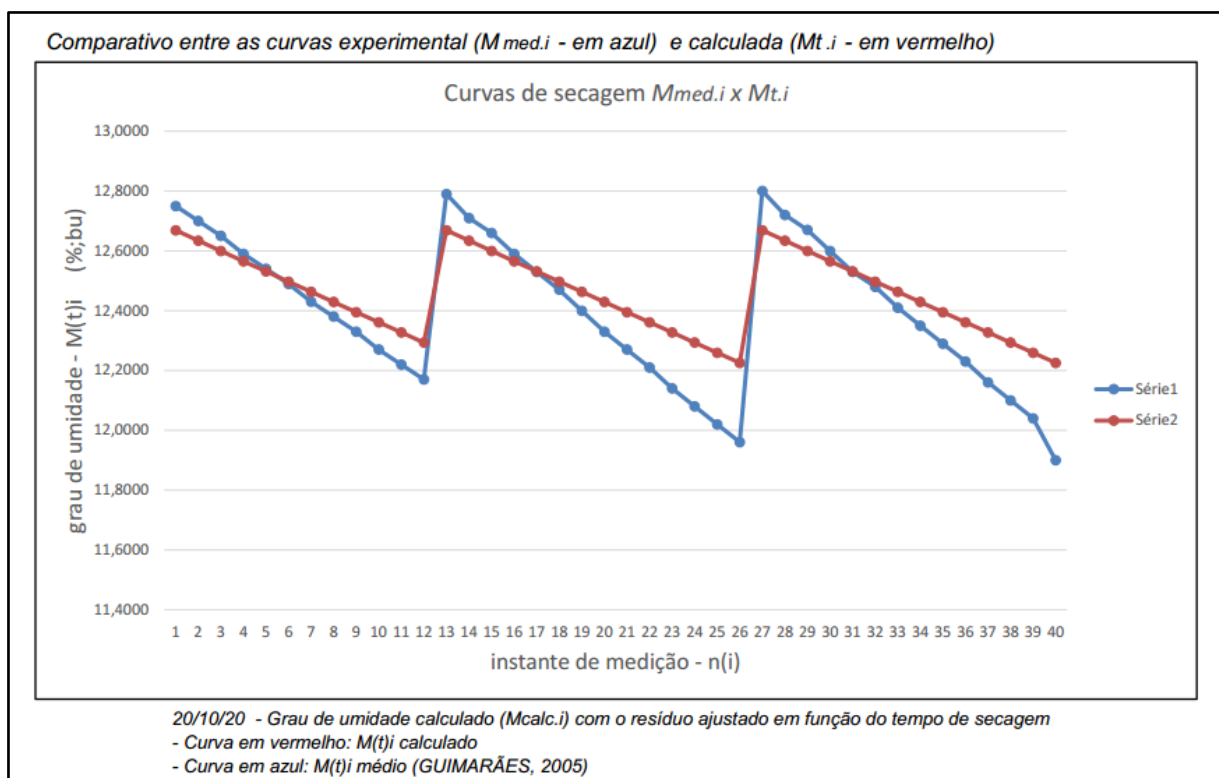


Figura 10 - Gráfico da curva de secagem com o modelo ajustado pela equação 2 (29).

A análise acima, apresenta resultados da equação 28, curva em vermelho, considerando-se o coeficiente médio (c_i).

4.2 As equações matematicamente desenvolvidas para soja

Considerando-se:

- M_{med_i} : é o grau de umidade médio da massa total de sementes para um determinado instante.

- Considerando-se $M_{med_i} = M_{t_i}$ = grau de umidade médio em um dado instante 'i' do processo de secagem.

Modelo desenvolvido nesta dissertação para soja *Monsoy 7575*, composto de duas equações com seus coeficientes médios calculados, em função da série de registros experimentais de *Guimarães (2005)*:

Equação 1 (28)

$$M_{t_i} = M_{0_i} - 0,66 \cdot (c_i) \cdot (t_{sec_i})^{(0,989595972)^2} \cdot (\gamma_i)^{(0,999993836)^2} + 0,011898747530955 + (\gamma_i)$$

Equação 2 (29)

$$\gamma_i = -0,108132711103939 - (0,00154921272444673) \cdot (t_{sec_i})$$

Requisitos:

- Faixa de variação média da umidade relativa do ar ambiente local entre: 72,50 a 84,83 %.
- Faixa de variação média de umidade relativa do ar de secagem: entre 64 a 66 %.
- Faixa de temperatura média do ar ambiente: Entre 12,28 a 22,82 °C.
- Faixa de temperatura média do ar de secagem: Entre 16,53 a 24,50 °C.
- Fluxo de ar de secagem aplicado na massa de sementes: $5.013,00 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Experimento realizado com sementes de soja, cultivar Monsoy 7575.

Sendo:

- c_i = coeficiente, médio igual a $6,82088509628621\text{E}-06$ ou a cada instante i ;
- γ_i = fator para anular o resíduo da equação 1;
- γ_i = peso específico da semente a um dado instante "i" na etapa de secagem (kg/m^3);
- t_{sec_i} = tempo de secagem a um dado instante "i" (horas);
- M_{t_i} = grau de umidade médio das camadas que compõem a massa de sementes de soja a um dado instante i , após um determinado tempo do processo de secagem (% , bu);
- M_{0_i} = grau de umidade inicial das sementes de soja ao iniciar o processo de secagem em questão (% , bu);
- constante $D = 0,011898747530955$;
- constante $F = 0,66$.

