



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS**

ANA CARLA ZUCOLOTTO VENTURIN

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SECAGEM EM BAIXA TEMPERATURA PARA
ARROZ COM CASCA**

**ALEGRE - ES
FEVEREIRO - 2019**

ANA CARLA ZUCOLOTTO VENTURIN

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SECAGEM EM BAIXA TEMPERATURA PARA
ARROZ COM CASCA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Luís César da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Henriques Saraiva
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Raquel Vieira de Carvalho

ALEGRE - ES
FEVEREIRO - 2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

Z94m Zucolotto Venturin, Ana Carla, 1993-
Modelagem e simulação de secagem em baixa temperatura para arroz com casca / Ana Carla Zucolotto Venturin. - 2019. 101 f. : il.

Orientador: Luís César da Silva.

Coorientadores: Sérgio Henriques Saraiva, Raquel Vieira de Carvalho.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Modelos matemáticos. 2. Alimentos. 3. Arroz - Secagem. I. da Silva, Luís César. II. Saraiva, Sérgio Henriques. III. Vieira de Carvalho, Raquel. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 664

ANA CARLA ZUCOLOTTO VENTURIN

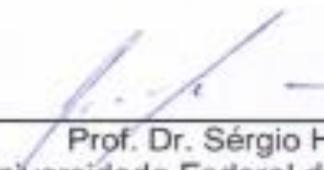
**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SECAGEM EM BAIXA TEMPERATURA
PARA ARROZ COM CASCA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Aprovada em 21 de fevereiro de 2019.



Prof. Dr. Luís César da Silva
Universidade Federal de Viçosa - UFV
Orientador



Prof. Dr. Sérgio Henrique Saraiva
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Coorientador



Prof. Dr. Antonio Manoel Maradini Filho
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Examinador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha amada família pelo apoio incondicional. Aos melhores pais do mundo, Anailda e Laerte, por me darem liberdade para buscar meus sonhos e objetivos, sempre acreditando em mim. A minha irmã Ana Alice por me acolher em Viçosa com todo carinho e prontidão. Ao meu irmão Afonso pelos conselhos e por estar sempre disposto a ajudar.

Ao meu namorado Renan por estar sempre ao meu lado, me tranquilizando e incentivando a ser melhor.

Ao meu orientador Luís César pelos ensinamentos e orientação, que mesmo não estando sempre por perto, foi capaz de transmitir enorme tranquilidade e segurança.

Aos meus coorientadores Raquel e Sérgio pelos ensinamentos e por estarem sempre disponíveis.

A empresa Realengo Alimentos, em especial aos funcionários Cleiton, Roberta, Diego, Claudinei e Renir, pela ajuda durante a coleta de dados e por me receberem tão bem no Rio Grande do Sul.

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que me ajudaram de alguma forma durante o andamento do projeto, mesmo que indiretamente. Marcella, obrigada pelas dicas, pelos dias de estudo e por ouvir meus desabafos.

A todos os funcionários do PCTA, em especial ao Toninho.

A UFV, por disponibilizar recursos e instalações.

A UFES, pela oportunidade de ingressar e desenvolver o mestrado.

A CAPES, pela concessão da bolsa.

A banca examinadora pelo tempo dedicado em avaliar a dissertação e pelas sugestões para o engrandecimento deste trabalho.

Que nada nos limite, que nada nos defina, que nada nos sujeite. Que a liberdade seja nossa própria substância, já que viver é ser livre.

(Simone de Beauvoir)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Maiores produtores de arroz durante a safra 2017/2018	4
Figura 2: Mapa de produção agrícola de arroz no Brasil (safra 2017/2018)	5
Figura 3: Estrutura longitudinal da semente de arroz (<i>Oryza sativa L.</i>).....	7
Figura 4: Produtos e subprodutos obtidos a partir dos diferentes processos industriais	9
Figura 5: Modalidades de secagem aplicadas à secagem de grãos	13
Figura 6: Secagem natural do arroz na lavoura	14
Figura 7: Secagem de arroz com casca em terreiro de concreto.....	14
Figura 8: Configuração de um sistema de secagem em baixas temperaturas	17
Figura 9: Esquema da secagem em camada delgada de grãos para um intervalo de tempo Δt	23
Figura 10: Representação da camada espessa como uma série de camadas delgadas.....	24
Figura 11: Conjunto de silos metálicos verticais.....	26
Figura 12: Sistema de insuflação de ar fixo para cada silo (ventilador e queimador)	27
Figura 13: Estação meteorológica.....	28
Figura 14: Localização dos sensores de temperatura no interior dos silos	29
Figura 15: Fluxograma de processos do armazém para o arroz com casca - Realengo Alimentos Ltda (Santo Antônio da Patrulha - RS).	30
Figura 16: Medidores de umidade (a) e impurezas (b).....	31
Figura 17: Termo-higrômetro utilizado nas medidas de temperatura e umidade relativa do ar.....	32
Figura 18: Pontos de estado representados na carta psicrométrica	33
Figura 19: Anemômetro de hélice (a) e campânula de medição (b).....	36
Figura 20: Segmentação da seção do silo em linhas diametrais representando os pontos de medida.....	37
Figura 21: Primeira janela de diálogo do programa - "Ar secagem"	43
Figura 22: Segunda janela de diálogo do programa - "Configuração do Silo Secador"	44
Figura 23: Terceira janela de diálogo do programa - "Programação do Enchimento"	45

Figura 24: Quarta janela de diálogo do programa - “Simulação”	47
Figura 25: Quinta janela de diálogo do programa - “Resultados“	48
Figura 26: Variação das medidas de voltagem e corrente elétrica nos Silos 06, 07 e 08 (sendo a) dos queimadores e b) dos ventiladores)	54
Figura 27: Variação da temperatura e umidade relativa do ar ambiente durante os intervalos I, II, III, e IV.....	56
Figura 28: Exemplo de classificação de amostra para verificação da qualidade.....	59
Figura 29: Comparação dos tempos de secagem dos Cenários I, II, III e IV em função do teor de água inicial.....	69
Figura 30: Comparação das perdas de matéria seca dos Cenários I, II, III e IV em função do teor de água inicial.....	70
Figura 31: Comparação das perdas por supersecagem dos Cenários I, II, III e IV em função do teor de água inicial.....	72
Figura 32: Comparação entre os tempos de secagem dos Cenários I, II, III e IV para as Situações 1 e 2.....	74
Figura 33: Comparação entre os consumos de energia elétrica dos Cenários I, II, III e IV para as Situações 1 e 2	74
Figura 34: Comparação entre os tempos de aquecimento com GLP dos Cenários I, II, III e IV para as Situações 1 e 2	74
Figura 35: Comparação entre os consumos específicos de gás para os Cenários I, II, III e IV das Situações 1 e 2.....	76
Figura 36: Comparação entre os custos totais dos cenários com teor de água de 18 %.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exemplo de relatório de temperaturas gerado pelo sistema de automatização	34
Tabela 2: Constantes empíricas para o arroz longo e médio	48
Tabela 3: Composição do enchimento parcelado do silo nos Cenários II, III e IV das Situações 1 e 2.....	51
Tabela 4: Roteiro de preenchimento dos Silo 06, 07 e 08.....	53
Tabela 5: Resultados de tempo de funcionamento e parâmetros elétricos para os queimadores e ventiladores de cada silo	55
Tabela 6: Temperaturas e umidades relativas médias do ar ambiente obtidas durante os intervalos I, II, III, e IV	56
Tabela 7: Estimativa do consumo de gás durante a secagem nos silos 06, 07 e 08	57
Tabela 8: Resultados reais e calculados para vazão de ar de secagem, pressão estática e fluxo de ar para os Silos 06, 07 e 08.....	58
Tabela 9: Resultados das classificações das amostras do Silo 06	60
Tabela 10: Resultados das classificações das amostras do Silo 07	61
Tabela 11: Resultados das classificações das amostras do Silo 08	62
Tabela 12: Comparação dos valores experimentais e simulados para o tempo de secagem.....	64
Tabela 13: Comparação dos valores experimentais e simulados para o teor de água final do arroz com casca	65
Tabela 14: Comparação dos valores experimentais e simulados para o consumo de energia elétrica, tempo de acionamento dos queimadores de gás e consumo de GLP	66
Tabela 15: Resultados da simulação para os cenários I, II, III e IV para diferentes teores iniciais de água do produto.....	68
Tabela 16: Perfil de umidade e perda de matéria seca por camada resultante do Cenário IV para 18 % de teor de água inicial	71
Tabela 17: Resultados da simulação das situações 1 e 2, para os cenários I, II, III e IV com teor de água inicial de 18 %	73
Tabela 18: Comparação entre os custos da secagem nos Cenários I, II, III e IV com teor de água inicial de 18 %	77

SUMÁRIO

RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Produção e mercado do arroz	4
3.2 Composição e características estruturais	6
3.3 Processamento do arroz	8
3.4 Critérios de qualidade e classificação	9
3.5 Fundamentos da secagem de grãos	11
3.6 Métodos aplicados a secagem de arroz	13
3.6.1 Secagem natural.....	13
3.6.2 Secagem artificial.....	15
3.7 Modelagem e simulação da secagem	18
3.7.1 Modelagem da secagem em camada delgada	21
3.7.2 Modelagem da secagem em camada espessa.....	22
4 MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 Obtenção de dados do sistema real	26
4.1.1 Caracterização do sistema real	26
4.1.2 Caracterização da obtenção dos dados reais	31
4.2 Implementação do modelo de simulação	38
4.2.1 Metodologia de implementação do modelo	41
4.2.2 Descrição do programa “ <i>SecaBaixaTemperatura</i> ”	43
4.3 Validação do modelo	49
4.4 Experimentação com o modelo	49

4.4.1 Etapa 1: enchimento em parcelas com quantidades iguais de produto	50
4.4.2 Etapa 2: enchimento em parcelas com diferentes quantidades de produto	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 Dados coletados do sistema real	52
5.1.1 Estratégia de preenchimento dos silos	52
5.1.2 Estimativa do consumo de energia elétrica	54
5.1.3 Estimativa do consumo de gás	56
5.1.4 Perda de carga no sistema	57
5.1.5 Manutenção da qualidade.....	59
5.2 Validação do programa implementado	63
5.2.1 Tempo de secagem	63
5.2.2 Teor de água final do produto.....	64
5.2.3 Consumo de energia elétrica e de gás	66
5.3 Comparação de cenários de secagem	67
5.3.1 Etapa 1: enchimento em parcelas com quantidades iguais de produto	67
5.3.2 Etapa 2: enchimento em parcelas com diferentes quantidades de produto	73
6 CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

RESUMO

ZUCOLOTTO VENTURIN, Ana Carla. **Modelagem e simulação de secagem em baixa temperatura para arroz com casca**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre - ES. Orientador: Prof. Dr. Luís César da Silva. Coorientador (es): Prof. Dr. Sérgio Henriques Saraiva e Prof^a. Dr^a. Raquel Vieira de Carvalho.

O arroz é um dos produtos base da alimentação da população brasileira e mundial. Como parte do processamento pós-colheita, a secagem é uma etapa fundamental na conservação da qualidade, pois a mesma pode influenciar as propriedades químicas, físicas e nutricionais do produto. Assim, determinou-se como objetivo deste trabalho a modelagem e a simulação da secagem, a baixa temperatura, de arroz com casca, visando avaliar e otimizar o processo. Foi desenvolvido um modelo baseado no Modelo de Thompson para secagem a baixa temperatura, que permitiu a simulação do processo em função das condições psicrométricas do ar ambiente e do ar de secagem, intensidade do fluxo do ar de secagem e especificações do silo secador. O programa "*SecaBaixaTemperatura*" foi validado através da comparação dos resultados obtidos em simulações com dados operacionais de um processo real, coletados na empresa Realengo Alimentos Ltda., localizada na cidade de Santo Antônio da Patrulha (RS), durante a safra 2017/2018. Como resultado da validação, foi constatado que o programa simulou o processo com precisão aceitável (erro relativo $\leq 15\%$) para os parâmetros avaliados: tempo de secagem, teor de água final do produto e consumos de energia elétrica e gás. Com o programa validado, foram conduzidas comparações de cenários para avaliar estratégias de enchimento do silo. A primeira etapa consistiu em comparações empregando teores de água inicial entre 16 e 20 %, e as formas de enchimento único e em parcelas fracionadas em duas, três e cinco quantidades iguais produto. Enquanto na segunda etapa, para o teor de água inicial de 18 %, foram comparadas as estratégias de enchimento em parcela única e em três parcelas com quantidades diferentes de produto nas proporções crescentes e decrescentes de 70, 20 e 10 %; 60, 20 e 20 %; e 50, 30 e 20 %, respectivamente. O carregamento de forma parcelada minimizou as perdas de matéria seca (PMS) e por supersecagem, além de resultar na diminuição do tempo de secagem e do consumo de energia elétrica. Dentre os cenários da primeira etapa, os melhores resultados foram para o enchimento em cinco parcelas. Para a segunda etapa, o enchimento em três parcelas, na proporção 20, 20 e 60 %, apresentou os melhores resultados com perda de matéria seca de 0,5 % e redução dos custos em 1,59 %, quando comparado ao enchimento em parcela única.

Palavras-chave: Modelos matemáticos, modelo de Thompson, processamento pós-colheita, grãos, cereais.

ABSTRACT

ZUCOLOTTO VENTURIN, Ana Carla. **Modeling and simulation of low-temperature paddy drying**. 2019. Dissertation (Master in Food Science and Technology) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre - ES. Advisor: Prof. Dr. Luís César da Silva. Co-advisors: Prof. Dr. Sérgio Henriques Saraiva and Prof^a. Dr^a. Raquel Vieira de Carvalho.

Rice is one of the staple foods of the Brazilian and world population. As part of the post-harvest processing, drying is a fundamental step in the preservation of quality, since it can influence the chemical, physical and nutritional properties of the final product. In this sense, the main objective of this research consisted of modeling and simulation of low-temperature paddy drying, in order to evaluate and optimize the process. A model based on the Thompson Model for low-temperatures was developed, which allowed the simulation as a function of psychrometric conditions of ambient air and drying air, drying airflow intensity and dryer specifications. The software "*SecaBaixaTemperatura*" was validated by comparing the results obtained in simulations with operational data of a real process, collected at Realengo Alimentos Ltda., located in the city of Santo Antônio da Patrulha – RS Brazil, during the 2017/2018 harvest. As a result of the validation, it was verified that the program simulated the process with acceptable accuracy (relative error $\leq 15\%$) for the evaluated parameters: drying time, final product moisture content and electric and gas consumptions. With the validated program, scenarios were compared to evaluate silo filling strategies. The first phase consisted of comparisons considering initial moisture contents between 16 and 20 %, and the filling in a single parcel and in parcels divided into two, three and five equal quantities. While in the second phase, the following filling strategies were compared for the initial moisture content of 18 %: single parcel and three parcels with different amounts of product in the increasing and decreasing proportions of 70, 20 and 10 %; 60, 20 and 20 %; and 50, 30 and 20 %, respectively. The filling in parcels minimized dry matter losses (DML) and overdrying, besides reducing drying time and energy consumption. Among the scenarios of the first phase, the best results were for the filling in five parcels. For the second phase, the filling in three parcels, in the proportion 20, 20 and 60 %, presented the best results with dry matter losses of 0.5 % and reduction of costs in 1.59 %, when compared to filling in a single parcel.

Keywords: *Mathematical models, Thompson model, post-harvest processing, grain, cereals.*

1 INTRODUÇÃO

O arroz é um cereal da família das gramíneas com aproximadamente vinte espécies reconhecidas. Dentre essas espécies, a *Oryza sativa L.* é a mais cultivada, principalmente, pela adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas e boa aceitação pelos consumidores (JULIANO, 1993; GOMES; MAGALHÃES JUNIOR, 2004).

Devido à rica composição em carboidratos e moderadas quantidades de proteínas, lipídeos, vitaminas e minerais, o arroz é importante fonte de energia para pelo menos dois terços da população global (HEINEMANN et al., 2005; ELIAS et al., 2012). Juntamente com o feijão, é um dos principais constituintes da alimentação dos brasileiros. Buscando suprir essa demanda, segundo a CONAB (2018), o Brasil se apresenta como o nono maior produtor mundial de arroz.

Por se tratar de uma cultura sazonal, as etapas pós-colheita são essenciais para garantir a disponibilidade e a preservação da qualidade ao longo do tempo. Durante o armazenamento, as atividades metabólicas dos grãos (como a respiração) e diversos fatores extrínsecos exercem influência sobre as propriedades químicas, físicas e nutricionais do produto. Dentre estes fatores são destacados os agentes físicos: teor de água e temperatura do produto, umidade relativa do ar intergranular e danos mecânicos; e os agentes biológicos: fungos, ácaros, insetos e bactérias (SINGH et al., 2006; YADAV; JINDAL, 2008; PARK et al., 2012).

O arroz com casca geralmente é colhido com teor de água entre 18 e 25 %, mas para o armazenamento, o ideal é que os valores estejam entre 9 e 14 %, o que deve ser definido em função do tempo de estocagem desejado (IRRI, 2013). Desse modo, procura-se reduzir o teor de água, por meio da secagem, para que sejam minimizadas as perdas qualitativas e quantitativas associadas, principalmente, à proliferação de fungos e a atividade metabólica dos grãos (IGATHINATHANE; CHATTOPADHYAY; PORDESIMO, 2008).

A secagem do arroz com casca pode ocorrer de forma natural ou artificial. A secagem natural é conduzida em terreiros, onde a exposição à radiação solar aquece e desencadeia a redução do teor de água. A secagem artificial pode ser conduzida em alta temperatura, em que são empregados secadores como os de fluxos cruzados, concorrentes ou mistos, para atingir teores de água de um a três pontos percentuais acima do desejado para o armazenamento. O produto ainda

quente é, então, transferido para silos, onde permanece em descanso por até oito horas. Ao final desse período, o produto é resfriado através do sistema de aeração, sendo o processo denominado seca-aeração (WEBER, 2005; PUTRANTO et al., 2011).

Em razão dos menores riscos de ocorrência de danos térmicos e mecânicos, outra modalidade de secagem artificial para o arroz com casca é a secagem a baixa temperatura. A técnica é caracterizada, principalmente, pelo emprego do ar de secagem com temperaturas em no máximo 10 °C acima da temperatura do ar ambiente. Para condução da secagem são recomendados silos secadores com características específicas que incluem: (a) fundo em chapa perfurada; (b) fluxos de ar entre 1,0 e 10,0 m³ de ar.min⁻¹.t⁻¹ de produto; (c) área de suspiro de 1,0 m² para cada 300 m³ de ar insuflado por minuto; e (d) sistema de aquecimento, normalmente queimadores de gás (IRRI, 2013; SHARON; PRIYA; SUBHASHINI, 2016).

Na secagem a baixa temperatura o tempo de secagem é função de parâmetros como: dimensões do silo, estratégia de enchimento, propriedades psicrométricas do ar de secagem, teores de água e impurezas dos grãos. Tempos de secagem extensos aumentam riscos de perda de matéria seca, deterioração fúngica e índice de grãos amarelos (ONDIER; SIEBENMORGEN; MAUROMOUSTAKOS, 2010; MEAS et al., 2013).