4.2.1 Determinação do coeficiente c_i da equação 1 (28) do modelo

$$c_i = \text{média de } [\Sigma(A) * \Sigma(B)].i / n \quad (31)$$

Sendo:

$$- A = \frac{(M_{0i} - M_{med_i})}{(\gamma_i) \cdot (t_{sec_i}) * (B)}; \quad (32)$$

$$- B = U \left[\frac{(M_{med_i})}{(\gamma_i)} \right] * r(M_{med_i}; \gamma_i) * U \left[\frac{(M_{med_i})}{(t_{sec_i})} \right] * r(M_{med_i}; t_{sec_i}); \quad (33)$$

- $r(M_{med_i}; t_{sec_i}); r(M_{med_i}; \gamma_i)$ = coeficientes de correlação linear entre as variáveis citadas;

- n = número de observações;

- $U \left[\frac{(M_{med_i})}{(\gamma_i)} \right]; U \left[\frac{(M_{med_i})}{(t_{sec_i})} \right]$ = são a relação média das séries de dados, entre as duas variáveis citadas (para $n = 40$).

Assim, considerando-se as 40 observações, para cada variável do modelo 1 desta dissertação, oriundas, do experimento de *Guimarães (2005)* e calculadas em planilha eletrônica, define-se que:

$$[\Sigma(A) * \Sigma(B)].i = 0,000271957;$$

para “ $n = 40$ ”, o valor de “ c_i ” utilizado é:

$$c_i = 0,000137382480135368$$

O resultado para o valor de c_i é variável, dependerá das características das variáveis estudadas na equação 1 (28) do modelo para sementes de soja *Monsoy 7575*.

Considerando-se a determinação do coeficiente c_i , equação 31, sendo calculado para cada instante i da simulação, a equação 33, fica alterada para:

$$B = \left[\frac{(M_{med_i})}{(\gamma_i)} \right] * r(M_{med_i}; \gamma_i) * \left[\frac{(M_{med_i})}{(t_{sec_i})} \right] * r(M_{med_i}; t_{sec_i}); \quad (34)$$

4.3 Classificação do modelo desenvolvido para soja

O modelo para determinação do grau de umidade/tempo de secagem/peso específico do grão, desenvolvido nesta dissertação, caracteriza-se como semiempírico, pois utiliza informações experimentais de *Guimarães (2005)* e uma tabela da literatura para determinar o coeficiente " c_i ", a constante e a equação 2 para correção. Outras simulações seriam necessárias, para relatar, como a equação (27) comportar-se-ia para cada tipo de grão ou semente. O valor do coeficiente " c_i ", das constantes e a fórmula da equação 2, necessitam serem recalculados, considerado-se as condições específicas do processo de secagem, tais como: o tipo de grão/semente/cultivar, as condições psicrométricas do ambiente e do equipamento de secagem.

4.4 Simulação do tempo de secagem através das equações 28 e 29

Explicitando-se o tempo de secagem (t_{sec_i}) na equação 28 do modelo, e considerando-se que o resultado do numerador da fração, deve ser absoluto, chegamos à seguinte expressão, considerando-se os coeficientes médios C_i , D , F calculados da equação 28:

$$t_{sec_i} = \left\{ \frac{|(M_{t_i}) - (M_{0_i}) - (D) - (y_i)|}{0,66 \cdot [c_i \cdot (\gamma_i)^{(0,999993836)^2}]} \right\} \left[\frac{1}{(0,9895959)^2} \right] \quad (35)$$

Sendo:

- y_i = equação para reduzir o resíduo (equação 29) da equação 35 acima.

Na figura 11 a seguir, observa-se uma simulação, utilizando-se a equação 35, e considerando-se as medições provenientes dos lotes 1, 2 e 3 do experimento de *Guimarães (2005)*; através de 40 observações para cada variável dessa equação, descritas na figura 7, são gerados 40 resultados calculados.

| Lote / camada / instante | Tempo de secagem registrado (horas) | Resíduo (horas) | Tempo de secagem calculado (horas) | Grau de umidade - M.med.i (bu, %) |
|--|--|------------------------|---|---|
| 1 / 6 / 1 | 0,50 | -0,19 | 0,69 | 12,7500 |
| 1 / 6 / 2 | 1,00 | 0,97 | 0,03 | 12,7000 |
| 1 / 6 / 3 | 1,50 | 0,74 | 0,76 | 12,6500 |
| 1 / 6 / 4 | 2,00 | 0,36 | 1,64 | 12,5900 |
| 1 / 6 / 5 | 2,50 | 0,13 | 2,37 | 12,5400 |
| 1 / 6 / 6 | 3,00 | -0,11 | 3,11 | 12,4900 |
| 1 / 6 / 7 | 3,50 | -0,50 | 4,00 | 12,4300 |
| 1 / 6 / 8 | 4,00 | -0,74 | 4,74 | 12,3800 |
| 1 / 6 / 9 | 4,50 | -0,98 | 5,48 | 12,3300 |
| 1 / 6 / 10 | 5,00 | -1,37 | 6,37 | 12,2700 |
| 1 / 6 / 11 | 5,50 | -1,61 | 7,11 | 12,2200 |
| 1 / 6 / 12 | 6,00 | -1,85 | 7,85 | 12,1700 |
| 2 / 6 / 1 | 0,50 | -0,79 | 1,29 | 12,7900 |
| 2 / 6 / 2 | 1,00 | 0,89 | 0,11 | 12,7100 |
| 2 / 6 / 3 | 1,50 | 0,89 | 0,61 | 12,6600 |
| 2 / 6 / 4 | 2,00 | 0,36 | 1,64 | 12,5900 |
| 2 / 6 / 5 | 2,50 | -0,02 | 2,52 | 12,5300 |
| 2 / 6 / 6 | 3,00 | -0,41 | 3,41 | 12,4700 |
| 2 / 6 / 7 | 3,50 | -0,95 | 4,45 | 12,4000 |
| 2 / 6 / 8 | 4,00 | -1,49 | 5,49 | 12,3300 |
| 2 / 6 / 9 | 4,50 | -1,88 | 6,38 | 12,2700 |
| 2 / 6 / 10 | 5,00 | -2,27 | 7,27 | 12,2100 |
| 2 / 6 / 11 | 5,50 | -2,81 | 8,31 | 12,1400 |
| 2 / 6 / 12 | 6,00 | -3,20 | 9,20 | 12,0800 |
| 2 / 6 / 13 | 6,50 | -3,59 | 10,09 | 12,0200 |
| 2 / 6 / 14 | 7,00 | -3,98 | 10,98 | 11,9600 |
| 3 / 6 / 1 | 0,50 | -0,94 | 1,44 | 12,8000 |
| 3 / 6 / 2 | 1,00 | 0,74 | 0,26 | 12,7200 |
| 3 / 6 / 3 | 1,50 | 1,04 | 0,46 | 12,6700 |
| 3 / 6 / 4 | 2,00 | 0,51 | 1,49 | 12,6000 |
| 3 / 6 / 5 | 2,50 | -0,02 | 2,52 | 12,5300 |
| 3 / 6 / 6 | 3,00 | -0,26 | 3,26 | 12,4800 |
| 3 / 6 / 7 | 3,50 | -0,80 | 4,30 | 12,4100 |
| 3 / 6 / 8 | 4,00 | -1,19 | 5,19 | 12,3500 |
| 3 / 6 / 9 | 4,50 | -1,58 | 6,08 | 12,2900 |
| 3 / 6 / 10 | 5,00 | -1,97 | 6,97 | 12,2300 |
| 3 / 6 / 11 | 5,50 | -2,51 | 8,01 | 12,1600 |
| 3 / 6 / 12 | 6,00 | -2,90 | 8,90 | 12,1000 |
| 3 / 6 / 13 | 6,50 | -3,29 | 9,79 | 12,0400 |
| 3 / 6 / 14 | 7,00 | -4,89 | 11,89 | 11,9000 |
| Somas: | 144,00 | -42,46 | 186,46 | 495,96 |
| Médias: | 3,60 | -1,06 | 4,66 | 12,40 |
| Desvio padrão médio: | 1,95 | 1,49 | 3,34 | 0,24 |
| Valor da Correlação (t.sec. reg. ; t.sec. calc.).i = | | | 0,980 | |

Figura 11 - Tempos de secagem registrados por *Guimarães (2005)* e calculados pela equação 35.

Os valores inseridos na equação 35, provém do coeficiente médio c_i , e y_i da equação 29. Simulando-se com a equação (35), os 40 resultados calculados de tempo

de secagem, alcançaram um coeficiente de correlação linear igual a 0,98 em relação aos registrados por *Guimarães (2005)*.