Diante da complexidade e do número de variáveis envolvidas no controle do processo de secagem a baixa temperatura, é indicado o emprego da modelagem e simulação. Dentre os modelos aplicáveis para simular a secagem do arroz com casca em camada espessa, destaca-se o Modelo de Thompson para baixas temperaturas, por geralmente apresentar precisão aceitável ao estimar as variáveis de saída e por demandar poucos recursos computacionais (THOMPSON, 1972; DÍAZ MARTÍNEZ, 2011).

Uma vez o modelo validado, este pode ser utilizado no suporte à tomada de decisão, avaliação, controle, otimização e no desenvolvimento de sistemas eficientes, que minimizem as perdas qualitativas e quantitativas, e os custos operacionais (ZARE; CHEN, 2009; RANJBARAN; EMADI; ZARE, 2014; JANAUN et al., 2016). Portanto, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento e a validação de um modelo computacional aplicado à simulação da secagem de arroz com casca, em baixas temperaturas, a ser empregado na avaliação e otimização do sistema.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Modelar e simular a secagem de arroz com casca em baixas temperaturas, com as finalidades de avaliação e otimização do sistema.

2.2 Objetivos específicos

- Estudar e avaliar sistemas de secagem em baixas temperaturas;
- Modelar e simular a secagem de arroz com casca utilizando o Modelo de Thompson para baixas temperaturas;
- Validar o modelo desenvolvido utilizando os dados reais de um sistema de secagem em baixa temperatura;
- Avaliar o efeito da secagem sobre a qualidade dos grãos de arroz;
- Conduzir experimentos de comparação de cenários para definir estratégias operacionais que resultem em menores perdas quantitativas e qualitativas e custos operacionais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Produção e mercado do arroz

A rizicultura tem origem há mais de onze mil anos, durante o período Holoceno, na Ásia (*Oryza sativa* L.) e na África (*Oryza glaberrima* Steud.). A partir destes dois centros de domesticação do cultivo do arroz, a cultura foi difundida para os outros continentes se tornando uma das principais fontes de carboidratos da dieta da população mundial (SWEENEY; McCOUCH, 2007; HILBERT et al., 2017).

A espécie *Oryza sativa* L. é a mais cultivada e consumida, podendo ainda ser dividida em três subespécies: *Indica*, *Japonica* e *Javanica*. As subespécies se diferenciam por características morfológicas, origem, local de cultivo, conteúdo de amilose do grão, comprimento do grão, temperatura de gelatinização do amido e aroma após o cozimento (SWEENEY; McCOUCH, 2007; ELIAS et al., 2012).

A produção mundial está concentrada no continente asiático, que é responsável por mais de 80 % do total produzido. Entretanto, o Brasil se destaca como grande produtor ao ocupar o nono lugar (Figura 1), sendo ainda o maior fora da Ásia (FAO, 2018). De acordo com a CONAB (2018), na safra brasileira de 2017/2018 foi estimada uma produção de 12,38 milhões de toneladas de arroz. Apesar de ser considerado autossuficiente na produção do grão, anualmente o Brasil ainda importa cerca de 1 milhão de toneladas de países do Mercosul devido aos preços atrativos.

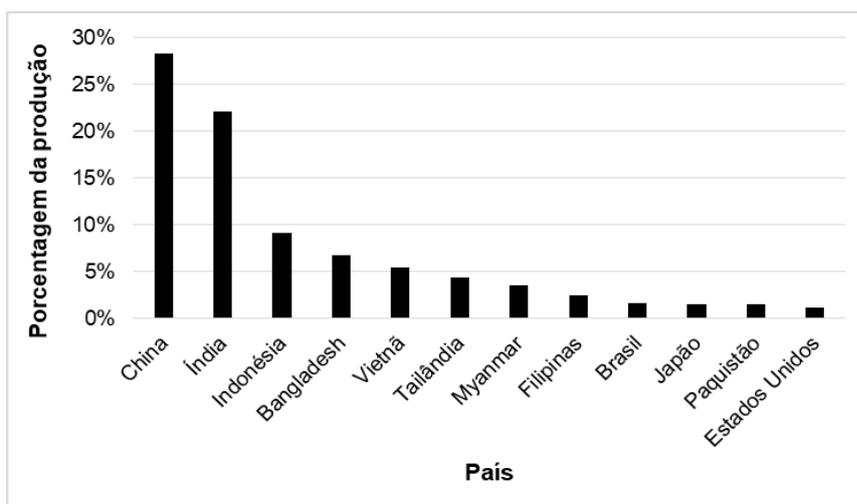


Figura 1: Maiores produtores de arroz durante a safra 2017/2018

Fonte: FAO (2018).

No Brasil são adotados dois tipos distintos de ecossistemas de plantio de arroz: (i) ecossistema de várzeas (irrigado), que conta com irrigação por inundação controlada, e (ii) ecossistema de terras altas (sequeiro), caracterizado pela não irrigação ou pela irrigação complementar por aspersão (GUIMARÃES; STONE; CASTRO, 2006). Das 12,38 milhões de toneladas produzidas durante a safra de 2017/2018, 10,20 milhões foram oriundas de áreas de plantio irrigado (CONAB, 2018).

A Figura 2 apresenta o mapa da produção agrícola de arroz por estado brasileiro durante a safra de 2017/2018. A cultura está presente em quase todo o território, com maior concentração na região Sul, onde o estado do Rio Grande do Sul apresenta-se como maior produtor do país, seguido de Santa Catarina. Nesses estados é predominante o cultivo de arroz irrigado (CONAB, 2018).

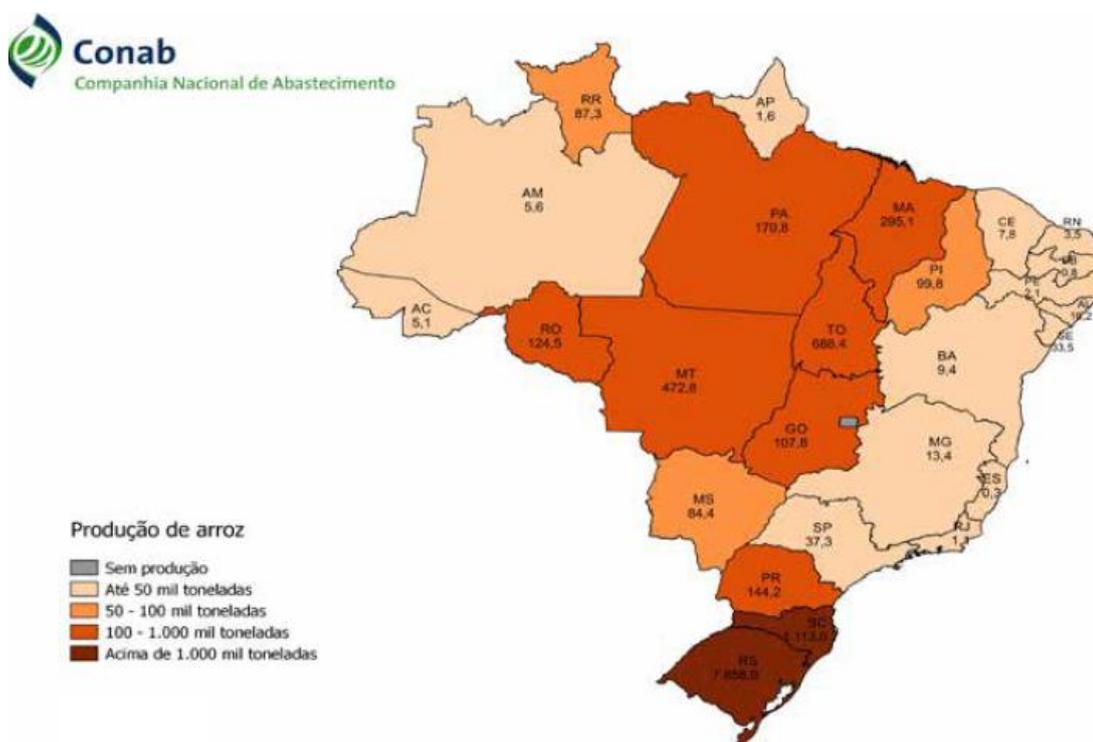


Figura 2: Mapa de produção agrícola de arroz no Brasil (safra 2017/2018)
Fonte: CONAB (2018).

De acordo com a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (2018), o consumo médio mundial per capita de arroz é de 53 kg.pessoa⁻¹.ano⁻¹. Em países asiáticos as médias são mais elevadas, chegando a 180 kg.pessoa⁻¹.ano⁻¹

em Bangladesh. Na América latina, a média é de 32 kg.pessoa⁻¹.ano⁻¹, e especificamente no Brasil a média é de 35 kg.pessoa⁻¹.ano⁻¹.

O mercado brasileiro é caracterizado pelo consumo do arroz na forma de grãos inteiros, sendo os tipos principais: branco polido, parboilizado e integral, nas proporções 70, 25 e 4 %, respectivamente (ELIAS et al., 2012). Como adicional está o consumo dos produtos e subprodutos do arroz, como a quirera, farinhas, flocos e farelos, muitas vezes também incluídos na alimentação animal (NERY et al., 2010).

3.2 Composição e características estruturais

O *Oryza sativa L.* é uma gramínea de espécie hidrófila e semiaquática, cujas sementes (grão de arroz) são constituídas principalmente por carboidratos, moderadas quantidades de proteínas e pequenas quantidades de lipídios, vitaminas e minerais (JULIANO, 1993; ELIAS et al., 2012).

A maior concentração dos carboidratos ocorre na camada mais interna do grão, o endosperma, na forma de amido (cerca de 90 %), o que atribui ao arroz a função energética. Nas camadas externas são encontradas pequenas quantidades na forma de açúcares livres: sacarose (cerca de 90 %), frutose e glicose; e de carboidratos fibrosos formados por polissacarídeos não digeríveis pelas enzimas do trato intestinal, como: celulose, hemiceluloses, amido resistente e pectinas (LAI et al., 2006; WALTER; MARCHEZAN; ÁVILA, 2008).

O conteúdo de proteínas, apesar da menor expressividade em relação ao de carboidratos, possui grande importância para o metabolismo dos consumidores. A albumina e a glutelina são as de maior valor biológico presentes, já que nelas são encontrados a maioria dos aminoácidos essenciais. Em relação ao perfil de aminoácidos, de modo geral são observados altos teores de glutamina e ácido aspártico, porém baixo teor de lisina (como na maioria dos cereais) (FABIAN; JU, 2011).

A concentração de lipídios também é importante do ponto de vista nutricional. Portanto, o arroz é qualificado como fonte significativa de ácidos graxos insaturados, utilizados em diversos processos fisiológicos e que por isso devem ser supridos pela alimentação. Os principais ácidos graxos constituintes da fração lipídica do arroz são os ácidos palmítico, oléico e linoléico (KULLENBERG et al., 2012; LIU et al., 2013).

Os teores de vitaminas e de minerais são altamente variáveis, sendo influenciados por fatores como: variedade, condições de cultivo, fertilização e solo, e pelo processamento pós-colheita adotado (WALTER; MARCHEZAN; AVILA, 2008). No entanto, de forma geral, se encontram quantidades significantes de tiamina (B1), riboflavina (B2), niacina (B3) e α -tocoferol (E), além de pequenas quantidades das vitaminas A, D e C. Os minerais comumente encontrados são: fósforo (P), potássio (K) e magnésio (Mg), em maiores proporções, e também ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn), chumbo (Pb), cádmio (Cd), cálcio (Ca) e sódio (Na) (ELIAS et al., 2012; ATUNGULU; PAN, 2014).

A estrutura da semente, representada na Figura 3, é formada pela cariopse e por uma camada protetora, a casca. A casca corresponde a cerca de 20 % do peso do grão e é composta por duas folhas modificadas, a pálea e a lema. A cariopse, por sua vez, é formada por diferentes camadas, sendo as mais externas o pericarpo, o tegumento e a aleuroma, que juntos representam de 5 a 8 % da massa do arroz integral. O embrião, ou gérmen, é rico em proteínas e lipídios, e representa de 2 a 3 % do arroz integral. O endosperma forma a maior parte do grão integral, de 89 a 94 %, sendo constituído por células ricas em grânulos de amido e de alguns corpos proteicos (JULIANO; BECHTEL, 1985; WALTER; MARCHEZAN; ÁVILA, 2008; KATSURAYAMA; TANIWAKI, 2017).

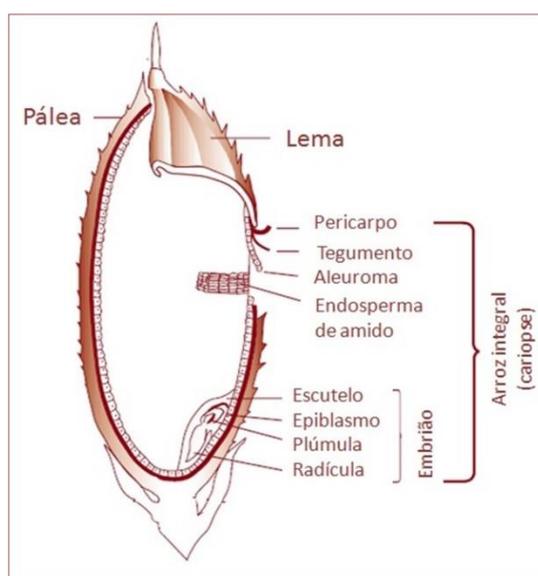


Figura 3: Estrutura longitudinal da semente de arroz (*Oryza sativa* L.)
Fonte: Katsurayama e Taniwaki (2017).

É de grande importância destacar que as características estruturais e de composição química podem ser comprometidas por inadequações técnicas ou operacionais ao longo da cadeia produtiva, que incluem as etapas de secagem, armazenamento e industrialização.

3.3 Processamento do arroz

A Instrução Normativa nº 6/2009 (BRASIL, 2009) do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento define como arroz em casca natural o produto que, além da secagem, ainda não passou por qualquer processo tecnológico ou preparo industrial. Em adição, define como arroz beneficiado o produto maduro que foi submetido a algum processo de beneficiamento e se encontra desprovido, no mínimo, da casca. Segundo a Embrapa (2012) e Gularte (2012) o tipo de beneficiamento escolhido implicará em variações na composição química e nas propriedades nutricionais e estruturais do grão.

O arroz descascado, ou integral, é obtido durante o beneficiamento pela remoção da casca, que é separada da cariopse. Diante disso, o grão integral é composto pelo endosperma e por uma camada formada por pericarpo, tegumento e aleuroma. Após o descascamento, podem ser realizados os processos de brunição e polimento. A brunição, ou branqueamento, é a responsável pela remoção total ou parcial do embrião e da camada de aleuroma, assim, como subproduto do processo é obtido o farelo. Já o polimento consiste no acabamento do produto e na remoção dos resíduos da camada de aleuroma, possibilitando a obtenção do arroz polido (BRASIL, 2009; EMBRAPA, 2012).

Outra opção de beneficiamento é o processo hidrotérmico de parboilização, que tem como produtos finais o arroz parboilizado na forma integral ou polido. O processo consiste no encharcamento dos grãos com casca em tanques contendo água aquecida a temperaturas entre 68 e 72 °C, por seis a sete horas. Após o encharcamento, o arroz é aquecido até a gelatinização do amido, o que pode ser realizado em autoclaves ou estufas. Em sequência é realizada a secagem dos grãos (12,5 a 13,0 % de teor de água), para então seguirem para o beneficiamento (BRASIL, 2009; DUTTA; MAHANTA; SINGH, 2015).

A Figura 4 apresenta o fluxograma das formas de processamento do arroz com casca seco, seus produtos e subprodutos.

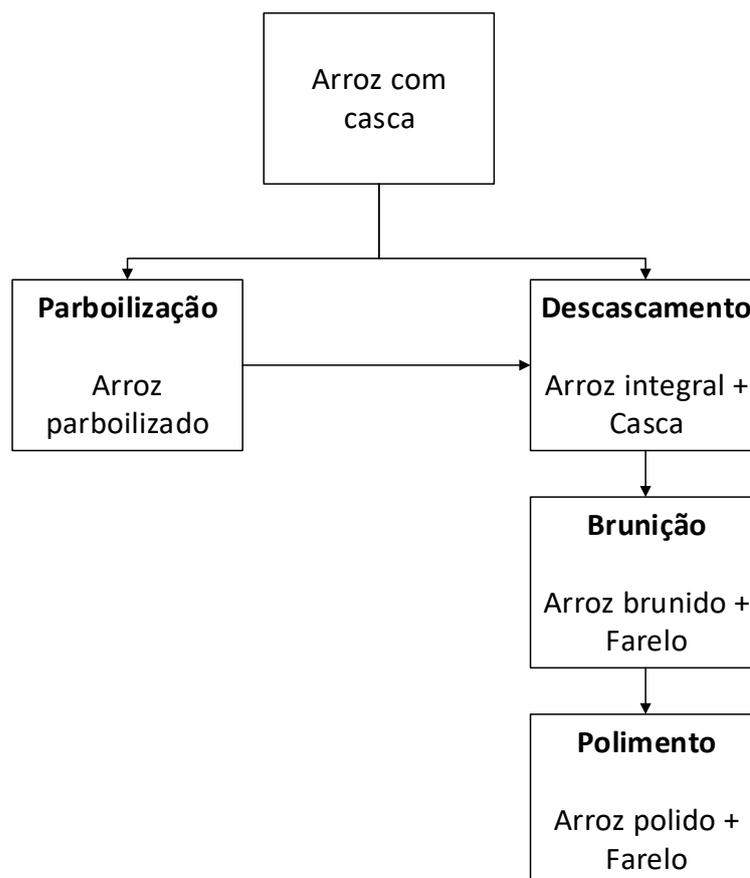


Figura 4: Produtos e subprodutos obtidos a partir dos diferentes processos industriais

3.4 Critérios de qualidade e classificação

A definição da qualidade na indústria de grãos é complexa por considerar a variedade e a finalidade do alimento. A qualidade do arroz, porém, envolve a combinação de quesitos de padronização e de propriedades físicas e sensoriais, que influenciam no nível de aceitação do consumidor e conseqüentemente no valor de mercado do produto final (GULARTE, 2012).

As preferências dos consumidores tendem a diferir de acordo com o país e a cultura em que estão inseridos. No Brasil ocorre a preferência por um produto uniforme, com baixo conteúdo de grãos quebrados ou danificados. Diante disso, para facilitar a comercialização, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento regulamentou um sistema de comercialização por classes e tipos.

Cinco classes são utilizadas para classificar o arroz de acordo com as dimensões dos grãos inteiros após o descasque e polimento (BRASIL, 2009):

- Longo fino: comprimento ≥ 6 mm, espessura $\leq 1,90$ mm, e relação comprimento/largura $\geq 2,75$ mm;
- Longo: comprimento ≥ 6 mm;
- Médio: comprimento entre 5 e 6 mm;
- Curto: comprimento < 5 mm; e
- Misturado.

É necessária uma representatividade de, pelo menos, 80 % do peso dos grãos da amostra para o enquadramento na classe correspondente. A quinta classe, “misturado”, é utilizada para produtos que não apresentam essa predominância, sendo então uma mistura de duas ou mais classes (BRASIL, 2009).

A classificação em tipos é atribuída segundo os requisitos de qualidade, que são estabelecidos considerando limites de tolerância aos percentuais de ocorrência de defeitos, grãos quebrados e quirera para o arroz em casca ou beneficiado. Os tipos são expressos por números arábicos de 1 a 5, podendo ainda, a amostra ser enquadrada como “Fora de tipo” ou “Desclassificado” (BRASIL, 2009).