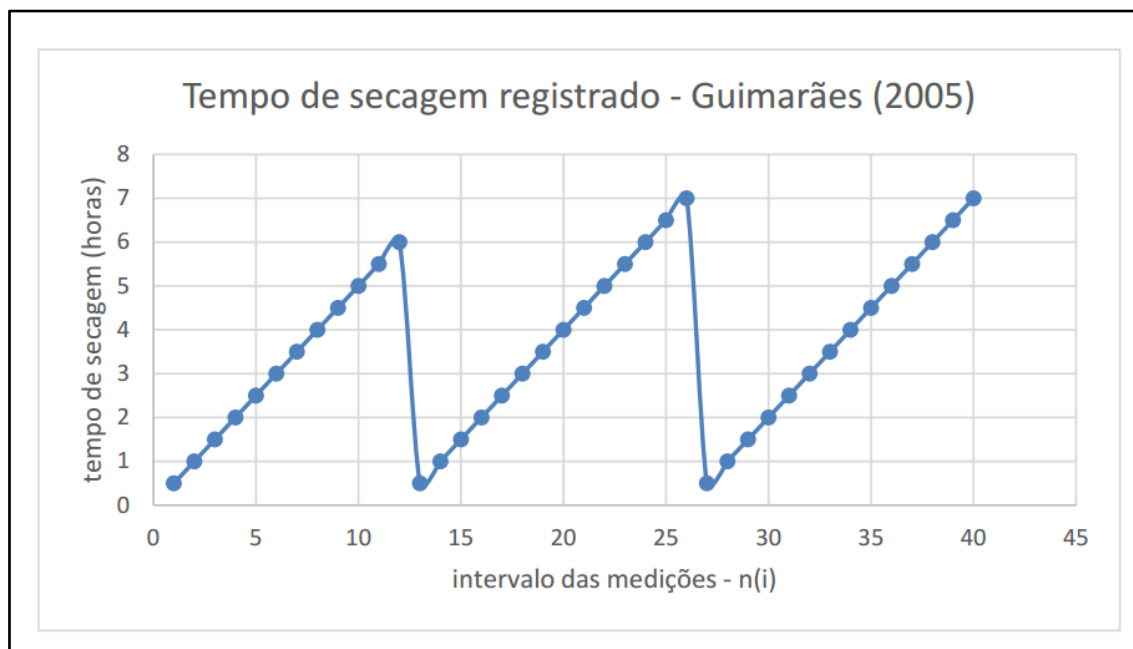


Figura 12 - Representação gráfica do tempo de secagem, considerado, proveniente do experimento de *Guimarães (2005)*.

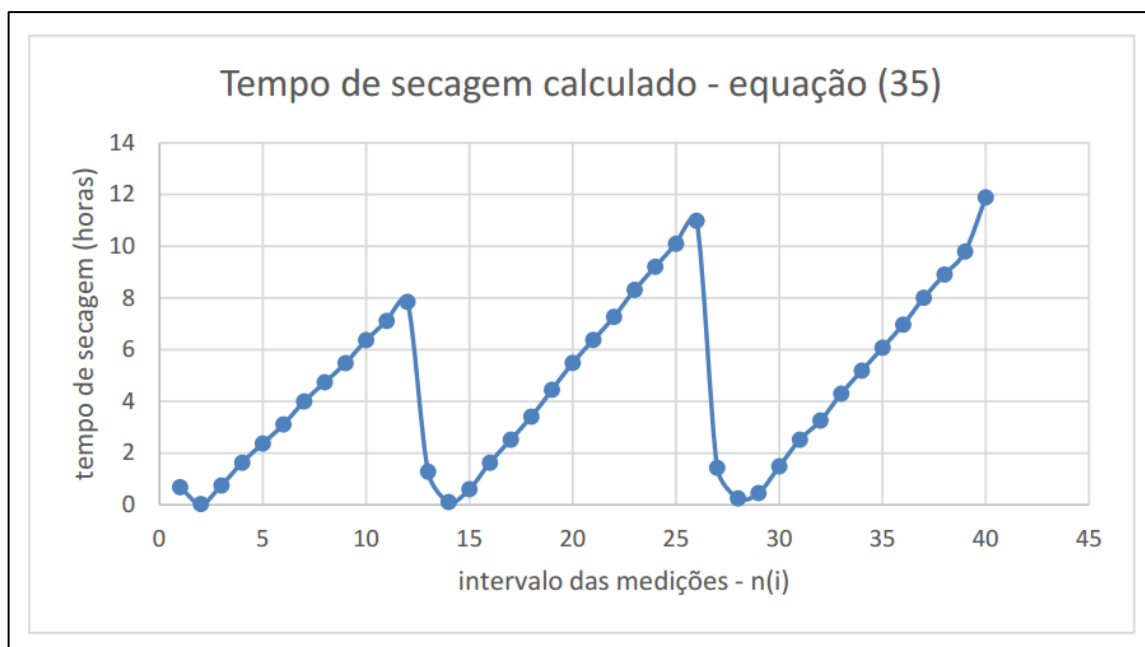


Figura 13 – Representação gráfica dos instantes calculados com a equação (35), em relação ao tempo de secagem total.

Os gráficos das figuras 12 e 13, são obtidos com os resultados da equação 35, a qual, possui seus coeficientes médios calculados (não instantâneos), logo, um saldo

residual é observado, porém previsível. Observa-se os instantes do tempo de secagem registrado por *Guimarães (2005)*, para realizar as medições durante o experimento e o tempo de secagem calculado para esses instantes, com a equação 35.

É importante ressaltar que a equação 35, provém da seguinte equação geral:

$$t_{sec\ i} = \left\{ \frac{|(M_{t_i}) - (M_{0_i}) - (D)|}{0,66 \cdot [c_i \cdot (\gamma_i)^{(r_2)^2}]} \right\} \left[\frac{1}{(r_1)^2} \right] \quad (36)$$

Sendo:

- $r_1 = 0,989595972$, o coeficiente de correlação entre $t_{sec\ i}$ e $M_{med.i}$

- $r_2 = 0,999993836$, o coeficiente de correlação entre γ_i e $M_{med.i}$

Observa-se na equação acima, a não existência da variável y_i .