Os defeitos podem ser definidos como sendo qualquer alteração de coloração, peso ou forma, que resulte ou não em processos bioquímicos de fácil disseminação no produto e que de alguma forma possa comprometer a conservação. Os limites máximos para cada tipo variam para o arroz em casca ou beneficiado e também possuem valores diferentes de acordo com o beneficiamento (BRASIL, 2012). O Quadro 01 apresenta os principais defeitos de acordo com as normas de padronização do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2012) para o arroz descascado e polido.

Quadro 1: Principais defeitos considerados durante a classificação do arroz descascado e polido

Tipo de defeito	Definição
Quebrados	Pedaços de arroz com comprimento inferior a três quartos do comprimento mínimo da classe.
Rajados	Grãos que apresentam qualquer ponto ou estria vermelha/preta, destoante da variedade predominante.
Amarelos	Grãos na cor amarela em sua totalidade ou em parte, podendo variar do amarelo claro ao escuro.
Ardidos	Grãos com coloração escura, proveniente do processo de fermentação.
Pretos	Grãos totalmente enegrecidos por ação do calor ou da umidade.
Mofados	Grãos com sinais visíveis de fungos ou bolor.
Manchados ou picados	Grãos que contenham mancha escura ou esbranquiçada, perfurações ou avarias provocadas por pragas ou fermentação.
Gessados	Grãos com coloração totalmente opaca e semelhante ao gesso.

Fonte: BRASIL (2012).

3.5 Fundamentos da secagem de grãos

A secagem de grãos é um processo termodinâmico envolvendo simultaneamente os fenômenos de transferência de calor e massa, que tem por objetivo a redução do teor de água de tal forma a possibilitar a conservação do produto em condição ambiente (McCABE; SMITH; HARRIOT, 2001; NAVARRO; NOYES, 2002; PUTRANTO et al., 2011). Pode ser considerada como a etapa mais importante do processamento pós-colheita devido aos altos custos e consumo de energia térmica. Além disso, se conduzida de maneira inadequada, deprecia a qualidade e a conservação da matéria seca (carboidratos, gorduras, enzimas,

minerais e vitaminas) (SAHIN; DINCER, 2005; WANKHADE; SAPKAL; SAPKAL, 2013).

A massa de grãos armazenada em silos ou graneleiros pode ser considerada como um ecossistema de interação entre os componentes biológicos e o ambiente que os rodeia. Elevados teores de água do produto armazenado, combinados a temperaturas inadequadas, podem desencadear diversos problemas que levam a depreciação da qualidade e perdas quantitativas. Ao se reduzir o teor de água do produto a níveis adequados é: (i) inviabilizado o desenvolvimento de microrganismos, principalmente os fungos; (ii) reduzida a taxa de respiração; e (iii) bloqueadas as ocorrências de reações químicas e enzimáticas associadas à autodegeneração (ELIAS et al., 2012; IRRI, 2013).

O teor de água do produto tem relação direta com a atividade de água no espaço intergranular, que pode potencializar o desenvolvimento de fungos e, ou bactérias, que utilizam os grãos como substrato. O desenvolvimento de microrganismos na massa de grãos, principalmente fungos, leva a liberação de calor e água, o que aumenta a temperatura da massa e a disponibilidade de água no estado de vapor no espaço intergranular. Determinadas espécies de fungos em produtos armazenados representam maior risco por metabolizarem micotoxinas. Para minimizar o desenvolvimento de microrganismos durante o armazenamento, são recomendados teores de água abaixo de 13,0 % e temperaturas inferiores a 20 °C, assim a atividade de água no espaço intergranular, para o arroz com casca, será inferior a 0,65 (KJER et al., 2010; KATSURAYAMA, TANIWAKI, 2017).

A respiração dos grãos, potencializada pelo teor de água e temperatura do produto, proporciona a oxidação de componentes orgânicos e a formação e liberação de gás carbônico (CO₂), água (H₂O) e calor. Assim, o processo acarreta em aumento de temperatura e disponibilidade de água no interior das unidades armazenadoras (KALETA; GÓRNICKI, 2013). Para o arroz com casca, estima-se que teores de água entre 11,0 e 13,0 % possam garantir um processo respiratório discreto (IRRI, 2013).

Assim como os fatores ambientais, as características do próprio grão podem provocar diferentes efeitos durante o processamento do arroz e por isso, o seu conhecimento é de extrema importância. Como exemplos destas características físicas, podem ser citadas como mais relevantes: teor de água, pressão de vapor,

umidade de equilíbrio, porosidade, massa específica, calor latente de vaporização, ângulo de repouso e calor específico.

3.6 Métodos aplicados a secagem de arroz

Os métodos de secagem de grãos são classificados como naturais ou artificiais, como apresentado no esquema da Figura 5.

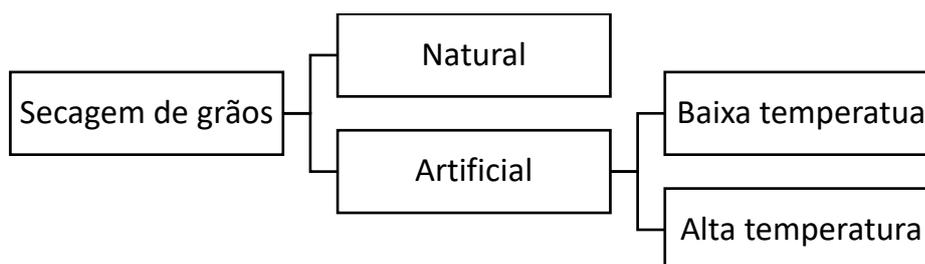


Figura 5: Modalidades de secagem aplicadas à secagem de grãos

Para o arroz, assim como para a maioria dos cereais e oleaginosas, não há a indicação do melhor método de secagem, pois cada um possui vantagens e desvantagens. Para escolha de um método, as características da unidade produtiva e de destino do produto devem ser avaliadas, assim como a relação entre o custo e o benefício de implantação e operação.

3.6.1 Secagem natural

A secagem natural pode ser descrita como sendo formada por duas etapas distintas. A primeira consiste na secagem natural propriamente dita, ou seja, sem a interferência humana. O processo tem início ainda na planta, logo após a maturação fisiológica do produto, utilizando os ventos para a movimentação do ar de secagem e a energia necessária para a remoção da umidade proveem da radiação solar (Figura 6) (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2008; IRRI, 2013).



Figura 6: Secagem natural do arroz na lavoura

Contando com condições climáticas desejáveis de temperatura, umidade relativa do ar e índice de insolação, consegue-se alcançar teores de água suficientes para permitir o armazenamento seguro. Entretanto, devido ao risco de intempéries, ataque de pragas e tombamento das plantas, o processo de secagem nas plantas é interrompido quando o teor de água alcança valores próximos a 20 % e com isso uma segunda etapa de secagem deve ser estabelecida (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2008).

A segunda etapa da secagem natural geralmente é realizada ao ar livre em terreiros de concreto, Figura 7, onde os grãos de arroz são espalhados em camadas de dois a cinco centímetros de profundidade. Assim como na etapa descrita anteriormente a umidade do produto é removida por ação da radiação solar e da movimentação natural do ar (IRRI, 2013).



Figura 7: Secagem de arroz com casca em terreiro de concreto
Fonte: PESAGRO (2018).

As principais vantagens da secagem natural são o baixo custo e os menores riscos de danos térmicos e mecânicos aos grãos, por trabalhar com temperaturas

mais amenas e a perda de água ser lenta. Como desvantagem, apresenta extrema dependência das condições climáticas e a necessidade de revolvimento a cada trinta minutos para garantir secagem uniforme. Outras desvantagens compreendem a necessidade constante de mão de obra, dificuldade de controle do processo, risco de infestação de insetos e contaminações e a necessidade de espaços físicos para a construção dos terreiros (PUTRANTO et al., 2011; IRRI, 2013).

3.6.2 Secagem artificial

A secagem artificial é caracterizada essencialmente pela interferência do homem, através de artifícios tecnológicos, que possibilitam a redução do tempo do processo. A depender da temperatura do ar empregado, pode ser classificada como secagem em altas temperaturas ou em baixas temperaturas (PUTRANTO et al., 2011).

Ao ser comparada com a secagem natural, a secagem artificial possui como desvantagens os maiores custos e riscos de danos térmicos e mecânicos. Porém, dentre as vantagens destacam-se a maior independência das condições climáticas; menor tempo para execução, o que reduz os riscos de contaminação por microrganismos; maior facilidade de programação operacional; e possibilidade de controle e automação do processo (IRRI, 2013; MANIKANTAN; BARNWAL; GOYAL, 2014).

3.6.2.1- Secagem em altas temperaturas

A secagem artificial em altas temperaturas é largamente utilizada em unidades armazenadoras e em indústrias de transformação. A principal vantagem é a rapidez, que é alcançada através do uso de altas temperaturas e fluxos de ar superiores a $1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ de grãos (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2008).

O princípio do método envolve o estabelecimento de um gradiente de umidade entre a superfície e o centro do grão através da evaporação nas camadas mais externas. Dessa forma, a parte interna permanece mais úmida que a superficial, o que desenvolve tensões internas no grão. Quanto maior for o gradiente formado, maiores serão as tensões internas e, conseqüentemente, maiores serão os riscos de danos físicos e fisiológicos no produto (ONDIER; SIEBENMORGEN; MAUROMOUSTAKOS, 2010).

Em secadores operando de forma contínua, o produto geralmente é seco e resfriado logo em seguida, em um curto intervalo de tempo. Este processo de rápido

resfriamento favorece o desenvolvimento das tensões internas, além do choque térmico, que pode causar o trincamento e a redução da quantidade de grãos inteiros durante o beneficiamento. Em decorrência disso, para alguns produtos agrícolas, como o arroz, não é recomendada a secagem contínua, em alta temperatura, até o teor de água final desejado para a armazenagem (ONDIER; SIEBENMORGEN; MAUROMOUSTAKOS, 2010).

A seca-aeração se apresenta como alternativa de secagem parcelada ao empregar a aeração dos silos para resfriar os grãos e assim finalizar a secagem após a passagem pelo secador. O produto ainda quente e com até três pontos percentuais acima do teor de água desejado é transferido para um silo, onde, após um período de descaço, é resfriado. O processo de seca-aeração permite que, durante o período de descanso no silo, o teor de água no interior do grão se uniformize, aproveitando a energia armazenada na forma de calor sensível. Com isso, se torna possível a retirada da porcentagem excedente de água durante o resfriamento (NAVARRO; NOYES, 2002; SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2008).

3.6.2.2- Secagem em baixas temperaturas

A secagem em baixas temperaturas é caracterizada pela utilização de ar de secagem natural ou levemente aquecido, sendo que, se utilizado o aquecimento, este deve ser de no máximo 10 °C acima da temperatura ambiente. É realizada nos próprios silos armazenadores e por isso também pode ser entendida como secagem durante o armazenamento (IRRI, 2013).

Para condução da modalidade são utilizados silos secadores com as características técnicas apresentadas na Figura 8, que incluem: piso de chapa metálica perfurada com índice de perfuração mínimo de 15 %, para garantir a distribuição uniforme do ar; sistema de aquecimento de ar, normalmente queimadores de GLP, acoplado aos ventiladores do sistema de aplicação de ar, que deve aplicar fluxos variando de 1 a 10,0 m³ de ar.min⁻¹.t⁻¹ de produto; e em razão do ar de exaustão apresentar altos valores de umidade relativa, é recomendada área de suspiro de 1,0 m² para cada 300 m³ de ar insuflado por minuto (NAVARRO; NOYES, 2002; LAWRENCE; ATUNGULU; SIEBENMORGEN, 2015).

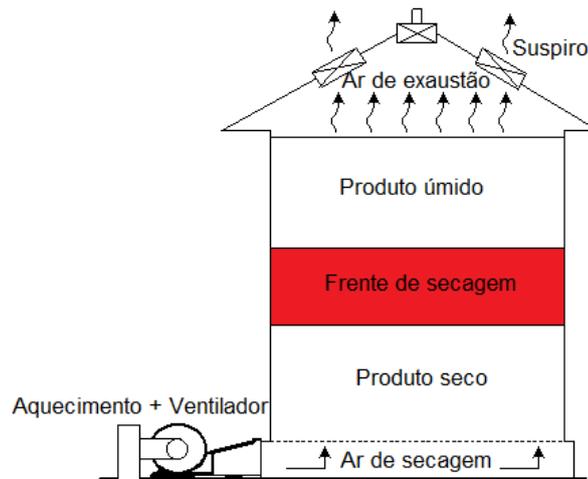


Figura 8: Configuração de um sistema de secagem em baixas temperaturas

A secagem se inicia na parte inferior do silo e progride até a parte superior, dessa forma, durante a secagem podem ser constatadas três camadas distintas, diferenciadas segundo o teor de água (Figura 8). Na parte inferior, a primeira camada é formada por produto seco, que já atingiu o equilíbrio higroscópico com o ar de secagem. A segunda, denominada frente de secagem, apresenta teores de água entre a umidade de equilíbrio e o teor de água inicial, sendo a camada na qual está ocorrendo a transferência de umidade do produto para o ar. E a última camada é formada pelos grãos ainda úmidos, com teor de água próximo ao inicial e temperatura inferior à temperatura do plenum, uma vez que ao passar por essa camada, o ar de secagem já está com sua capacidade de secagem esgotada e foi resfriado devido a troca de calor com o produto na frente de secagem (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2008; SHARON; PRIYA; SUBHASHINI, 2016).

O sistema de aquecimento do ar, acoplado aos ventiladores, deve garantir através do aquecimento, a equalização do ar de secagem. Para cada combinação de temperatura e umidade relativa do ar, há somente um teor de água do grão que se mantém em equilíbrio, este é denominado de umidade de equilíbrio. Portanto, a equalização do ar de secagem consiste no ajuste da temperatura e da umidade relativa do ar, a fim de propiciar o teor de umidade de equilíbrio adequado, geralmente 13,0 % para o arroz com casca. Vale ressaltar, porém, que ao passar apenas pelo ventilador, a temperatura do ar de secagem pode aumentar em até quatro graus Celsius, dependendo da potência do equipamento (DÍAZ MARTÍNEZ, 2011).

Para agilizar o processo de secagem, diferentes estratégias para o enchimento do silo podem ser adotadas. A estratégia mais comum é o enchimento em uma única parcela, que consiste em carregar o silo por completo em um período relativamente curto de no máximo cinco dias. Quanto ao enchimento parcelado, é caracterizado pela adição de novas parcelas assim que a anterior já estiver seca, ou parcialmente seca (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2008).

Na secagem a baixa temperatura, as principais limitações são condições climáticas desfavoráveis e produtos com altos teores de água iniciais, que podem levar ao aumento do tempo de secagem, aumentando também a probabilidade de deterioração. O tempo de secagem, portanto, é um fator limitador para a qualidade final, e para se obter condições ideais é requerido o adequado dimensionamento do silo e do sistema de aplicação de ar, a definição de uma estratégia de enchimento e métodos de controle das condições psicrométricas do ar de secagem de forma a obter a umidade de equilíbrio adequada para a condução do processo (LAWRENCE; ATUNGULU; SIEBENMORGEN, 2015).

3.7 Modelagem e simulação da secagem

A modelagem e a simulação de processos ou sistemas permitem a condução de experimentos como a análise de sensibilidade, comparação de cenários, otimização e simulação de Monte Carlo, que podem ser empregados para estudos de análise e avaliação, tomadas de decisão operacional, modificação de rotinas operacionais, e configuração de sistemas (SILVA, 2002; SILVA et al., 2012).

Segundo Law e Kelton (1991) e Silva (2002), dependendo do emprego ou não da variável “tempo”, da sua forma de avanço e do uso ou não de variáveis aleatórias, os modelos de simulação podem ser classificados em: (i) estático ou dinâmico - os modelos dinâmicos empregam a variável “tempo” para definir o estado do processo ao longo de um período desejado; (ii) contínuo ou discreto - esta classificação se aplica aos modelos dinâmicos, em que, se for contínuo, a variável “tempo” avançará com incrementos de valor fixo. Nos discretos, o avanço se dá mediante a ocorrência de eventos predefinidos; (iii) estocástico ou determinístico - os modelos são classificados como estocásticos se pelo menos uma das variáveis for aleatória.

A modelagem e simulação de sistemas de secagem de grãos envolve diversas variáveis e parâmetros, como, por exemplo, as relacionadas à: (i) condições psicrométricas do ar ambiente, de secagem e de exaustão; (ii) sistema de aplicação de ar quanto a vazão, fluxo de ar e pressões; (iii) propriedades dos grãos, como: teores de água inicial e final, massa específica, calor específico, calor latente, umidade de equilíbrio, umidade relativa intergranular; (iv) parâmetros do sistema de secagem, que para secagem a baixa temperatura, podem ser as dimensões do silo, potência térmica do sistema de aquecimento, potência dos ventiladores, índice de perfuração das chapas perfuradas na base do silo e estratégia de enchimento adotada (DALPASQUALE et al., 2008; NAGHAVI; MOHEB; ZIAEI-RAD, 2010; SHARON; PRIYA; SUBHASHINI, 2016).

Para a modelagem e simulação da secagem de produtos agrícolas, os principais métodos foram propostos nos Estados Unidos da América, entre as décadas de cinquenta e setenta (HUKILL, 1954; THOMPSON, 1967; BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974; BAKKER-ARKEMA; BROOK; LEREW, 1978; HAWK et al., 1978; MOREY et al., 1978; VAN EE; KLINE, 1979). A partir daí diversos autores empregaram os métodos para simulação da secagem de grãos em diferentes sistemas.

Cavalcanti Mata, Dantas e Braga (1999) desenvolveram um programa computacional em linguagem *Clipper/dbase IV* para a simulação da secagem de produtos agrícolas (arroz, café, feijão, milho, soja e trigo) em secadores de camada estacionária. O programa foi baseado no Modelo de Thompson, porém, para o caso do milho, também permite simular com o Modelo de Hukill. Como resultados, para todos os produtos e temperaturas variando de 25 a 80 °C, os modelos de simulação se adequaram aos valores experimentais obtidos por diversos autores.

Lopes et al. (2005) desenvolveram o programa computacional "SIMH" para simular a secagem de grãos, em baixas temperaturas, com base no Modelo de Hukill. O programa foi escrito em linguagem *Object Pascal* e utilizou a plataforma de programação Delphi 5 para produzir o perfil do processo de secagem de acordo com as especificações inseridas pelo usuário. Ao realizarem a validação do modelo, os resultados foram satisfatórios, se apresentando dentro dos limites de erros aceitáveis.

Dantas (2007) também implementou um programa computacional utilizando o Modelo de Thompson para a simulação da secagem de grãos e sementes em secadores de camada estacionária. Ao realizar a validação do modelo, a partir de dados experimentais, o programa apresentou performance satisfatória dentro das faixas de temperatura e teor de água inicial do produto propostas.

Valente e colaboradores (2012) utilizaram a linguagem *Visual Basic* 6.0 para desenvolver o programa computacional “LINSEC”, baseado no Modelo de Thompson, visando simular a secagem de grãos em altas temperaturas. O programa demonstrou ser flexível e de fácil utilização pelo usuário, além de apresentar alta efetividade na simulação da secagem, fornecendo valores próximos à realidade.