Com o intuito de reduzir o resíduo gerado na equação 35, pode-se determinar y_i em função do grau de umidade (bu, %). Desconsiderando-se a equação 29, ao qual o tempo de secagem é a variável independente. Assim, a equação é definida como:

$$t_{i\ sec} = \left\{ \frac{|(M_{t_i}) - (M_{0_i}) - (D)|}{0,66 \cdot [c_i \cdot (\gamma_i)^{(0,999993836)^2}]} \right\} \left[\frac{1}{(0,989595972)^2} \right] + y_{M_t} - y_{n_i} \quad (37)$$

$$y_{M_t} = -2,56592254710275 - 0,00135387320497176 \cdot (M_{t_i}) \quad (38)$$

$$y_{n_i} = -0,00835325616980257 + 0,000407475910722092 \cdot (n_i) \quad (39)$$

Simulações foram realizadas com as equações 37 e 38 para sementes de soja Monsoy 7575. O resumo dos resultados são apresentados na figura 14.

| Tempo de secagem calculado (sem a equação 39) equação 38 (horas) | Tempo de secagem registrado Guimarães (2005) (horas) | Tempo de secagem calculado (sem a equação 39) equação 37 (horas) |
|---|--|---|
| Soma = 144,0 | Soma = 144,0 | Soma = 247,3083688 |
| média = 3,60 | média = 3,60 | média = 6,18 |
| correlação = 0,9948 | | correlação = 0,9948 |
| Número de observações = 40 | Número de observações = 40 | Número de observações = 40 |
| As correlações apresentadas são entre os valores calculados e os registrados por Guimarães (2005) | | |
| Fonte: Planilha Microsoft Excel 2019 \ Modelo 2020 \ célula EG 54 | | |

Figura 14: Resultados das equações 37 e 38, para a determinação do tempo de secagem da soja.

Observando-se as médias existentes na figura 14, uma constante G , para redução do resíduo, foi determinada e utilizada junto com a equação 39. O valor da constante G é 1,72047323626105.

Assim o resultado da equação 37/38/39 (p. 53), pode ser dividido pela constante G :

$$t_{sec_i} = \frac{t_{sec_i} \text{ (da equação 37/38/39.)}}{G} \quad (40)$$

Os resultados apresentados nas figuras 11, 14 e 17 podem ser comparados aos da figura 15, a qual, provém da equação 40.

| |
|---|
| <hr/> |
| <p>Tempo de secagem calculado com a equação 40 (horas)</p> |
| <hr/> |
| <p>Soma = 144,0 média = 3,60 correlação = 0,9947 desvio padrão = 2,13</p> |
| <p>Valor da constante G no denominador = 1,72 Número de resultados calculados = 40</p> |
| <hr/> |
| <p>A correlação apresentada é entre os valores calculados e os registrados por Guimarães (2005)</p> |

Figura 15: Análise estatística dos resultados da equação 40.

Na figura 16, constam os gráficos dos tempos de secagem calculados com as equações 37, 38 e os instantes registrados de tempo de secagem, os quais, as medições do grau de umidade médio - M_{med} , foram realizadas no experimento de *Guimarães (2005)*.

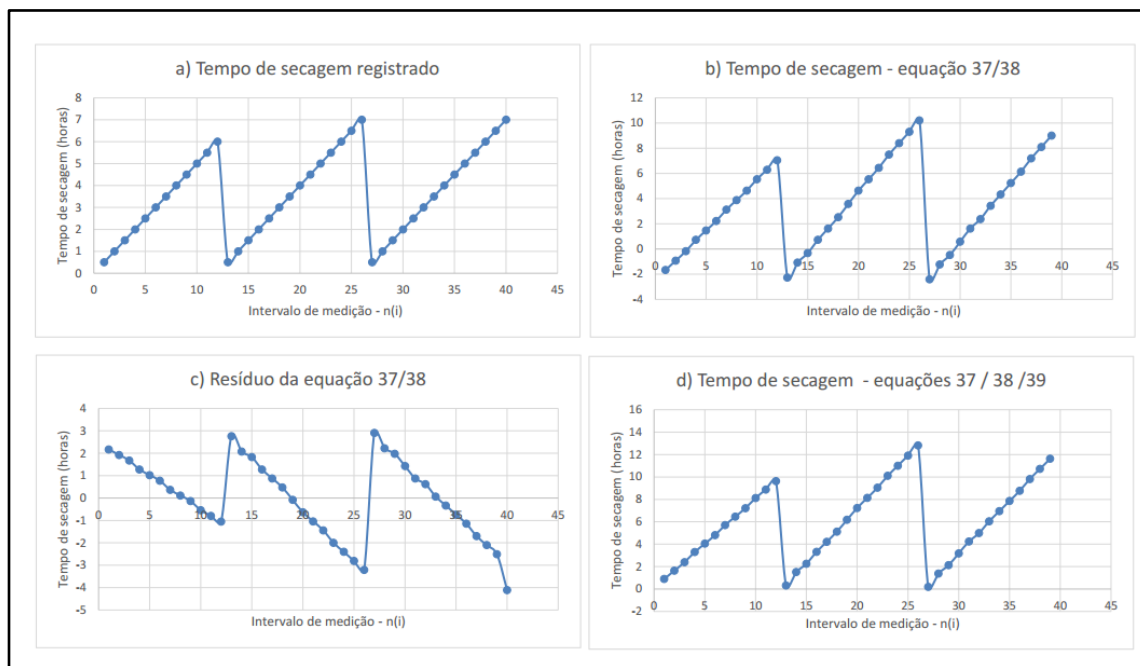


Figura 16: Gráficos das equações 37, 38 e 39 comparados aos tempos registrados no experimento de *Guimarães (2005)*.