Joaquin (2013) desenvolveu um modelo computacional para simular a secagem de frutos de café empregando o Modelo de Thompson e a linguagem de programação EXTEND™. Após a validação do modelo, realizada através da comparação dos resultados com dados da literatura obtidos por Silva (1991), foram conduzidos experimentos para comparação de cenários na busca pela melhor configuração do secador intermitente de fluxos contracorrentes utilizado.

Para o caso específico do arroz com casca, Lawrence, Atungulu e Siebenmorgen (2015) utilizaram o *software Post-Harvest Aeration Simulation Tool* (PHAST), baseado no modelo de umidade de equilíbrio de Thompson, para simular a secagem de arroz com ar ambiente. Foram avaliadas duas estratégias de secagem, com e sem controle do ar ambiente, que foram simuladas sob diferentes umidades iniciais, fluxos de ar, profundidades e variedades. O cenário com o ar ambiente controlado se mostrou superior na secagem e nos custos.

Além disso, também são encontrados na literatura outros modelos propostos para a secagem do arroz com casca, que empregam grande diversidade de linguagens de programação e *softwares*. Naghavi, Moheb e Ziaei-rad (2010) apresentaram um modelo de não-equilíbrio para a secagem de arroz com casca em secador de camada espessa. No estudo, destacou-se o não desprezo dos termos de acúmulo dos balanços de massa e energia, desenvolvidos para o volume de controle dentro do secador. A partir do modelo, foi desenvolvido e implementado um programa no MATLAB, que obteve boa precisão ao simular, em diferentes posições e tempos de secagem, as temperaturas e umidades do ar e dos grãos.

Sarker et al. (2015) estudaram a modelagem em MATLAB de secadores de leite fluidizado para a secagem, em altas temperaturas, de arroz com casca com altos conteúdos de impurezas e umidade. Destaca-se no trabalho a aplicação do programa em um secador industrial em funcionamento, que foi utilizado nos experimentos de validação, visando estabelecer um guia para tomada de decisão em situações adversas durante o processo. Durante a validação do modelo, todas as previsões de temperatura e umidade dos grãos obtiveram desvio relativo médio inferior a 4,90 %.

Elgamal et al. (2015) modelaram a secagem em camada espessa de arroz com casca em duas etapas. Primeiramente foi utilizado um modelo em *computational fluid dynamics* (CFD) para prever os coeficientes convectivos de transferência de massa e calor entre os grãos de arroz individuais e o ar. Estes coeficientes foram então utilizados na modelagem para a previsão das umidades e temperaturas dos grãos nas diferentes alturas das camadas. Ao realizar a validação com dados experimentais da literatura, foram encontrados desvios médios relativos entre 3,1 % e 6,8 %.

Azmir, Hou e Yu (2018) também utilizaram o CFD, combinado ao método de elementos discretos, para modelar numericamente a secagem de grãos, porém em secador de leite fluidizado. As previsões do modelo foram comparadas a dados da literatura e, apesar de grandes discrepâncias terem sido apontadas, estas foram justificadas pelas diferenças de dimensionamento entre os sistemas comparados.

3.7.1 Modelagem da secagem em camada delgada

Segundo Díaz Martínez (2011), a modelagem da secagem de grãos em camada delgada é fundamentada em ensaios experimentais, que visam a modelagem de curvas de secagem em situações controladas do ar de secagem (condições psicrométricas e vazão). A camada delgada é caracterizada por pequenas quantidades de grãos (0,5 a 1,0 kg) acondicionadas em bandejas com fundo telado em que a espessura não deve ultrapassar 0,10 m.

Para modelagem da secagem em camada delgada são largamente utilizados os modelos destacados no Quadro 2, em que RU representa a razão de umidade (adimensional), a , b , c e k são constantes de secagem e t é o tempo de secagem. Esses modelos, em sua maioria, são derivados de simplificações da Segunda lei de

Fick (MANIKANTAN; BARNWAL; GOYAL, 2014; SHARON; PRIYA; SUBHASHINI, 2016).

Quadro 2: Modelos de secagem em camada delgada para arroz com casca por diferentes autores

Nome do modelo	Equação proposta	Referência
Newton	$RU = \exp(-k.t)$	Liu e Bakker-Arkemma (1997)
Page	$RU = \exp(-k.t^n)$	Zhang e Litchfield (1991)
Page modificado	$RU = \exp(-(k.t)^n)$	Overhults et al. (1973)
Henderson e Pabis	$RU = a.\exp(-k.t)$	Henderson e Pabis (1961)
Logarítmico	$RU = a.\exp(-k.t) + c$	Yaldiz et al. (2001)
Wang e Singh	$RU = 1 + a.t + b.t^2$	Wang e Singh (1978)

Fonte: Adaptado de Manikantan, Barnwal e Goyal (2014).

De forma complementar às curvas de secagem, também podem ser usados para determinar a taxa de secagem e a temperatura dos grãos. Outra aplicação está na determinação de constantes empíricas e semi-empíricas durante a previsão da umidade de equilíbrio e também na validação de equações de balanços de massa e energia (SHARON; PRIYA; SUBHASHINI, 2016).

3.7.2 Modelagem da secagem em camada espessa

Modelos de simulação em camada espessa geralmente são classificados como de não-equilíbrio, equilíbrio ou logarítmico. Os modelos de não-equilíbrio possuem como característica principal assumir que não ocorre equilíbrio durante os balanços de massa e energia entre o ar de secagem e os grãos. Em decorrência disso, são representados como um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992). Autores como Naghavi, Moheb e Ziaei-rad (2010) e Zare, Jayas e Singh (2012) consideram estes modelos mais detalhados e precisos para a secagem de cereais, entretanto, apresentam também maiores complexidade e tempo computacional.

Os modelos de equilíbrio e logarítmicos são geralmente menos complexos por serem derivações dos de não-equilíbrio, obtidos através de simplificações e do estabelecimento de condições de contorno (HEMIS et al., 2011). Os mais difundidos na literatura para a secagem de grãos em camada espessa são os Modelos de

Thompson (1968), Hukill (1954), Morey (1978) e Michigan (1992) (SILVA; QUEIROZ; SOUZA, 2008).

No caso específico do Modelo de Thompson (1968), a modelagem da secagem de grãos em camada espessa considera o leito de grãos como uma série de camadas delgadas sobrepostas. A modelagem da secagem para cada camada pode ser fundamentada no método proposto por Thompson, Peart e Foster (1968), Figura 9, em que, para um determinado intervalo de tempo Δt , ao ser removida uma determinada quantidade de água do produto têm-se a redução da temperatura do ar em ΔT , e aumento da razão de mistura em ΔRM , enquanto para o produto ocorre o aumento de temperatura em ΔT_g , e redução do teor de água em ΔU .

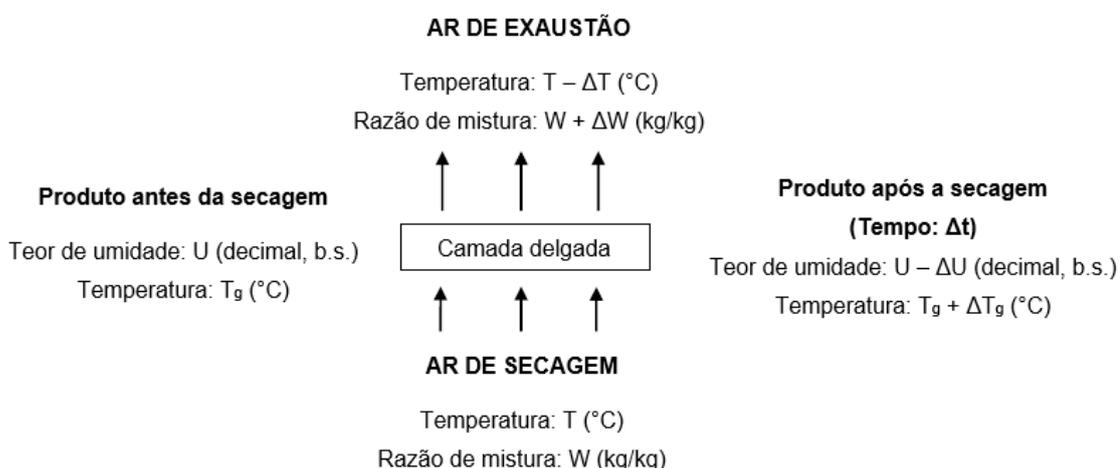


Figura 9: Esquema da secagem em camada delgada de grãos para um intervalo de tempo Δt

Fonte: Adaptado de Thompson, Peart e Foster (1968).

Ao se modelar a secagem em camada espessa, considerando o método proposto para camada delgada por Thompson, Peart e Foster (1968), têm-se conforme apresentado na Figura 10. O ar de secagem de uma camada sobrejacente corresponde ao ar de exaustão da camada subjacente, a exceção da primeira camada, em que o ar de secagem é o proveniente do sistema de insuflação (MOREY et al., 1978; GUNASEKARAN; THOMPSON, 1986).

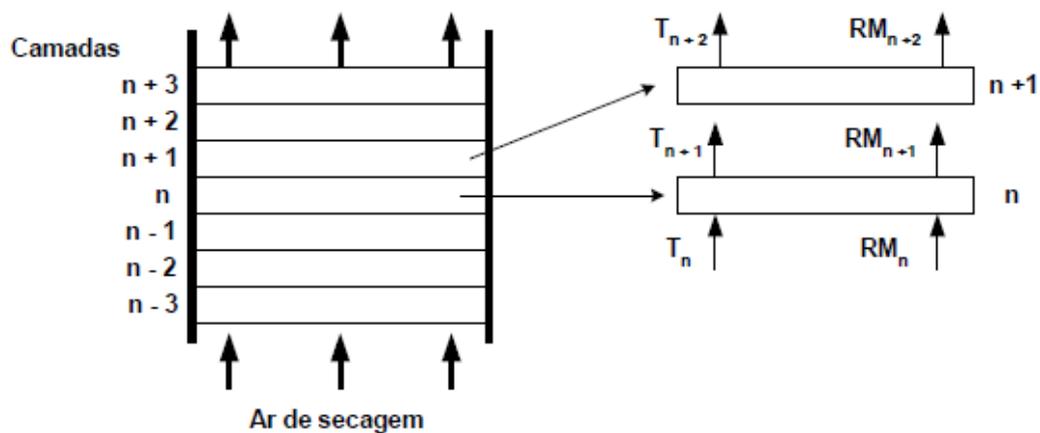


Figura 10: Representação da camada espessa como uma série de camadas delgadas

Fonte: Adaptado de Morey et al. (1978).

Desse modo, ao longo do tempo e à medida que a camada subjacente tem seu teor de água reduzido e a temperatura aumentada, as condições psicrométricas do ar de secagem da camada sobrejacente são alteradas (DÍAZ MARTÍNEZ, 2011; MOREY et al., 1978).

O Modelo proposto por Thompson, Peart e Foster (1968) é um dos mais empregados na modelagem e simulação da secagem de grãos para diversas configurações de secadores por sua precisão ao estimar as variáveis de saída e por apresentar baixa exigência de recursos computacionais. O modelo, considerado como semi-empírico ou semi-teórico, foi equacionado baseado principalmente nas equações termodinâmicas para descrever as transferências de massa e energia e em uma equação empírica para descrever a curva de secagem em camada delgada (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

De acordo com suas características, o Modelo de Thompson pode ser classificado como determinístico, por não envolver variáveis aleatórias; dinâmico, por empregar a variável “tempo” e assim descrever o estado do sistema ao longo de um período; e contínuo, pois o tempo de secagem avança segundo incrementos fixos de tempos predefinidos ou calculados no início da simulação. Quanto a definição do critério de parada da simulação, pode ser adotado, por exemplo, um teor de água médio, ou um determinado tempo de secagem (DALPASQUALE; SPERANDIO, 2010).

O modelo foi concebido inicialmente para a modelagem e simulação da secagem do milho, tendo sido posteriormente adaptado e ampliado para outros tipos

de sementes e configurações de secador. Assim, como uma adaptação, Thompson (1972) propôs o modelo para a secagem em baixas temperaturas, em que as principais considerações assumidas na proposição foram: i) após um intervalo de tempo (Δt), o produto e o ar de secagem entram em equilíbrio; ii) a transferência de calor entre o ar e o produto é adiabática; e iii) não há diferença (histerese) entre as isotermas de adsorção e dessorção, que relacionam o teor de umidade de equilíbrio com a umidade relativa do ar (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Obtenção de dados do sistema real

A coleta dos dados operacionais foi realizada na indústria Realengo Alimentos Ltda., localizada na cidade de Santo Antônio da Patrulha (RS), durante a safra 2017/2018, no período de 27/02/2018 a 01/12/2018.

4.1.1 Caracterização do sistema real

4.1.1.1 Sistema de secagem

A empresa possui quatorze silos metálicos, de fundo plano, e de fabricação Kepler Weber, Figura 11. Durante a safra e ao longo do ano, os silos são utilizados para a secagem e o armazenamento do arroz com casca até o beneficiamento, conduzido pela própria empresa para a produção de arroz branco polido.



Figura 11: Conjunto de silos metálicos verticais

Os dados experimentais coletados foram referentes a três silos Modelo SL60 – Kepler Weber, com as denominações “Silo 06”, “Silo 07” e “Silo 08”, que possuem as especificações técnicas destacadas no Quadro 3.

Quadro 3: Especificações técnicas dos Silos 06, 07 e 08

Especificações	Silo 06	Silo 07	Silo 08
Diâmetro (m)	18,18	18,17	18,22
Área da base (m ²)	259,53	259,17	260,51
Altura do cilindro (m)	12,94	12,94	12,94
Volume (m ³)	3.358,32	3.353,65	3.370,99
Capacidade estática (kg)	2.014.992	2.012.190	2.022.594
Capacidade estática (sacas 50 kg)	40.000	40.000	40.000

Cada silo conta com dois ventiladores centrífugos (Kepler Weber, modelo KWF80/M, arranjo 4), aos quais estão acoplados queimadores de gás liquefeito de petróleo (GLP) da marca Termogrão, atmosféricos, de pressão constante de 1,5 Pa e com sistema de chama modulante mediante a variação de taxas de combustão de 0 a 9,0 kg de GLP.h⁻¹ (Figura 12). Cada ventilador é acionado por um motor trifásico (220/380/440), modelo IAFS PM/800R0, de 40 CV, 4 pólos, 60 Hz e 1750 rpm.



Figura 12: Sistema de insuflação de ar fixo para cada silo (ventilador e queimador)

De acordo com registros obtidos junto a empresa, o sistema de insuflação de ar foi dimensionado para fornecer, em condições nominais de rotação de 1750 rpm, as seguintes especificações: vazão de ar por cada ventilador, considerando o silo cheio de arroz com casca: 395,7 m³ de ar.min⁻¹ e pressão estática de 280 mm ca; e vazão específica do silo: 0,21 m³ de ar.min⁻¹.m⁻³ de produto, ou o correspondente a 0,35 m³ de ar.min⁻¹.t⁻¹ de arroz.

Os ventiladores são controlados através de um quadro de comando, que possui uma chave seletora para definir o tipo de operação: manual ou automática. Na operação manual é o operador quem aciona os ventiladores, enquanto que, na automática, o comando é controlado pelo sistema de automatização da Procer Automação Ltda.

O sistema de automatização conta com estações remotas para obtenção, armazenamento e transmissão de dados via “*wireless*”. Uma destas estações é vinculada a uma estação meteorológica, de onde são obtidos os dados relativos a temperatura e umidade relativa do ar ambiente e a ocorrência de chuvas (Figura 13).



Figura 13: Estação meteorológica

Estações idênticas encontram-se instaladas sobre os silos, nas quais os dados coletados são as temperaturas da massa de grãos em diferentes níveis. Cada silo dispõe de seis pêndulos, que contam com oito sensores digitais de temperatura interligados por meio da tecnologia “*one wire*”, conforme a Figura 14.

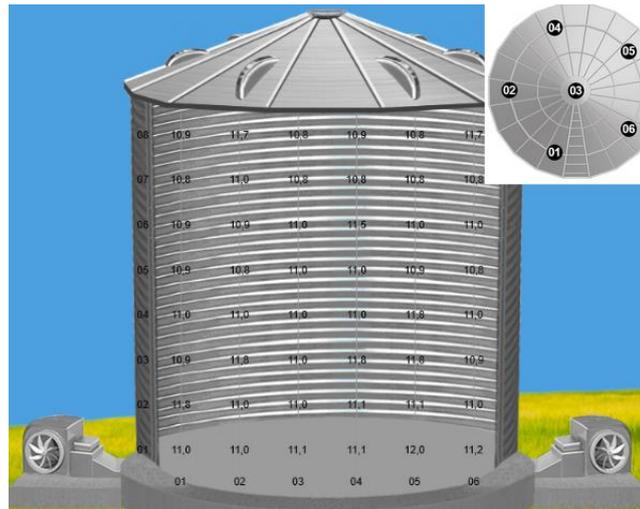


Figura 14: Localização dos sensores de temperatura no interior dos silos

Junto ao quadro de comando, o sistema possui uma estação remota que aciona e monitora o funcionamento dos ventiladores, segundo informações transmitidas via “*wireless*” a partir da estação central conectada a um computador. Este computador, conectado à internet, armazena, processa e disponibiliza os dados, além de possibilitar o acesso remoto ao sistema.

Parte do processamento executado pelo computador ocorre segundo regras programadas pelo usuário quanto as condições para acionamento dos ventiladores. Estas regras são programadas segundo o estágio da secagem e podem abranger variáveis como: temperatura e umidade relativa do ar ambiente, constatação de chuva, horário de ponta quanto ao consumo de energia elétrica e umidade de equilíbrio. Além disso, como regra padrão durante a secagem, os motores são desligados automaticamente durante períodos de chuva e no horário de ponta da energia elétrica (horário de pico), que ocorre em dias úteis das 18:00 às 22:00 horas.

Apesar de serem acoplados aos ventiladores, os queimadores possuem funcionamento independente. O acionamento e a intensidade da chama são dependentes da umidade relativa medida por um sensor localizado no plenum de cada silo. Como padrão estabelecido, os queimadores são acionados quando a umidade relativa no plenum for maior que 65% e desligados se menor que 59%.

4.1.1.2 Recebimento da matéria-prima

Os caminhões carregados com arroz com casca úmido, proveniente das lavouras ou de silos de terceiros, primeiramente são pesados e deles são retiradas amostras com o uso de um calador. As amostras são empregadas para inferência

sobre os teores de água e impurezas, pela própria equipe da recepção, e depois são enviadas ao laboratório de qualidade para a classificação das cargas.

Após a amostragem, os caminhões são encaminhados às moegas, que contam com tombadores para agilizar a descarga. O produto é direcionado a silos pulmões, de onde pode ser enviado diretamente para expedição ou para secagem. No caso da secagem, o produto passa pela pré-limpeza e segue para os silos secadores, onde será seco e, posteriormente, armazenado. Na Figura 15 é apresentado o fluxograma de processos do armazém, da forma como é executado pela empresa Realengo Alimentos Ltda.

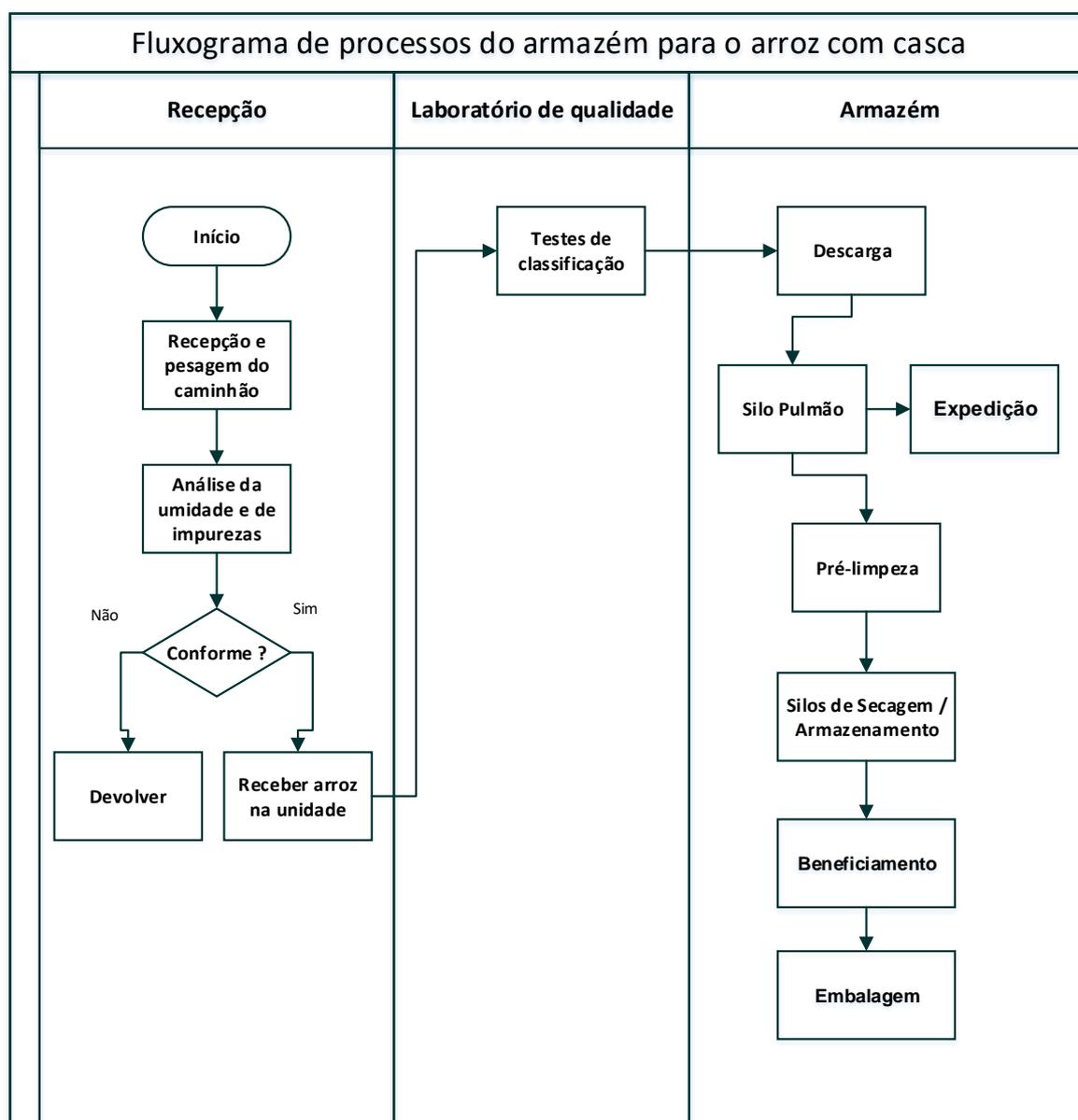


Figura 15: Fluxograma de processos do armazém para o arroz com casca - Realengo Alimentos Ltda (Santo Antônio da Patrulha - RS).

As análises dos percentuais de teor de água e impurezas são realizadas empregando o medidor de umidade (MOTOMCO, modelo 999ES) e o separador de impurezas (T&C Metalúrgica, modelo SIT-500), respectivamente (Figura 16). Além disso, o mesmo medidor de umidade é utilizado para verificar o teor de água do produto nos silos a partir de amostras retiradas pelo menos uma vez por semana, durante a secagem, ou uma vez por mês durante o armazenamento.

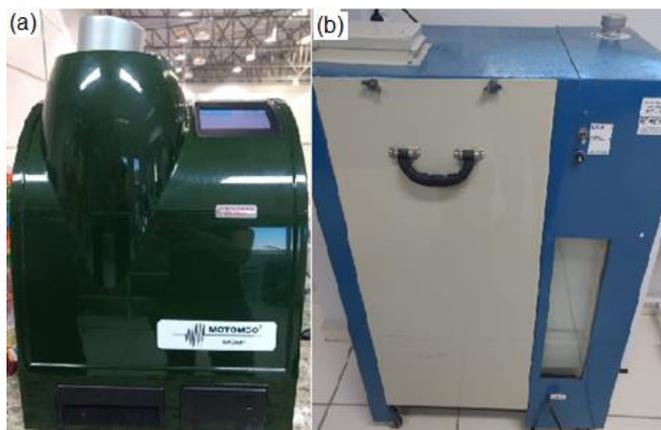


Figura 16: Medidores de umidade (a) e impurezas (b)

As análises qualitativas realizadas no laboratório de qualidade seguem a metodologia proposta pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2012), que inclui a classificação segundo: teor de água, quebrados, inteiros, renda, mofados/ardidos/pretos, rajados, manchados/picados, amarelos, gessados (incluindo os quebrados gessados), barriga branca, sem casca, e presença ou não de insetos. As amostras classificadas são mantidas no laboratório como referência até a safra seguinte, ou até o consumo do conteúdo dos silos na indústria de beneficiamento.

4.1.2 Caracterização da obtenção dos dados reais

Os dados monitorados durante os experimentos foram: (a) condições psicrométricas do ar ambiente, ar de secagem e ar de exaustão, (b) temperatura da massa de grãos em diferentes alturas ao longo da secagem, (c) teor de água e parâmetros de classificação de amostras do produto, (d) tempo para realização das operações, (e) voltagem e corrente elétrica dos ventiladores e queimadores, (f) vazões e fluxos do ar fornecidos, e (g) pressão estática na base dos silos.

4.1.2.1 Condições psicrométricas

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente foram obtidos através da estação meteorológica, que mede em tempo real e envia os dados para o programa de gerenciamento. Através do programa foi possível obter o histórico das variáveis, a cada duas horas, durante o período de secagem. Os dados foram organizados e analisados empregando o programa Microsoft Excel®, sendo obtidos valores médios de temperatura e umidade relativa segundo quatro intervalos de mesma duração: I - das 0:00 às 5:59 h, II - das 6:00 às 11:59 h, III - das 12:00 às 17:59 h e IV - das 18:00 às 23:59 h.

Para a coleta dos dados das temperaturas e umidades relativas do ar de secagem e do ar de exaustão, foi utilizado o termo-higrômetro (AKSO, modelo AK29) apresentado na Figura 17. As medições foram realizadas quatro vezes ao dia (09:00, 14:00, 17:00 e 22:00 h), exceto nos períodos em que o sistema se encontrava desligado, como em situações de chuva.



Figura 17: Termo-higrômetro utilizado nas medidas de temperatura e umidade relativa do ar

As medições para o ar de secagem foram realizadas através de uma abertura feita na tubulação logo após ao ventilador. Já as condições do ar de exaustão, foram medidas na parte superior da massa de grãos contida no silo. Além disso, de forma complementar, também foram realizadas medidas de temperatura e umidade relativa do ar ambiente com o instrumento.

Os dados coletados por meio do termo-higrômetro foram utilizados para estimar o consumo de GLP. A Figura 18 apresenta os pontos de estado (PE) considerados, sendo “E” a entalpia, “UR” a umidade relativa, “T” a temperatura e “RM” a razão de mistura. O PE1 representa o ar ambiente, sendo que a queima do

GLP desloca de PE1 para PE2, e o aquecimento do ventilador desloca de PE2 para PE3.

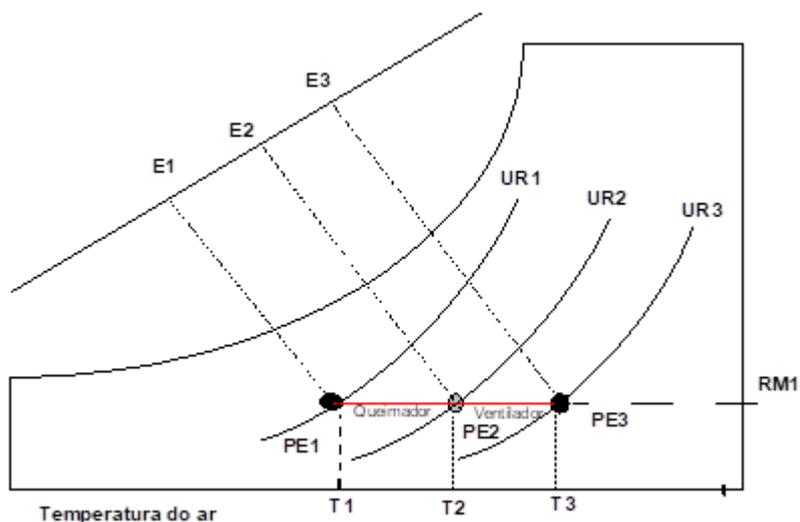


Figura 18: Pontos de estado representados na carta psicrométrica

Primeiramente foi calculado o aumento médio de temperatura do ar de secagem ao passar pelo ventilador (ΔT_v), para isso foram utilizadas as medidas de períodos em que os queimadores se encontravam desligados. Os valores médios de aquecimento do ventilador encontrados para cada silo foram descontados das temperaturas do ar de secagem medidas nos momentos em que o queimador se encontrava ligado, a fim de obter as temperaturas do Ponto 2, de acordo com a Equação 01.

$$T2 = T3 - \Delta T_v \quad (\text{Equação 01})$$

Em que:

$T2$ = temperatura do ar após o queimador e antes do ventilador ($^{\circ}\text{C}$);

$T3$ = temperatura do ar após o ventilador ($^{\circ}\text{C}$); e

ΔT_v = aumento médio de temperatura do ar ao passar pelo ventilador ($^{\circ}\text{C}$).

Foram utilizadas equações psicrométricas para o cálculo das demais condições psicrométricas e da entalpia dos pontos de estado (ASAE, 1980). A partir da diferença de entalpia entre os Pontos 1 e 2, das vazões do ar de secagem e considerando o poder calorífico do GLP de $11000 \text{ kcal.kg}^{-1}$ de gás, foram estimados

os consumos médios de gás por hora em cada silo. Para calcular o consumo total de gás, horímetros foram instalados junto aos queimadores. Assim, ao multiplicar o consumo médio horário de gás pelos tempos de funcionamento dos queimadores foi possível estimar o consumo total de GLP durante os processos.

4.1.2.2 Temperatura da massa de grãos

A temperatura da massa de grãos, em diferentes alturas, ao longo da secagem foi obtida através do sistema de termometria. As informações foram armazenadas a cada duas horas por meio do sistema de automatização descrito no item 4.1.1.1, que também apresenta outras informações, como: as condições ambientes de temperatura e umidade relativa e se o sistema de aeração estava ligado ou não. A Tabela 1 apresenta um exemplo de relatório de temperaturas, em que cada pêndulo é representado pela letra “P” e cada sensor pela letra “S”.

Tabela 1: Exemplo de relatório de temperaturas gerado pelo sistema de automatização

Data: 22/01/2018 08:00		Aeração: M1=DESL/M2=DESL			T_{amb} 23 °C	UR_{amb} 95		
U_{grão} 12,7 %		T_{min} 0,0 °C			T_{med} 0,0 °C	%	T_{max} 0,0 °C	
	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08
P01	22,5	22,5	22,6	22,6	22,5	22,5	22,6	22,6
P02	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,7	22,6	22,7
P03	22,4	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,8
P04	22,6	22,6	22,5	22,6	22,6	22,8	22,6	22,9
P05	22,5	22,5	22,6	22,6	22,5	22,6	22,6	22,6
P06	22,4	22,3	22,6	22,5	22,6	22,6	22,6	22,8

4.1.2.3 Teor de água e parâmetros de classificação

Para a medição dos teores de água do produto no silo a cada sete dias, durante a secagem, e pelo menos uma vez por mês, durante o armazenamento, as amostragens foram realizadas até a profundidade de dois metros, com o uso de um calador. Todas as amostras, além de terem os teores de água determinados, foram também classificadas segundo os mesmos requisitos das análises qualitativas de recebimento de cargas até novembro de 2018.

4.1.2.4 Tempo de realização das operações

Os tempos de secagem foram medidos por meio de horímetros instalados em um dos ventiladores de cada silo. De forma similar, foram instalados horímetros nos queimadores, para obter o tempo total em que os dispositivos estiveram acionados durante a secagem.

4.1.2.5 Parâmetros elétricos

Para estimar o consumo de energia elétrica, foram medidas as voltagens e correntes elétricas durante o funcionamento dos ventiladores e dos queimadores. As medidas foram realizadas duas vezes ao dia durante todo o período de secagem através de um alicate amperímetro (FLUKE, modelo 323). Os dados coletados foram agrupados em planilhas do Microsoft Excel® e dispostos graficamente para a análise de comportamento. Além disso, para cada silo foi obtida a média aritmética e o desvio padrão das medidas.

O consumo de energia elétrica (Cel) foi calculado em função do tempo de funcionamento e da potência do equipamento, Equação 02. A potência foi calculada, em função da corrente elétrica e da voltagem medidas, através da Equação 03 (circuitos trifásicos) para os ventiladores e da Equação 04 (circuitos monofásicos) para os queimadores.

$$Cel = Pot \cdot t_{op} \quad (\text{Equação 02})$$

$$Pot = (V_f \cdot \sqrt{3} \cdot I_L \cdot \cos \phi) / 1000 \quad (\text{Equação 03})$$

$$Pot = (V_f \cdot I_L) / 1000 \quad (\text{Equação 04})$$

Em que:

Cel = consumo de energia elétrica (kWh);

Pot = potência demandada pelo sistema (ou absorvida pela rede) (kW);

t_{op} = tempo de funcionamento (h);

$\cos \phi$ = fator de potência, igual a 0,92.

V_f = voltagem de fase (volts); e

I_L = corrente de linha (A).

4.1.2.6 Vazões e fluxos de ar

As vazões e fluxos de ar foram calculadas por meio de experimentos que mediram as velocidades do ar ao sair da camada de grãos, empregando o anemômetro de hélice digital (INSTRUTEMP, modelo ITAN-720) em conjunto a uma campânula, Figura 19 “a” e “b”, respectivamente. Para cada silo foram realizadas três medições, a primeira após a adição da primeira parcela de grãos, a segunda ao completar uma parcela intermediária e a terceira com o silo totalmente cheio.



Figura 19: Anemômetro de hélice (a) e campânula de medição (b)

As medições das velocidades ocorreram nos pontos destacados na Figura 20, em que a superfície de grãos é dividida por quatro linhas principais (1, 2, 3 e 4), cada uma contendo 6 pontos de medida espaçados entre si a uma distância equivalente a 0,125 vezes o diâmetro do silo. O método consiste em posicionar a campânula nos pontos de medida e com o anemômetro posicionado em seu topo, medir a velocidade do ar. Em posse das dimensões da campânula e da velocidade do ar medida, obtém-se a velocidade do ar na base do ponto de medição, por meio da equação da continuidade (Equação 05).

$$\overline{v_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \cdot \overline{v_2} \quad (\text{Equação 05})$$

Em que:

$\overline{v_1}$ = velocidade média do ar na base da campânula (m.s⁻¹);

$\overline{v_2}$ = velocidade média do ar no topo da campânula (m.s⁻¹);

D_1 = diâmetro do topo da campânula de medição (m); e

D_2 = diâmetro da base da campânula de medição (m).

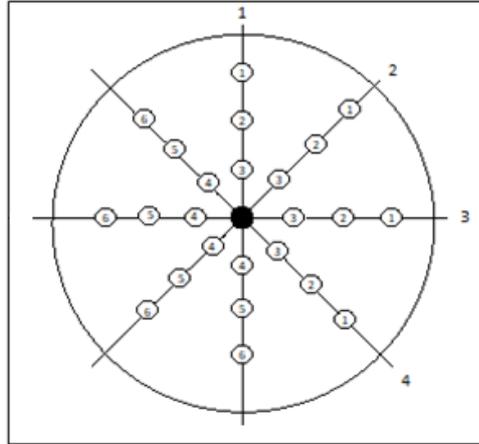


Figura 20: Segmentação da seção do silo em linhas diametrais representando os pontos de medida

A vazão (Q) representa o volume de ar que passa por uma seção de um duto por unidade de tempo. Foi utilizada a Equação 06 para determinar as vazões médias ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) em cada experimento a partir das velocidades médias dos pontos de medida. Além disso, por meio das Equações 07, 08 e 09 foram calculados os fluxos de ar por área, volume de produto e por tonelada de produto, respectivamente.

$$Q = A \cdot v \quad (\text{Equação 06})$$

$$F_{area} = \frac{Q}{A} \quad (\text{Equação 07})$$

$$F_{vol} = \frac{Q}{V_{silo}} \quad (\text{Equação 08})$$

$$F_{ton} = \frac{Q}{T_{prod}} \quad (\text{Equação 09})$$

Em que:

Q = vazão do ar de secagem ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$);

A = área da seção (base) do silo (m^2);

v = velocidade do ar de secagem ($m \cdot \text{min}^{-1}$);

F_{area} = fluxo de ar por área (m^3 de ar. $\text{min}^{-1} \cdot m^{-2}$);

F_{vol} = fluxo de ar por volume de produto (m^3 de ar. $\text{min}^{-1} \cdot m^{-3}$ de arroz);

V_{silo} = volume de produto no silo (m^3);

F_{ton} = fluxo de ar por tonelada de produto (m^3 de ar. $\text{min}^{-1} \cdot t^{-1}$ de arroz); e

T_{prod} = quantidade de produto (toneladas).

4.1.2.7 Pressão estática

Para as medidas da pressão estática na base dos silos, foi utilizado um manômetro “U” preenchido com água. As medições foram realizadas de forma concomitante às medições da velocidade de ar, item 4.1.2.6.

4.2 Implementação do modelo de simulação

Para implementação do modelo computacional “*SecaBaixaTemperatura*”, baseado no Modelo de Thompson para secagem em baixas temperaturas (THOMPSON, 1972), foi empregada a linguagem de programação *Visual Basic for Applications*® (VBA), que é embarcada no programa Microsoft Excel®. Já para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar, foram empregadas as equações disponíveis em ASAE (1980).

O Modelo de Thompson para baixas temperaturas, classificado como semi-empírico, descreve o comportamento da secagem de grãos em camada espessa, quando se utilizam baixos fluxos de ar e temperaturas de secagem próximas à do ambiente (THOMPSON, 1972).

Thompson, Peart e Foster (1968) definiram como hipótese principal para a simulação da secagem em cada camada delgada, que a temperatura da massa de grãos e a temperatura do ar seriam iguais após os balanços de massa e energia, dado um intervalo de tempo (Δt), e que o produto e o ar entrariam em equilíbrio higroscópico. Ponderaram ainda que a troca de calor entre o ar e o produto seria adiabática, e que assim não haveria diferença (histerese) entre as isotermas de adsorção e dessorção.