Na figura 16, observa-se que os resultados dessas equações, são comparados aos tempos estabelecidos e registrados no experimento de *Guimarães (2005)*, para realização das medições. O resíduo negativo das equações 37 e 38 é reduzido com a equação 39.

No gráfico da figura 16, verifica-se a inserção da equação 39 (p. 53), para determinação do tempo de secagem, juntamente com as equações 37 e 38. Os resultados das equações 37 e 38, não mostraram-se plenamente satisfatórios, assim, os resultados do tempo de secagem, aos quais resultaram em valores negativos em alguns instantes, foram ajustados para valores positivos e o coeficiente de correlação, entre o tempo de secagem registrado (*GUIMARÃES, 2005*) e o calculado, reduziu de 0,9948 para 0,9947, Porém, com a equação 39, a média simples para as 40 observações, aumentou para “6,18” horas por instante de medição, enquanto que a média de tempos de secagem registrados (figura 14) extraídos desse experimento, é “3,60” horas. Os valores de peso específico utilizados, foram os registrados em *Guimarães (2005)*, porém, apresentam-se como números inteiros. Por interpolação, como consta na figura 5, o peso específico em relação ao grau de umidade, apresenta resultados com maior variação a cada instante, considerando-se que os valores são com 3 casas decimais.

Assim, na equação 35 (figura 11), se o peso específico considerado fosse com 3 casas decimais, o tempo de secagem calculado a cada instante, seria menor, provavelmente. Como também os tempos de secagem calculados com as equações 38 e 37, apresentados na figura 13 e na figura 16.

| Tempo de sec. calculado (equação 37 e 38) | Tempo de sec. registrado (GUIMARÃES, 2005) | Tempo de sec. calculado (equação 37) |
|--|---|--|
| - 1,6718 h | 0,50 h | 0,9113 h |
| - 0,9262 h | 1,0 h | 1,6569 h |
| - 0,1777 h | 1,50 h | 2,4054 h |
| 0,7227 h | 2,0 h | 3,3057 h |
| 1,4742 h | 2,50 h | 4,0571 h |
| 2,2264 h | 3,0 h | 4,8092 h |
| 3,1296 h | 3,50 h | 5,7123 h |
| 3,8826 h | 4,0 h | 6,4652 h |
| 4,6357 h | 4,50 h | 7,2183 h |
| 5,5395 h | 5,0 h | 8,1220 h |
| 6,2926 h | 5,50 h | 8,8750 h |
| 7,0456 h | 6,0 h | 9,6280 h |
| - 2,2642 h | 0,50 h | 0,3190 h |
| - 1,0756 h | 1,0 h | 1,5075 h |
| - 0,3276 h | 1,50 h | 2,2555 h |
| 0,7227 h | 2,0 h | 3,3057 h |
| 1,6246 h | 2,50 h | 4,2075 h |
| 2,5274 h | 3,0 h | 5,1102 h |
| 3,5813 h | 3,50 h | 6,1641 h |
| 4,6357 h | 4,0 h | 7,2183 h |
| 5,5395 h | 4,50 h | 8,1220 h |
| 6,4432 h | 5,0 h | 9,0256 h |
| 7,4973 h | 5,50 h | 10,0797 h |
| 8,4006 h | 6,0 h | 10,9829 h |
| 9,3035 h | 6,50 h | 11,8857 h |
| 10,2061 h | 7,0 h | 12,7882 h |
| - 2,4110 h | 0,50 h | 0,1723 h |
| - 1,2249 h | 1,0 h | 1,3582 h |
| - 0,4773 h | 1,50 h | 2,1057 h |
| 0,5725 h | 2,0 h | 3,1555 h |
| 1,6246 h | 2,50 h | 4,2075 h |
| 2,3769 h | 3,0 h | 4,9597 h |
| 3,4307 h | 3,50 h | 6,0135 h |
| 4,3344 h | 4,0 h | 6,9171 h |
| 5,2382 h | 4,50 h | 7,8208 h |
| 6,1420 h | 5,0 h | 8,7244 h |
| 7,1962 h | 5,50 h | 9,7786 h |
| 8,0995 h | 6,0 h | 10,6818 h |
| 9,0026 h | 6,50 h | 11,5848 h |
| 11,1082 h | 7,0 h | 13,6902 h |
| Soma = 144,0 | Soma = 144,0 | Soma = 247,308 |
| média = 3,60 | média = 3,60 | média = 6,183 |
| correlação = 0,9948 | | correlação = 0,9948 |
| desvio padrão = 3,65 | desvio padrão = 1,95 | desvio padrão = 3,65 |

Figura 17: Comparativo entre os tempos de secagem calculados e registrados por *Guimarães (2005)*.