Para a implementação do modelo, além de equações provenientes do balanço de energia e de massa entre o ar de secagem e os grãos, foram

empregadas as Equações empíricas 10 e 11, para descrever a umidade de equilíbrio e a umidade relativa de equilíbrio (ASAE, 1998), e a Equação 12 para o calor específico (CAVALCANTI MATA,1992).

$$U_e = \frac{1}{100} \left(\frac{\ln(1 - 0,01 \cdot UR_e)}{1,92 \times 10^{-4} \cdot (T_s + 51,161)} \right)^{1/2,4451} \quad (\text{Equação 10})$$

$$UR_e = \frac{100 \cdot Patm \cdot RM}{(0,622 + RM) \cdot Pvs} \quad (\text{Equação 11})$$

$$cp = 0,278 + 0,960 \cdot \left(\frac{U}{100 + U} \right) \quad (\text{Equação 12})$$

Em que:

U_e = umidade de equilíbrio do arroz com o ar de secagem (decimal, b. s.);

UR_e = umidade relativa do ar (%);

$Patm$ = pressão atmosférica (Pa);

RM = razão de mistura do ar (kg de vapor.kg⁻¹ de ar seco);

Pvs = pressão de parcial do vapor de água no estado de saturação (N.m⁻²);

T_s = temperatura do ar (°C);

cp = calor específico do arroz (kcal.kg⁻¹.°C⁻¹); e

U = teor de água do produto (decimal, b. s.).

4.3.1.1 Balanço de energia entre o ar e o produto

Para encontrar as condições de equilíbrio entre o ar de secagem e o produto, primeiramente foi realizado um balanço de energia, que considera apenas o calor sensível, ou seja, o calor usado para evaporar a umidade do grão. Os termos do balanço de energia são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Termos do balanço de energia entre o ar e os grãos

Energia contida pela massa de ar seco	Energia contida na fração vapor de água	Energia contida na massa de produto	Energia contida na água que está sendo evaporada
$0,24 \cdot T$	$RM \cdot (588 + 0,45 \cdot T)$	$cp \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_g$	$(RM_f - RM_0) \cdot T_g$

Ao proceder o balanço, antes e após o equilíbrio, é encontrada a Equação 13.

$$0,24 \cdot T_0 + RM_0 \cdot (588 + 0,45 \cdot T_0) + cp \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{go} + (RM_f - RM_0) \cdot T_{go} = 0,24 \cdot T_f + RM_f \cdot (588 + 0,45 \cdot T_f) + cp \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{gf}$$

(Equação 13)

Em que:

T_f = temperatura de equilíbrio entre o ar e os grãos no instante $t + \Delta t$ (°C);

T_0 = temperatura do ar no instante t (°C);

T_{go} = temperatura da massa de grãos no instante t (°C);

T_{gf} = temperatura da massa de grãos no instante $t + \Delta t$ (°C) (igual a T_f);

U = teor de água do produto no tempo t (decimal, b. s.);

RM_0 = razão de mistura do ar no instante t (kg de vapor.kg⁻¹ de ar seco);

RM_f = razão de mistura do ar de saída da camada de grãos (kg de vapor.kg⁻¹ de ar seco).

cp = entalpia específica do produto (kcal.kg⁻¹.°C⁻¹); e

R = razão entre a massa de matéria seca da camada delgada e a massa de ar seco que a ultrapassa no intervalo Δt (kg matéria seca.kg⁻¹ de ar seco).

A razão entre as massas de matéria seca e de ar seco (R) é calculada por meio da Equação 14.

$$R = \frac{\rho \cdot V_e \cdot A \cdot \Delta x}{Q \cdot \Delta t \cdot 60 \cdot (1 + U_0)} \quad \text{(Equação 14)}$$

Em que:

ρ = peso específico inicial do produto (kg.m⁻³);

V_e = volume específico do ar ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$);

A = área da seção transversal (m^2);

Δx = espessura da camada fina (m);

Q = vazão do ar de secagem ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$);

Δt = incremento de tempo (h); e

U_0 = teor de água inicial do produto (decimal, b. s.).

4.3.1.2. Balanço de massa entre o ar e o produto

A razão de mistura do ar consistente com a perda de umidade do produto (RM_f), decorrido o intervalo de tempo Δt , é determinada pelo balanço de massa da Equação 15.

$$RM_f - RM_0 = R \cdot (U - U_f) \quad (\text{Equação 15})$$

Em que:

U_f = teor de água final do produto no instante $t + \Delta t$ (decimal, b. s.);

4.2.1 Metodologia de implementação do modelo

O algoritmo da metodologia de Thompson (1972) para a simulação da secagem de grãos em baixas temperaturas, exemplificando uma camada delgada, pode ser descrito de acordo com os passos abaixo:

Passo 1: Calcular, para a camada delgada em questão, a umidade relativa do ar de secagem (UR_s) e a umidade relativa do ar intergranular (UR_{ai}), Equações 10 e 11, considerando a temperatura T_0 e a razão de mistura RM_0 do ar de secagem, e a temperatura T_{g0} e o teor de água em base seca do produto U_0 , respectivamente.

Passo 2: Considerar a razão de mistura do ar de exaustão $RM_f = RM_0$ e o incremento da razão de mistura (ΔRM) igual a 0,001.

Passo 3: Comparar os valores de UR_s e UR_{ai} , sendo possível a ocorrência três casos:

- **Caso 1:** $UR_s > UR_{ai}$, ocorrerá umedecimento da camada e $\Delta RM = -\Delta RM$;

- **Caso 2:** $UR_s < UR_{ai}$, ocorrerá secagem da camada e $\Delta RM = \Delta RM$;
- **Caso 3:** $UR_s = UR_{ai}$; a camada encontra-se em equilíbrio higroscópico com o ar de secagem.

Passo 4: Para os Casos 1 e 2, considerar $RM_f = RM_f + \Delta RM$, enquanto para o Caso 3 não haverá troca de massa entre o produto e o ar.

Passo 5: Calcular a temperatura de equilíbrio, ou o mesmo que a temperatura final do sistema ar e produto (T_f) a partir do balanço de energia (Equação 13), sendo esta a temperatura final do ar e do produto para o momento $t + \Delta t$.

Passo 6: Calcular a umidade final do produto (U_f) para o momento $t + \Delta t$ utilizando o balanço de massa (Equação 15).

Passo 7: Calcular novamente a umidade relativa do ar de secagem para a camada em questão (UR_s) e a umidade relativa do ar intergranular de equilíbrio (UR_{ai}), considerando as condições do ar e do produto para o momento $t + \Delta t$.

Passo 8: Após o novo cálculo de UR_s e UR_{ai} , definir o intervalo de aceitação, em que, o limite inferior é igual a $LI = UR_{ai} - 0,5$ e o superior é $LS = UR_{ai} + 0,5$, e avaliar possíveis ocorrências, para correção do valor de UR_s :

- Se, $UR_s < LI$ e Caso 2 (Secagem); ou $UR_s > LS$ e Caso 1 (Umedecimento), retornar ao Passo 4.
- Se, $UR_s < LI$ e Caso 1 (Umedecimento); ou $UR_s > LS$ e Caso 2 (Secagem), seguir para o Passo 10.
- Se, $LI < UR_s < LS$, foi encontrado o ponto de equilíbrio, sendo definido para o ar de exaustão a temperatura final (T_f) e (RM_f) e para o produto a temperatura final ($T_{gf} = T_f$) e o teor de água final (U_f). Para esse caso é encerrado o algoritmo, ressaltando que as condições do ar de exaustão (T_f e RM_f) da camada delgada em questão, será o ar de secagem da camada sobrejacente.

Passo 10: Considerar $RM_f = RM_f - 3 \cdot \Delta RM$.

Passo 11: Considerar $\Delta RM = 0,5 \cdot \Delta RM$ e retornar ao Passo 4.

Como a massa de grãos foi dividida em uma série de camadas, o procedimento deve ser realizado repetidamente em cada uma delas.

O valor do incremento de tempo (Δt) deve ser adequadamente escolhido, considerando que a secagem em baixas temperaturas é um processo demorado e que a temperatura e a umidade do ar ambiente sofrem variações durante o dia. Para este estudo foi adotado o valor de duas horas.

4.2.2 Descrição do programa “*SecaBaixaTemperatura*”

O programa “*SecaBaixaTemperatura*” apresenta cinco janelas de diálogo: “*Ar Secagem*”, “*Configuração do Silo Secador*”, “*Programação do Enchimento*”, “*Simulação*” e “*Resultados*”. As três primeiras são utilizadas para a entrada de dados e as demais apresentam os resultados da simulação.

Na primeira janela de diálogo, Figura 21, o usuário insere dados referentes às condições em que a secagem será conduzida, como: (i) temperatura e umidade relativa do ar ambiente, podendo adicionar até cinco períodos com diferentes médias; (ii) altitude da localização do sistema de secagem; (iii) umidade de equilíbrio desejada, sendo, nesse caso, o mesmo que o teor de água final; (iv) informações do horário de ponta do uso de energia elétrica; e (v) o poder calorífico do gás.

Condições Ambiente

Sim	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	HH:MM
<input checked="" type="checkbox"/> 1	17,67	91,79	0 : 0
<input checked="" type="checkbox"/> 2	20,14	85,83	6 : 0
<input checked="" type="checkbox"/> 3	25,03	68,46	12 : 0
<input checked="" type="checkbox"/> 4	19,98	86,1	18 : 0
<input type="checkbox"/> 5			

Altitude (m): 131 Umidade de equilíbrio (%): 13

Uso de Energia

Sim Horário de Pico: HH:MM 18 : 0 Duração (h): 4

Poder calorífico do GLP (kcal/kg): 11000

Silos 6, 7 e 8 Silo UFV

Limpar Calcular

Ar ambiente / Ar aquecido

Propriedades	Período #1	Período #2	Período #3	Período #4	Período #5
Horário de início (h)	0,00	6,00	12,00	18,00	0,00
Temperatura ambiente (°C)	17,67	20,14	25,03	19,98	0,00
Temper. bulbo úmido (°C)	16,81	18,52	20,80	18,40	0,00
Umidade relativa (%)	91,79	85,83	68,46	86,10	0,00
Umidade de equilíbrio (%)	17,96	16,33	13,28	16,39	0,00
Aquecimento necessário (°C)	5,49	4,31	0,48	4,38	0,00
Temperatura do ar aquecido (°C)	23,16	24,45	25,51	24,36	0,00
Umidade relativa ar aquecido (%)	65,40	66,03	66,52	65,95	0,00
Umidade de equilíbrio (%)	13,00	13,00	13,00	13,00	0,00

Etapas concluídas: Ar de secagem Configuração silo secador Programação do enchimento

Figura 21: Primeira janela de diálogo do programa - “Ar secagem”

A partir dos dados inseridos, de equações para os cálculos das propriedades psicrométricas e da umidade de equilíbrio, e do método da secante, é calculado o aquecimento necessário para que o ar de secagem proporcione a umidade de equilíbrio desejada, geralmente de 13 % para arroz com casca.

A janela de diálogo seguinte “Configuração do Silo Secador”, solicita ao usuário informações sobre o produto e o sistema de secagem. Como apresentado na Figura 22, após o usuário selecionar o tipo de produto, é informado o teor de água recomendado para a armazenagem e a massa específica. Na sequência, são introduzidas as características do sistema de secagem: diâmetro, altura de cilindro e altura das chapas do silo; fluxo do ar com o silo cheio; fator de majoração da pressão estática; e número de ventiladores e queimadores, incluindo suas potências elétricas nominais, rendimentos, correntes e voltagens. Como resultados principais são apresentadas a capacidade estática do silo (sacas e toneladas), a vazão do ar de secagem e a perda de carga.

Figura 22: Segunda janela de diálogo do programa - "Configuração do Silo Secador"

Na terceira janela de diálogo (Figura 23), “Programação do Enchimento”, o usuário informa a estratégia de enchimento, sendo possível dividir em até sete

parcelas. Para cada uma delas devem ser inseridas as datas e horas do depósito no silo, os teores de água iniciais do produto e as quantidades em sacas.

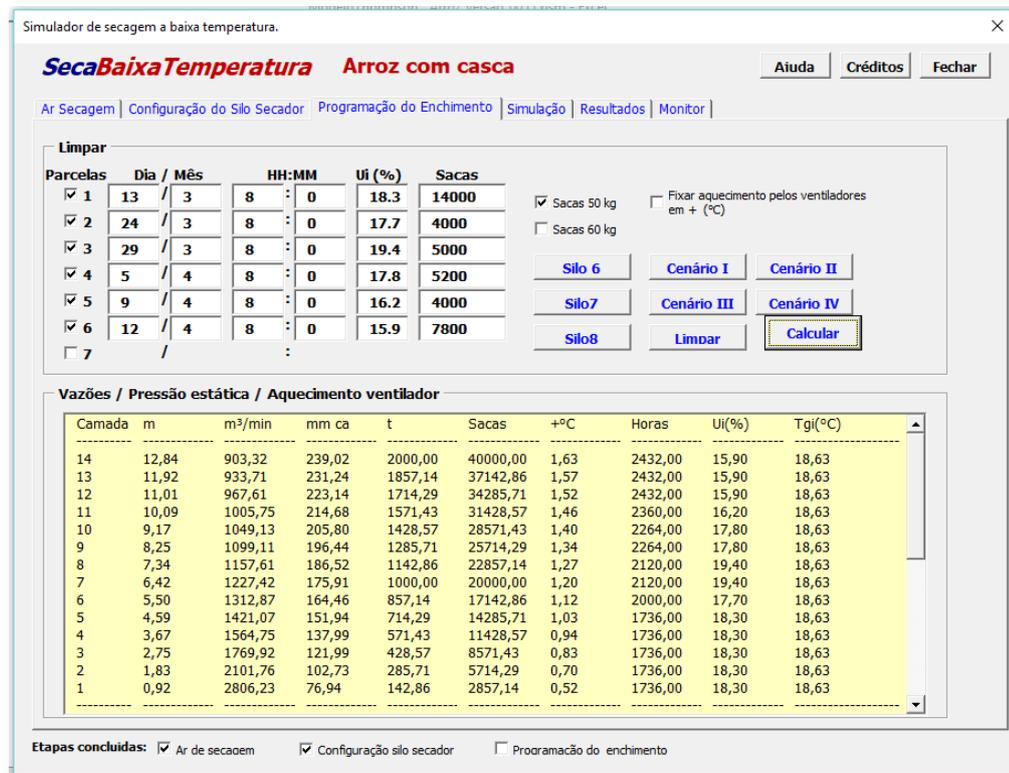


Figura 23: Terceira janela de diálogo do programa - “Programação do Enchimento”

A partir dos dados inseridos, o programa divide as parcelas em 14 camadas para a aplicação do Modelo de Thompson. Em relação a cada camada são apresentados os resultados: (i) altura do posicionamento da camada no silo; (ii) vazão do ar de secagem, Equação 16; (iii) pressão estática, Equação 17 (ASAE, 1996); (iv) quantidade de produto em toneladas e em sacas; (v) aquecimento do ar promovido pelos ventiladores, Equação 18; (vi) o horário do evento de adição da camada em relação ao ano (total de 8760 horas), (vii) teor de água inicial; e (viii) temperatura inicial da camada, calculada como sendo a média das temperaturas de bulbo úmido conforme os períodos definidos na janela “Ar Secagem”. Para os cálculos das vazões e pressões estáticas foi empregado o método da secante.

$$Q = \frac{Potv. 4500. \eta}{P_{est}} \quad (\text{Equação 16})$$

$$Pe = \frac{7,139 \cdot F_{area}^2}{\ln(1 + 0,220 \cdot F_{area})} \cdot Hg \quad (\text{Equação 17})$$

$$\Delta T = \frac{Pes}{\rho_{ar} \cdot c_{ar} \cdot \varepsilon} \quad (\text{Equação 18})$$

Em que:

P_{otv} = potência do ventilador (cv);

P_{est} = pressão estática no plenum (mm ca);

η = rendimento do conjunto motor e ventilador (decimal);

Pe = perda de carga imposta pela coluna de grãos (Pa);

F_{area} = fluxo de ar por área (m^3 de ar. $min^{-1} \cdot m^{-2}$);

Hg = altura da coluna de grãos (m);

ΔT = aquecimento referente a passagem do ar pelo ventilador ($^{\circ}C$);

Pes = pressão estática (kPa);

ρ_{ar} = massa específica do ar ($kg \cdot m^{-3}$);

c_{ar} = calor específico do ar ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$); e

ε = eficiência total do ventilador (decimal).

A quarta janela de diálogo, Figura 24, é empregada para condução da simulação segundo o Modelo de Thompson para a secagem em baixas temperaturas. Nessa janela, o usuário deverá selecionar o critério de parada da simulação, que pode ser: “Umidade final média (%)”, que encerra a simulação quando a média dos teores de água das camadas atinge o valor indicado; “Tempo de secagem”, que encerra quando o valor especificado para o tempo é atingido; ou “Umidade da camada superior”, que encerra a simulação quando a última camada atinge o valor de umidade especificado.

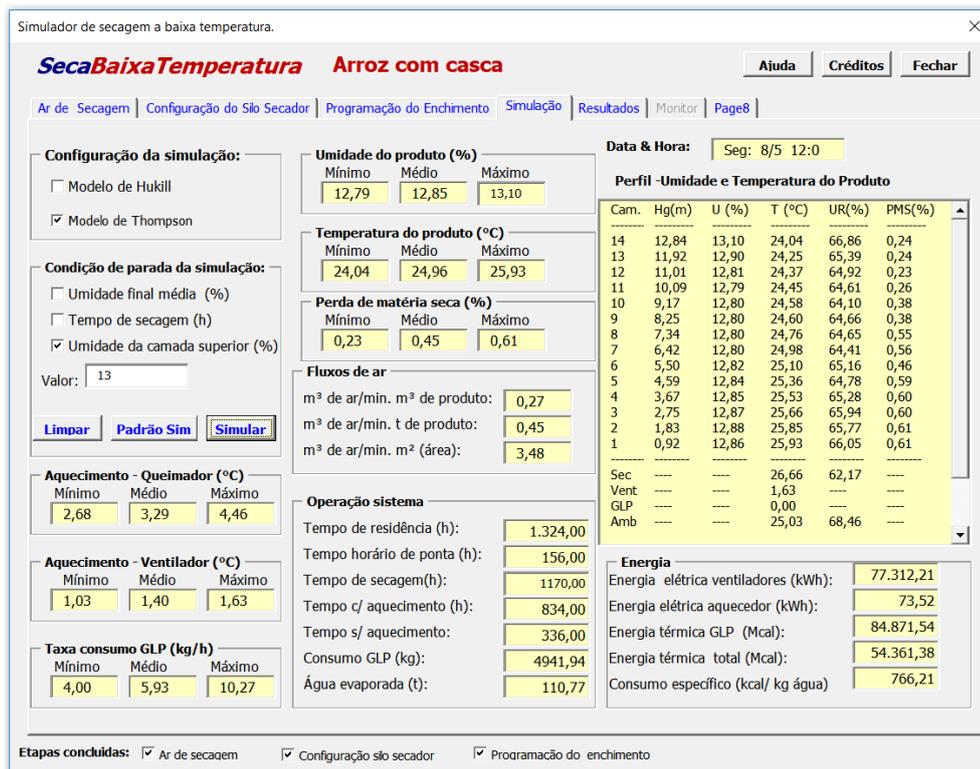


Figura 24: Quarta janela de diálogo do programa - “Simulação”

Como resultados, a janela de diálogo “Simulação” apresenta: tempo de residência; tempo de secagem; tempos com e sem aquecimento; consumo de GLP, quantidade de água evaporada; consumos de energia elétrica dos ventiladores e aquecedores; energias térmicas do GLP e total; consumo específico de GLP; e uma tabela contendo o perfil de umidade e temperatura final de cada camada, que inclui: (i) teor de água; (ii) temperatura dos grãos; (iii) umidade relativa do ar de exaustão; e (iv) perda de matéria seca, calculada a partir da Equação 19 (SEIB et al., 1980).

$$PMS = 100 - 100 \cdot \exp[-A \cdot (t/1000)^B \cdot \exp(C \cdot (T - 15,6))] + D \cdot (U_p - 14)/100$$

(Equação 19)

Em que:

t = tempo de exposição (horas);

T = temperatura da massa de grãos (°C);

U_p = teor de água do produto (%); e

A , B , C e D = constantes empíricas da equação, apresentadas na Tabela 2 para arroz longo ou médio.