| Tempo de secagem calculado | |
|--|--|
| com a equação 40 | |
| (horas) | |
| 0,52 | |
| 0,95 | |
| 1,39 | |
| 1,91 | |
| 2,35 | |
| 2,79 | |
| 3,32 | |
| 3,75 | |
| 4,19 | |
| 4,72 | |
| 5,16 | |
| 5,60 | |
| 0,19 | |
| 0,88 | |
| 1,31 | |
| 1,92 | |
| 2,45 | |
| 2,97 | |
| 3,59 | |
| 4,20 | |
| 4,73 | |
| 5,25 | |
| 5,87 | |
| 6,39 | |
| 6,92 | |
| 7,44 | |
| 0,11 | |
| 0,80 | |
| 1,24 | |
| 1,85 | |
| 2,46 | |
| 2,90 | |
| 3,51 | |
| 4,04 | |
| 4,56 | |
| 5,09 | |
| 5,70 | |
| 6,23 | |
| 6,75 | |
| 7,98 | |
| Soma = 144,0 | |
| média = 3,60 | |
| correlação = 0,9947 | |
| desvio padrão = 2,13 | |
| Valor da constante G = 1,720473236261050 | |

Figura 18: Resultados calculados com a equação 40.

A equação 39, foi desenvolvida especificamente para os resultados do experimento de *Guimarães (2005)*. Se a equação 37 for testada com séries de dados

não pertencentes a esse experimento, sugere-se não utilizar a equação 39. Se apresentar resultados negativos no tempo de secagem em alguns instantes, recomenda-se incluir uma equação similar à 39, com novos coeficientes ajustados à nova série de dados, então, a equação 40 poderia ser utilizada, recalculando-se o valor da constante G.

Considerando-se as equações 26 e 27 desta dissertação, pode-se deduzir a equação 41, para determinar a quantidade de calor a ser extraída, para reduzir o grau de umidade inicial $M_{0(i=0)}$ de grãos/sementes, até determinado grau de umidade $M_{t(i=i_f)}$. Porém, a equação 41 necessita ser ajustada, através de análise estatística das variáveis componentes, para determinação: de seu coeficiente " h_i ", de suas constantes 'k' e ' j_i ' e da equação de redução do resíduo R_i (se houver):

$$\sum_{i=0}^{i_f} Q_i = \sum_{i=0}^{i_f} k \cdot (h_i) \cdot (M_{o_i} - M_{t_i})^{[r(M_{o_i} - M_{t_i}) ; Q_i]} \pm j_i \pm R_i$$

(41)

Sendo:

- h_i = coeficiente, calculado de forma similar a metodologia indicada para determinação do coeficiente c_i na seção 4.2.1 (equação 28) desta dissertação;

- k ; j_i = constantes, determinadas de forma similar às constantes D e F, da equação 28, cuja a descrição consta na página 44 desta dissertação;

- $\{r[(M_{o_i} - M_{t_i}); Q_i]\}$ = coeficiente de correlação linear entre as variáveis " $(M_o - M_i)$ " e Q_i ;

- M_{o_i} = grau de umidade ao iniciar a operação de secagem (% , bu);

- M_{t_i} = grau de umidade a um dado instante (i) da operação de secagem em questão (% , bu);

- i_f = instante final da operação de secagem (h);

- Q_i = quantidade de calor a ser extraída do grão para atingir o grau de umidade a um instante i de uma operação de secagem ($kcal \cdot h^{-1}$).

5 Conclusões

A simulação da secagem de soja Monsoy 7575, com a equação 27, tendo seus coeficientes calculados a cada instante em relação ao experimento de *Guimarães (2005)*, apresentou resultados satisfatórios, com saldo residual igual a zero.

A equação 27 desenvolvida, pode ser testada em outros grãos ou sementes, utilizando-se a mesma metodologia preditiva aplicada para determinar as equações para soja, definidas neste trabalho. Pois, de um modo geral, apresenta boa correlação entre as variáveis, necessitando apenas o ajuste do coeficiente c_i , das constantes " D_i " e " F_i " e do resíduo " R_i ", com o auxílio de planilha eletrônica.

O grau de umidade determinado através da equação 28, do modelo matemático desenvolvido nesta dissertação, com seu coeficiente médio c_i , apresentou resultados satisfatórios, com coeficiente de correlação igual a 0,995 em relação aos valores registrados por *Guimarães (2005)*, assim como, o tempo de secagem calculado, apresentou resultados satisfatórios, através das equações 37/38, 37/38/39 e 40, aos quais apresentaram coeficiente de correlação igual a 0,9948, 0,9947 e 0,9947 respectivamente, em relação aos valores registrados por *Guimarães (2005)*.