Tabela 2: Constantes empíricas para o arroz longo e médio

Arroz	A	B	C	D
Longo	0,00189	0,654	0,068	33,61
Médio	0,00091	0,710	0,049	31,62

Fonte: Seib et al. (1980).

A janela “Simulação” ainda apresenta como resultados os valores mínimos, médios e máximos para o teor de água do produto, temperatura do produto, perda de matéria seca, aquecimento proveniente do queimador, aquecimento proveniente do ventilador e taxa de consumo de GLP, atingidos na simulação.

Por fim, na quinta janela de diálogo (Figura 25) são compilados e apresentados os resultados finais obtidos pelo programa, separados por parcela adicionada. Além destes, também são exibidos os consumos de energia elétrica, calculados em função do tempo total de funcionamento dos ventiladores e queimadores; e de GLP, calculado a partir do tempo com aquecimento, ou seja, os períodos em que o aquecimento do ventilador não foi suficiente para atingir a umidade de equilíbrio desejada.

Propriedades	Parcela #1	Parcela #2	Parcela #3	Parcela #4	Parcela #5	Parcela #6	Parcela #7	Total/Médias
Nº de camadas	5,00	1,00	2,00	2,00	1,00	3,00	0,00	14,00
Altura da Parcela (m)	4,59	0,92	1,83	1,83	0,92	2,75	0,00	12,84
Quantidade úmida (t)	714,29	142,86	285,71	285,71	142,86	428,57	0,00	2000,00
Quantidade seca (t)	669,69	134,86	264,09	269,33	137,27	413,99	0,00	1889,23
Água evaporada (t)	44,59	8,00	21,63	16,38	5,59	14,59	0,00	110,77
Perda matéria seca (%)	0,60 ¹	0,46 ¹	0,56 ¹	0,38 ¹	0,26 ¹	0,24 ¹	0,00 ¹	0,45 ¹
Perda supersecagem(t)	1,08	0,28	0,61	0,62	0,33	0,46	0,00	3,37
Tempo de residência (h)	1324,00	1060,00	940,00	796,00	700,00	628,00	0,00	0,00
Exposição ao fluxo de ar(h)	1146,00	940,00	826,00	682,00	562,00	282,00	0,00	0,00
Tempo horário de Ponta (h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	156,00
Tempo c/ aquecimento (h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	834,00
Tempo s/ aquecimento (h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	336,00
Umidade máxima (%)	12,88 ¹	12,82 ¹	12,80 ¹	12,80 ¹	12,79 ¹	13,10 ¹	0,00 ¹	13,10 ¹
Umidade média (%)	12,86 ¹	12,82 ¹	12,80 ¹	12,80 ¹	12,79 ¹	12,94 ¹	0,00 ¹	12,85 ¹
Umidade mínima(%)	12,84 ¹	12,82 ¹	12,80 ¹	12,80 ¹	12,79 ¹	12,81 ¹	0,00 ¹	12,79 ¹
Temperatura máxima (°C)	25,93 ¹	25,10 ¹	24,98 ¹	24,60 ¹	24,45 ¹	24,37 ¹	0,00 ¹	25,93 ¹
Temperatura média (°C)	25,67 ¹	25,10 ¹	24,87 ¹	24,59 ¹	24,45 ¹	24,22 ¹	0,00 ¹	24,96 ¹
Temperatura mínima(°C)	25,36 ¹	25,10 ¹	24,76 ¹	24,58 ¹	24,45 ¹	24,04 ¹	0,00 ¹	24,04 ¹
Consumo GLP(kg)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4941,94
Energia elétrica-tota(kWh)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77385,72

¹: Valores médios

Etapas concluídas: Ar de secagem Configuração silo secador Programação do enchimento

Figura 25: Quinta janela de diálogo do programa - “Resultados”

4.3 Validação do modelo

A validação do modelo foi conduzida por meio da comparação dos dados reais obtidos para os Silos 06, 07 e 08, com os simulados. Vale ressaltar que os procedimentos experimentais não interferiram na rotina operacional da empresa. Desse modo, cada silo apresentou diferentes estratégias de enchimento, ao que se refere às quantidades e teores de água iniciais de cada parcela, bem como os intervalos de depósito e teores de água finais.

Para proceder a validação, foram consideradas as variáveis: tempo de secagem, teor de água final da última camada de produto, e os consumos de energia elétrica e GLP. Durante a avaliação do tempo de secagem, o critério de parada da simulação escolhido foi o teor de água final da última camada. Para os demais, o critério foi alterado para os tempos de secagem experimentais de cada silo.

Os resultados foram comparados através do cálculo do erro relativo percentual, apresentado pela Equação 20, que expressa a magnitude da diferença existente entre um valor real medido e um simulado, dividida pela magnitude do mesmo valor real. O método permite determinar o quão próximos estão os valores na forma de porcentagem.

$$Er = \frac{|V_{sim} - V_{real}|}{V_{real}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 20})$$

Em que:

Er = erro relativo percentual entre os valores (%);

V_{sim} = valor resultante da simulação; e

V_{real} = valor real medido durante os experimentos.

4.4 Experimentação com o modelo

Após a validação do modelo, foram conduzidas comparações de cenários, para determinar as melhores estratégias operacionais de enchimento dos silos durante a secagem de arroz com casca a baixa temperatura.

4.4.1 Etapa 1: enchimento em parcelas com quantidades iguais de produto

Durante a primeira etapa foram comparados quatro cenários: I - parcela única; II - duas parcelas, cada uma com 50,00 % da capacidade estática do silo; III - três parcelas, cada uma com 33,33 %; e IV - cinco parcelas, cada uma com 20,00 %. Esses cenários foram comparados considerando, individualmente, os teores de água iniciais das parcelas iguais a 16, 17, 18, 19 e 20 %.

Para os quatro cenários os dados de entrada relativos as janelas de diálogo “Ar secagem” e “Configuração do Silo Secador” foram iguais aos definidos para o Silo 06 (Figuras 23 e 24). O intervalo entre os carregamentos das parcelas foi definido em 168 h (7 dias) e o critério de parada para as simulações foi o teor de água final da última camada igual a 13,0 %.

As variáveis resposta analisadas foram: tempo de secagem, perdas de matéria seca e por supersecagem, e os consumos de energia elétrica e GLP.

4.4.2 Etapa 2: enchimento em parcelas com diferentes quantidades de produto

Durante os experimentos da Etapa 2, o Cenário I também correspondeu ao enchimento em parcela única. Nos Cenários II, III e IV, o enchimento foi realizado em três parcelas, sendo que, na primeira situação, as camadas inferiores apresentaram maior quantidade de produto, enquanto na segunda situação, foram as camadas superiores que apresentaram as maiores quantidades de produto. As quantidades percentuais de produto carregados em cada parcela para as duas situações estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Composição do enchimento parcelado do silo nos Cenários II, III e IV das Situações 1 e 2

Cenários	Quantidades percentuais por parcela (%)		
	inferior	intermediária	superior
Situação 1			
II	70	20	10
III	60	20	20
IV	50	30	20
Situação 2			
II	10	20	70
III	20	20	60
IV	20	30	50

Os dados de entrada relativos as janelas de diálogo “Ar secagem” e “Configuração do Silo Secador” também foram iguais aos definidos para o Silo 06 (Figuras 23 e 24). Durante as simulações desta etapa, foi utilizado somente o teor de água inicial de 18 % e tempo entre a adição das parcelas de 7 dias. O critério de parada para as simulações foi o teor de água final da última camada igual a 13,0 %.

Os resultados foram analisados em relação ao tempo de secagem, consumo de energia elétrica e GLP, quantidade de água evaporada, tempo de aquecimento com o gás e consumo específico de GLP.

Por fim, para todos os cenários da primeira e da segunda etapa, com teor de água inicial de 18 %, foram determinados os custos relativos aos consumos de energia elétrica e GLP. Através deste critério foram definidas as melhores estratégias operacionais, considerando a tarifa para a energia elétrica de R\$ 0,41.kWh⁻¹ e para o GLP de R\$ 4,24.kg⁻¹.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dados coletados do sistema real

Descreve-se a seguir a análise dos dados reais.

5.1.1 Estratégia de preenchimento dos silos

O preenchimento dos Silos 06, 07 e 08 foi realizado de forma parcelada de acordo com a Tabela 4. Na Tabela, para cada parcela, são apresentadas as datas das operações; os teores de água iniciais, medidos durante o recebimento, que fornece uma média para o conteúdo total de arroz adicionado no silo em cada parcela; os teores de água dos grãos, já em processo de secagem, medidos na profundidade de até dois metros e antecedendo a adição de uma nova parcela; as quantidades de arroz adicionado; e os estoques totais no silo.

Tabela 4: Roteiro de preenchimento dos Silo 06, 07 e 08

Silo	Parcela	Data	Teor de água (% b. u.)		Quantidade de produto (t)	
			parcela subjacente	inicial médio	Adicionada	Acumulada
06	1	13/03/2018	18,3	-	700	700,00
	2	24/03/2018	17,7	16,6	200	900,00
	3	29/03/2018	19,4	17,2	250	1.150,00
	4	05/04/2018	17,8	17,9	260	1.410,00
	5	09/04/2018	16,2	-	200	1.610,00
	6	12/04/2018	15,9	16,1	390	2.000,00
07	1	15/03/2018	18,2	-	750	750,00
	2	24/03/2018	17,7	17,5	106,25	856,25
	3	31/03/2018	19,3	-	439,1	1.295,35
	4	07/04/2018	17,8	19,3	440	1.735,35
	5	09/04/2018	16,2	19,3	200	1.935,35
	6	13/04/2018	15,4	19,2	50	1.985,35
	7	15/03/2018	18,2	-	750	2735,35
08	1	09/03/2018	18,4	-	691,55	691,55
	2	22/03/2018	19,3	17,6	300	991,55
	3	04/04/2018	18,2	15,4	158,45	1.150,00
	4	09/04/2018	16,2	18,2	312,2	1.462,35
	5	15/04/2018	16,9	17,5	525,5	1.987,70

Além dos teores de água iniciais de cada camada, os teores de água finais atingidos também variaram em cada silo. A secagem foi encerrada quando a última camada atingiu 14,10, 13,20 e 14,40 % para os Silo 06, 07, e 08, respectivamente.

5.1.2 Estimativa do consumo de energia elétrica

Para estabelecer um comparativo entre os três silos utilizados durante os experimentos, da variação nas medidas de voltagem e de corrente elétrica dos queimadores e dos ventiladores, ao longo do tempo de secagem, foram elaborados os gráficos apresentados da Figura 26 “a” e “b”.

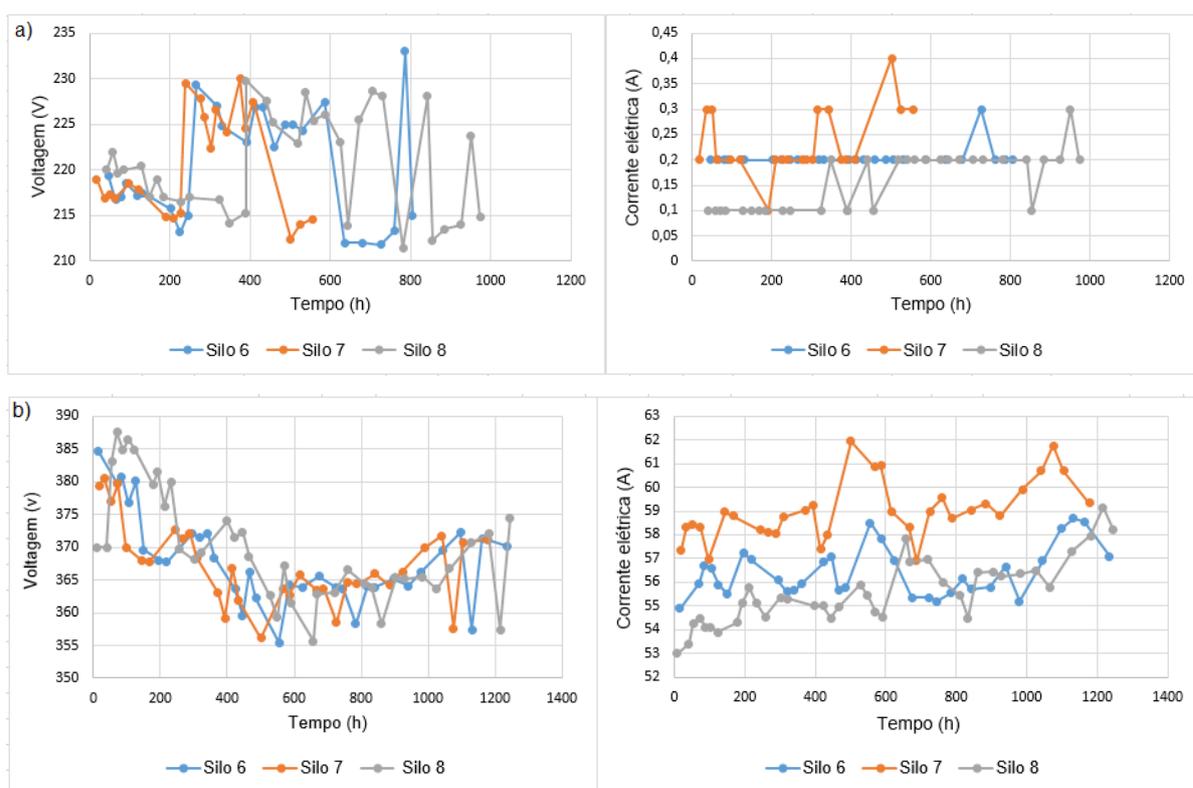


Figura 26: Variação das medidas de voltagem e corrente elétrica nos Silos 06, 07 e 08 (sendo a) dos queimadores e b) dos ventiladores)

O tempo total de funcionamento dos queimadores e dos ventiladores de cada silo, assim como as médias aritméticas e desvios das medidas de corrente elétrica e voltagem estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados de tempo de funcionamento e parâmetros elétricos para os queimadores e ventiladores de cada silo

Silo	Parâmetros	Queimadores	Ventiladores
06	Tempo (h)	874,0	1300,5
	Corrente (A)	0,20 ± 0,02	56,42 ± 1,37
	Voltagem (V)	220,37 ± 6,16	367,93 ± 6,81
07	Tempo (h)	621,1	1342,0
	Corrente (A)	0,23 ± 0,06	59,02 ± 1,29
	Voltagem (V)	220,51 ± 5,73	367,42 ± 6,17
08	Tempo (h)	1011,0	1277,0
	Corrente (A)	0,16 ± 0,66	55,54 ± 1,78
	Voltagem (V)	220,58 ± 5,49	370,08 ± 8,65

Ao analisar as variações de voltagens e correntes elétricas a partir da Figura 26, os silos apresentaram desempenho similar tanto para os queimadores quanto para os ventiladores. Este comportamento também é observado ao comparar as médias e desvios apresentados na Tabela 7.

Em relação ao tempo de funcionamento, ao considerar os queimadores, o Silo 07 apresentou tempo total bem inferior aos demais (621,1 horas), seguido pelo Silo 06 e pelo Silo 08. Por outro lado, avaliando os ventiladores, os três foram mais homogêneos ao apresentarem valores mais próximos. Essa diferença entre os queimadores pode ser explicada pela independência do sistema de acionamento, já que o queimador de cada silo é acionado de acordo com o sensor de umidade relativa localizado em seu plenum. Outro ponto a ser considerado é a localização dos silos na planta da empresa, uma vez observado que o Silo 07 está posicionado de forma a receber incidência de radiação solar direta, praticamente o dia todo, enquanto para o Silo 08, a situação é inversa.

O consumo de energia elétrica médio foi calculado a partir das Equações 02 e 03 para os ventiladores, e 02 e 04 para os queimadores. Ao considerar apenas os ventiladores, foram estimados consumos de energia elétrica de 86037,36; 92745,53; e 83650,94 kWh para os Silos 06, 07 e 08, respectivamente. Para os queimadores, novamente para os Silos 06, 07, e 08 foram estimados consumos de 38,52; 31,50; e

35,68 kWh. Portanto, durante o período de secagem nos Silos 06, 07 e 08, foram consumidos no total 86075,88; 92777,03; e 83686,62 kWh, respectivamente.

5.1.3 Estimativa do consumo de gás

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente durante o período de secagem apresentaram comportamento variável, conforme apresentado na Figura 27. Portanto, a análise foi realizada considerando as médias dessas grandezas em quatro intervalos de mesma duração: I (0:00 às 5:59 h), II (6:00 às 11:59 h), III (12:00 às 17:59 h) e IV (18:00 às 23:59); sendo os resultados apresentados na Tabela 6.