Referências

AGRAWAL Y. C., SINGH R. P. **Thin Layer Drying Studies on Short-grain Rough Rice**. Paper presented at 1977 Winter meeting of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE) Chicago/IL. **ASAE PAPER N° 77-3531 13 p., 1977.**

ANSI/ASAE (American Society of Agricultural Engineers). **Density, specific gravity, and mass-moisture relationships of grain for storage. Standards of the ASAE**, S. Joseph, **ANSI/ASAE D241.4 FEB03, 4 p., 2003.**

ANSI/ASABE (American Society of Agricultural Engineers). **Grain Bin Access Design Safety standard**. Standards of the ASABE, S. Joseph, **ANSI/ASABE S624 AUG2018.**

ANSI/ASABE (American Society of Agricultural Engineers). **Moisture Relationships of Planted-based Agricultural Products** . Standards of the ASABE, S. Joseph, **ANSI/ASABE D245.5 OCT1995 (R2001).**

ANSI/ASAE (American Society of Agricultural Engineers). **Thermal Properties of Grain and Grain Products. Standards of the ASAE**, S. Joseph, **ANSI/ASAE D243.4 MAY03, 4 p., 2003.**

ANSI/ASAE (American Society of Agricultural Engineers). **Thin-Layer drying of Agricultural Crops. Standards of the ASAE**, S. Joseph, **ANSI/ASAE S.448.2 SEP2014 (R2018ED).**

ASAE (American Society of Agricultural Engineers). **Resistance to air flow of grain, seeds, others agricultural products, and perforated metal sheets standard** . S. Joseph, **ASAE D272.3DEC01 8 p., 2001.**

ASAE - American Society of Agricultural Engineers. **Technical publications for Agricultural Equipment**. Standard of the ASABE. S. Joseph/MI (USA): **Standard ASAE EP363.1 FEB03, 2 p., 2003.**

BAKKER-ARKEMA, F. W., BAERDEMAEKER, D. J., AMIRANTE, P., RUIZ-ALTISENT, M., STUDMAN, C. J. **CIGR Handbook of Agricultural Engineering Vol. IV Agro-processing engineering**. CIGR - The International Commission of Agricultural Engineering, 1999. 512 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Departamento Nacional de Defesa Vegetal. Coordenação de Laboratório Vegetal. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF. 2009.

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

CARVALHO, N. M. **A secagem de sementes**. 1ª ed. Jaboticabal: FUNEP, 1994. 165 p.

DIGERATI COMUNICAÇÕES E TECNOLOGIA LTDA. **Treinamento avançado em excel**. 1ª. ed. SÃO PAULO: Digerati Books, 2004. 96 p.

ELIAS, M. C. **Manejo tecnológico da secagem e do armazenamento de grãos**. 1. ed. Santa Cruz, Pelotas, 2008. v. 1. 368 p.

ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M.; SCHIAVON, R. A. **Qualidade de Arroz na Pós-Colheita: Ciência, Tecnologia e Normas**. 1. ed. Pelotas: Santa Cruz, 2012. v. 1. 906 p.

ELIAS, M.C. **Pós-colheita, industrialização e qualidade de arroz**. Pelotas: Ed. Universitária UFPEL, 2007. 422p.

ESAU, K. **Anatomia das plantas e sementes**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1993. 261 p.

GUIMARÃES, D. S. **Desenvolvimento de módulo computacional para a secagem estacionária de sementes**. 2005 165 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2005.

LASSERAN, Jean-Claude. **Aeração de grãos**. Viçosa: Série CENTREINAR (Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem) n. 2, 1981. 128 p.

LORINI, I.; MIKE, L.I.; SCUSSEL, V. M.; FARONI, L.R.A. **Armazenagem de Grãos**. 2. ed. Jundiaí: Instituto Bio Geneziz, 2018. v. 1. 1011 p.

MENEGHETTI, V. L. **Parâmetros industriais e qualidade de consumo do arroz na secagem e no armazenamento**. 2008. M541p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008.

MILMAN, M. J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. 1ª. ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária/UFPEL, 2002. 206 p.

MOIA, M., GUAITA, M. **Mechanical properties of granular agricultural materials, part 2. Transactions of the ASABE**. S. Joseph/MI (USA): Manuscript number SE 5169, 12 p., 2006.

NISKIER J. e MACINTYRE A. J. **Instalações elétricas**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (LTC), 1996. 522 p.

PERES, W.B. GUIMARÃES, D.S.; POHNDORF, R.S.; ELIAS, M.M.; Bases científicas e tecnológicas na aeração de grãos. In: ELIAS, M.C. & OLIVEIRA, M. (Editores) Sistema Nacional de Certificação de Unidades Armazenadoras de Grãos e Fibras: Tecnologia e Legislação. p. 259-332. Ed. Santa Cruz, 2010.

SANDRONI, P.. **Dicionário de economia do século XXI**. Rio de Janeiro: Editora Record de serviços de imprensa S.A., 2005. 905 p.

SILVA, J. de S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 1 ed. Viçosa - MG: Editora Aprenda Fácil, 2000. 502 p.

SILVA, L.C. **Grãos: métodos de conservação**. Espírito Santo: Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Rural, 2005. (Boletim técnico: AG: 08/05).

VERLAG, G. **Manual de fórmulas técnicas**. 4ª ed. Germering: Hemus editora limitada, p. S14-S15, 1990.

WILHELM, L.R., SUTER D. A. and BRUSEVITZ, G. H. **Food and process engineering technology**. American Society of Agricultural Engineers (ASAE), S. Joseph, chapter 2, p. 23-52, 2005.

YANG, W. e JIA, C. **Glass transition mapping inside a rice kernel.** Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), S. Joseph, Vol. 47(6), 2009-2015.

ZUCOLOTTO, V.A.C. **Modelagem e simulação de secagem em baixa temperatura para arroz com casca.** 2019. 101f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre – ES. 2019.