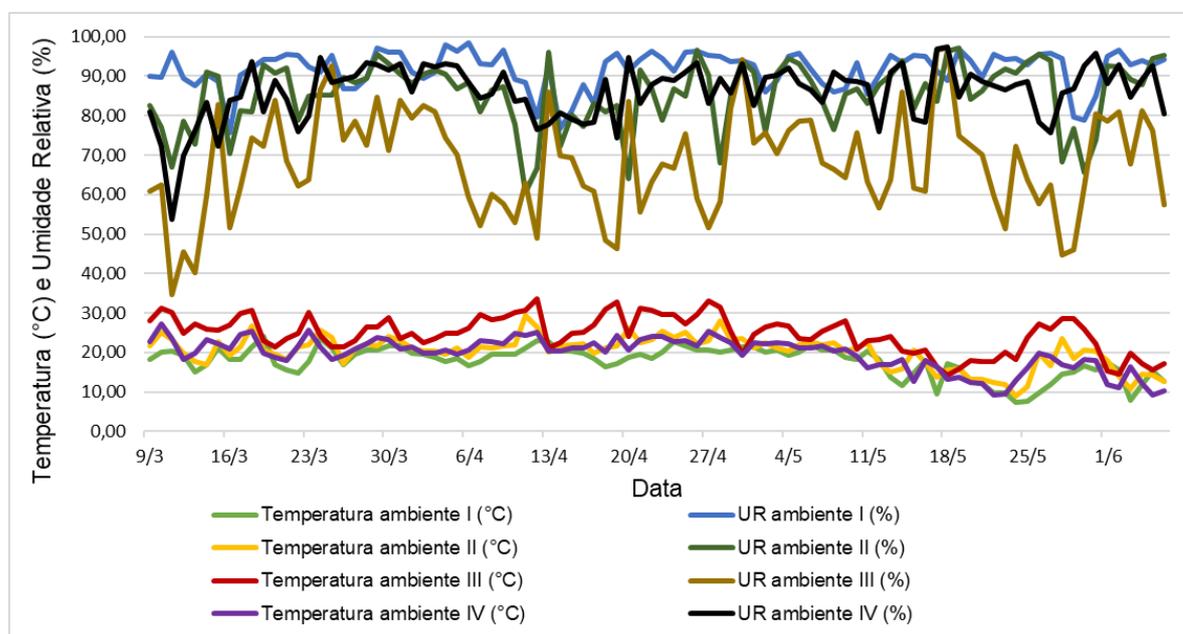


Figura 27: Variação da temperatura e umidade relativa do ar ambiente durante os intervalos I, II, III, e IV

Tabela 6: Temperaturas e umidades relativas médias do ar ambiente obtidas durante os intervalos I, II, III, e IV

Variáveis	Intervalo I	Intervalo II	Intervalo III	Intervalo IV
Temperatura ambiente média (°C)	17,67	20,14	25,03	19,98
Umidade relativa média (%)	91,79	85,83	68,46	86,10

A estimativa do consumo de gás de cada silo foi realizada a partir dos dados psicrométricos do ar ambiente e do ar de secagem medidos quatro vezes ao dia (09:00, 14:00, 17:00 e 22:00 h). O aumento médio de temperatura do ar ao passar apenas pelos ventiladores, a taxa média de consumo de GLP e o consumo total de GLP para cada silo foram apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Estimativa do consumo de gás durante a secagem nos silos 06, 07 e 08

Silo	Aquecimento médio devido aos ventiladores (°C)	Taxa média de consumo de gás (kg de GLP.h⁻¹)	Consumo total de gás (kg de GLP)
06	2,75	6,22 ± 1,51	5435,95
07	3,14	5,06 ± 1,23	3142,79
08	3,04	5,54 ± 1,56	5605,58

Os resultados encontrados se mostraram consistentes com as especificações dos queimadores, que possuem chama modulante de 0 a 9,0 kg de GLP.h⁻¹. O Silo 07 apresentou menor consumo médio de gás e menor consumo total, como era de se esperar considerando que o tempo de funcionamento dos queimadores foi bem inferior aos demais. As diferenças de consumo de gás também podem ser relacionadas ao posicionamento dos silos, já que o critério utilizado para dosar a quantidade de gás liberada para queima é a umidade relativa medida no plenum.

5.1.4 Perda de carga no sistema

Os resultados obtidos através dos experimentos de vazão do ar de secagem e de pressão estática para cada silo estão apresentados na Tabela 8, juntamente com os resultados simulados pelo modelo. Para os cálculos, foi adotada uma massa específica para o arroz com casca de 600 kg.m⁻³ e os diâmetros do topo e da base da campânula utilizada foram de 6,23 e 30,00 cm.

Tabela 8: Resultados reais e calculados para vazão de ar de secagem, pressão estática e fluxo de ar para os Silos 06, 07 e 08

Silo	Medições	Dados Reais			Dados Calculados		
		Vazão (m ³ de ar.min ⁻¹)	Pressão estática (mm ca)	Fluxo de ar (m ³ de ar.min ⁻¹)	Vazão (m ³ de ar.min ⁻¹)	Pressão estática (mm ca)	Fluxo de ar (m ³ de ar.min ⁻¹)
6	1 ^a	3,68	1869,3	2,67	1564,8	137,99	2,73
	2 ^a	6,44	1619,2	1,15	1227,4	175,91	1,22
	3 ^a	12,88	1000,7	0,5	903,32	239,02	0,45
7	1 ^a	4,6	1751,3	2,34	1424	151,62	2,01
	2 ^a	7,36	1422,4	1,1	1160,1	186,12	1,02
	3 ^a	12,88	1222,8	0,62	905,3	238,5	0,46
8	1 ^a	2,96	1813,1	2,62	1782,8	121,11	4,18
	2 ^a	5,08	1751,3	1,77	1322,5	163,26	1,56
	3 ^a	12,88	1000,7	0,5	910,01	237,26	0,45

Ao comparar os resultados com as especificações técnicas dos ventiladores para vazão de ar com o silo cheio ($23.742 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) e vazão específica ($0,21 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ou $0,35 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$), todos os silos atendem aos critérios previstos durante o dimensionamento.

Durante a simulação, o programa divide a coluna de grãos em 14 camadas, portanto, as diferenças apresentadas nas alturas das colunas entre os dados reais e as simulações ocorreram devido a necessidade de aproximação para a altura da camada mais próxima daquela em que foi realizada a medição. Apesar disso, ainda é possível comparar as demais variáveis, em que, para os três silos, os dados simulados acompanharam o comportamento dos dados reais, embora apresentem diferenças de grandeza. A medida em que os silos foram preenchidos, a vazão e o fluxo de ar de secagem diminuíram, diferentemente da pressão estática que aumenta com a altura da camada de arroz.

5.1.5 Manutenção da qualidade

Durante a secagem e a armazenagem (até novembro de 2018) foram retiradas amostras na profundidade de até dois metros da camada superior de cada silo para as análises qualitativas, realizadas como apresentado no exemplo da Figura 28. Os respectivos resultados das análises para os Silos 06, 07 e 08 estão apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11.



Figura 28: Exemplo de classificação de amostra para verificação da qualidade

Tabela 9: Resultados das classificações das amostras do Silo 06

Data	Teor de água (%)	Quebrados (%)	Inteiros (%)	Renda (%)	Mof/ Ard/ Pt (%)	Rajado (%)	Manch /Pic (%)	Amarelo (%)	Gessados (%)	B. branca (%)	Sem casca	Insetos
23/03	16,8	14,47	56,81	71,28	0	0,196	0,701	0	0,028	5,06	2,1	Não
03/04	17,2	10,06	61,02	71,08	0	0,239	0,928	0	0,028	4,96	0,8	Não
06/04	17,4	9,22	60,19	69,41	0	0,201	0,821	0	0,086	4,84	1,43	Não
27/04	16,1	16,9	52,48	69,38	0	0,63	1,9	0	0	6,35	0,98	Não
12/05	16	15,34	54,81	70,15	0	0,88	2,32	0	0	7,31	0,56	Não
29/05	15,6	13,71	55,91	69,62	0	0,37	0,99	0	0,08	7,61	0,78	Não
08/06	14	12,93	57,87	70,8	0	0,63	0,67	0	0	9,27	0,64	Não
30/06	14	13,1	57,32	70,42	0	1,59	2,21	0	0,14	4,26	1,44	Não
18/07	14,6	14,7	52,6	67,3	0	0,26	0,38	0	0	3,2	0,6	Não
25/07	14,4	15,14	54,86	70	0	1,01	1,36	0,1	0	2,07	1,7	Não
01/08	14,1	16,28	52,94	69,22	0	0,87	2,47	0	0,08	2,47	0,74	Não
08/08	14,2	15,28	55,69	70,97	0	1,29	2,83	0	0,11	2,08	1,52	Não
15/08	14,3	13,39	57,66	71,05	0	1,04	3,61	0	0,14	3,37	1,16	Não
06/09	14,3	14,45	54,94	69,39	0	0,76	1,06	0	0,08	2,7	1,52	Não
13/10	13,6	14,19	55,15	69,34	0	0,98	1,06	0	0	2,56	2,38	Não
12/11	13,3	14,64	52,89	67,53	0	0,87	1,34	0	0,11	3,93	1,3	Não
21/11	13,1	15,13	53,01	68,14	0	0,67	1,33	0	0,11	3,11	1,82	Não

Nota: Fim da secagem em 01/06.

Tabela 10: Resultados das classificações das amostras do Silo 07

Data	Teor de água (%)	Quebrados (%)	Inteiros (%)	Renda (%)	Mof/ Ard/ Pt (%)	Rajado (%)	Manch /Pic (%)	Amarelo (%)	Gessados (%)	B. branca (%)	Sem casca	Insetos
23/03	18,4	9,29	63	72,29	0	0	0,414	0	0,096	5,23	3,06	Não
03/04	18,9	7,66	62,74	70,4	0	0,056	1,35	0	0,056	4,12	0,88	Não
08/04	19,1	9,93	58,53	68,46	0	0,175	1,314	0	0,073	4,79	1,18	Não
27/04	15,6	14,53	55,99	70,52	0	0,39	1,12	0	0,19	7,61	0,84	Não
12/05	16	16,8	54,78	71,58	0	0,41	1,04	0	0,11	7,47	0,82	Não
29/05	15,6	14,88	55,35	70,23	0	0,14	0,38	0	0,04	7,23	0,94	Não
30/06	14,5	13,99	56,81	70,8	0	0,59	1,08	0	0,11	4,7	1,56	Não
18/07	15	12,2	56,2	68,4	0	0,28	0,36	0	0	5,87	0,58	Não
25/07	13,7	11,6	58,55	70,18	0	0,82	1,66	0	0,08	4,28	1,34	Não
01/08	13,6	13,6	56,25	69,71	0	0,61	0,89	0	0,14	2,91	0,62	Não
08/08	13,3	13,25	56,87	70,12	0	1,18	2,08	0	0,08	3,47	1,44	Não
15/08	14,2	11,16	58,06	69,22	0	1,04	3,61	0	0,23	3,58	1,98	Não
06/09	13,9	13,34	57,3	70,64	0	0,68	0,55	0	0,03	3,49	0,74	Não
13/10	13,4	12,2	56	68,2	0	0,74	1,33	0	0,26	3,44	1,2	Não
12/11	13,2	13,25	53,08	66,33	0	0,45	0,22	0	0,06	3,51	1,26	Não
21/11	12,9	13,57	54,88	68,45	0	0,56	0,86	0	0,08	2,55	0,74	Não

Nota: Fim da secagem em 08/06.

Tabela 11: Resultados das classificações das amostras do Silo 08

Data	Teor de água (%)	Quebrados (%)	Inteiros (%)	Renda (%)	Mof/ Atd/ Pt (%)	Rajado (%)	Manch /Pic (%)	Amarelo (%)	Gessados (%)	B. branca (%)	Sem casca	Insetos
13/03	17,5	9,74	61,13	70,87	0	0,211	0,677	0	0,141	5,64	0,46	Não
18/03	17,3	10,08	60,43	70,51	0,02	0,17	0,765	0	0,113	8,56	0,78	Não
22/03	17,6	9,1	62,4	71,5	0	0,139	0,643	0	0,111	5,74	0,72	Não
03/04	15,4	13,33	57,64	70,97	0	0,056	0,901	0	0,126	5,14	1,3	Não
09/04	18,6	9,5	59,67	69,16	0	0,0289	0,78	0	0,028	4,65	1,3	Não
27/04	16,5	13,92	57,34	71,26	0	0,71	0,77	0	0	8,99	0,86	Não
12/05	16,1	13,33	56,72	71,05	0	0,52	1,35	0	0	9,13	1,08	Não
29/05	14,4	14,33	56,72	71,05	0	0,5	1,35	0	0	9,12	1,08	Não
08/06	13,9	13,81	55,86	69,67	0	0,67	1,24	0	0	9,3	0,86	Não
30/06	13,9	13,65	57,74	71,39	0	0,57	1,05	0	0,06	3,15	1,68	Não
18/07	13,5	12,6	54,74	67,74	0	0,29	0,32	0	0,04	7,4	0,6	Não
25/07	13,6	10,62	58,52	69,14	0	0,66	2,34	0	0,03	5,38	1,86	Não
01/08	12,6	14,15	56,59	70,74	0	0,79	1,41	0	0,22	3,54	0,82	Não
08/08	12,1	11,55	59,23	70,78	0	0,89	2,64	0	0,08	4,18	1,94	Não
15/08	14,2	11,9	58,08	69,98	0	1,27	1,51	0	0,14	4,5	2,14	Não
06/09	13,3	13,64	56	69,64	0	0,63	0,43	0	0,08	3,66	0,86	Não
13/10	12,9	12,7	56,9	69,6	0	0,95	1,3	0	0,11	3	1,56	Não
12/11	13,3	12,05	56,02	68,07	0	0,3	0,7	0	0,07	4,28	1,2	Não
21/11	12,8	12,49	56,51	69	0	0,34	0,59	0	0,02	2,82	0,79	Não

Nota: Fim da secagem em 25/05.

O teor de água das camadas superiores (dois metros) foi avaliado durante a secagem para acompanhar o andamento do processo, e após a secagem para avaliar o estado de conservação dos grãos. Acompanhar a uniformidade do teor de água no silo é de grande importância, já que ao misturar dois lotes com diferentes teores de água, estes não se equilibram em um teor de água médio. Após o término do processo de secagem, as pequenas variações encontradas podem ser atribuídas ao erro do próprio equipamento de medição.

Dentre os parâmetros de classificação, os quebrados, inteiros, renda, rajados, gessados, barriga branca, e grãos sem casca são definidos principalmente pelas características dos grãos adicionados aos silos. Por isso, é de se esperar uma variabilidade entre as medidas ao trabalhar com grandes volumes armazenados, que foram formados por misturas de lotes. Além disso, ainda existe a variação provocada pelo emprego de diferentes classificadores para as amostras.

Já os parâmetros amarelos, mofados e ardidos, e a presença de insetos são influenciados diretamente pela execução da secagem e tempo de armazenamento. Para todas as análises realizadas, porém, não foram detectadas a presença destes defeitos (0 %) ou insetos. Estes resultados podem indicar que tanto a secagem quanto o armazenamento foram realizados de forma a inibir a proliferação de microrganismos e insetos.

5.2 Validação do programa implementado

Para validação do programa implementado foram comparados os parâmetros tempo de secagem, teor de água final, consumo de energia elétrica e consumo de gás, obtidos experimentalmente para os Silos 06, 07 e 08, com os dados gerados pela simulação no aplicativo desenvolvido.

5.2.1 Tempo de secagem

Visando a comparação dos tempos de secagem, os resultados obtidos experimentalmente, assim como com as simulações utilizando o aplicativo desenvolvido e o erro relativo entre os valores foram apresentados na Tabela 12. As simulações foram realizadas utilizando como critério de parada o teor de água final da última camada, sendo 14,10 % para o Silo 06, 13,20 % para o Silo 07 e 14,40 % para o Silo 08.

Tabela 12: Comparação dos valores experimentais e simulados para o tempo de secagem

Silo	Tempo de secagem experimental (h)	Tempo de secagem simulado (h)	Erro relativo (%)
6	1300,5	1246,0	4,2
7	1342,0	1230,0	8,3
8	1277,0	1252,0	2,0

Ao considerar os erros relativos obtidos, o programa melhor descreveu o comportamento do Silo 08, apresentando 2 % de erro relativo, o que representa 1,04 dias de secagem. Para o Silo 06, o erro foi de 4,2 %, ou seja 2,27 dias de secagem. Já para o Silo 07, o erro foi maior, chegando a 8,3 %, o que é equivalente a 4,66 dias do tempo de secagem total.

A partir destes resultados, observa-se que os dados simulados acompanharam os dados experimentais, embora tenham sido menores e apresentarem desvios de um silo para o outro. Estes desvios podem ser justificados dentro da variabilidade biológica particular do produto utilizado nas experimentações, ou ainda nas particularidades de cada sistema de secagem, que operaram sob diferentes configurações e de forma independente.

A secagem em baixas temperaturas é um processo lento e por isso, as variações das propriedades do produto armazenado são alteradas muito lentamente. Com isso, diferenças no tempo total de secagem são consideradas aceitáveis até certo ponto, pois em pouco irão influenciar nos resultados finais relacionados ao teor de água e à temperatura dos grãos (LOPES et al., 2005).

Para a secagem de grãos, erros relativos de até 15 % entre os dados experimentais e simulados são considerados satisfatórios para diversos autores (ZARE; CHEN, 2009; HARCHEGANI et al., 2012; RANJBARAN, EMADI e ZARE, 2014). Portanto, seguindo este critério, o programa apresentou precisão ao simular o tempo de secagem para os três sistemas analisados.

5.2.2 Teor de água final do produto

Para as comparações dos teores finais de água do produto, foram utilizados como critérios de parada das simulações os tempos de secagem experimentais de cada silo, sendo 1300,5 h para o Silo 06, 1342,0 h para o Silo 07 e 1277,0 h para o

Silo 08. Os resultados obtidos foram apresentados na Tabela 13, juntamente com os resultados experimentais e erros relativos.

Tabela 13: Comparação dos valores experimentais e simulados para o teor de água final do arroz com casca

Silo	Teor de água experimental (% b. u.)	Teor de água simulado (% b. u.)	Erro relativo (%)
6	14,10	12,85	8,9
7	13,20	12,86	2,6
8	14,40	12,94	10,1

A comparação entre os teores de água experimental e simulado para o Silo 07 foi a que apresentou o melhor resultado, com erro relativo de 2,6 %, o que representa uma diferença percentual de 0,34 % no teor de água final. Os Silos 06 e 08 apresentaram erros maiores de 8,9 e 10,1 %, o que representa, respectivamente, diferenças de 1,25 e 1,46 % nos teores de água finais.

Os teores de água finais da última camada simulados foram menores do que os observados experimentalmente, portanto, a quebra de umidade proporcionada pela secagem excessiva em relação ao real deve ser levada em consideração. Para o Silo 06, a quantidade final de produto estimada através do modelo é 1,43 % menor do que o valor real. De forma similar, para os Silos 07 e 08 é de 0,39 e 1,67 %, respectivamente.

Novamente, a diferença de resultados entre os silos pode ser justificada pela variabilidade biológica do produto e, neste caso, pelo uso da média do teor de água do dia para descrever o teor de água da parcela adicionada durante a simulação. Entretanto, todos os erros relativos se enquadraram no critério de aceitação de até 15 %, o que indica uma boa efetividade na simulação para o parâmetro teor de água final do produto.

O mesmo critério foi utilizado por Ranjbaran, Emadi e Zare (2014) ao realizarem a modelagem e simulação em *Computational Fluid Dynamics* (CFD) da secagem de arroz com casca em secador de camada espessa/silo. Durante a validação, ao avaliar o teor de água final dos grãos, foram obtidos erros relativos máximos de 9 %.

5.2.3 Consumo de energia elétrica e de gás

O consumo de energia elétrica e de GLP são dependentes do tempo de secagem, portanto, como critério de parada durante as simulações, foram utilizados também os tempos secagem experimentais de cada silo. Os resultados obtidos, assim como os resultados experimentais e erros relativos foram apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Comparação dos valores experimentais e simulados para o consumo de energia elétrica, tempo de acionamento dos queimadores de gás e consumo de GLP

Parâmetros	Origem	Silo 06	Silo 07	Silo 08
Consumo de energia elétrica (kWh)	Experimental	86075,88	92777,03	83686,62
	Simulado	85984,35	88024,58	83550,84
	Erro padrão (%)	0,10	5,12	0,16
Tempo acionamento queimadores de GLP (h)	Experimental	874	621,1	1011
	Simulado	928	952	912
	Erro padrão (%)	6,2	53,3	9,8
Consumo de GLP (kg)	Experimental	5435,95	3142,79	5605,58
	Simulado	5361,68	5338,60	5518,21
	Erro padrão (%)	1,36	69,87	1,56

Ao analisar o consumo de energia elétrica, os valores simulados se apresentaram ligeiramente menores do que os dados experimentais, especialmente para os Silos 06 e 08, com erros relativos de 0,10 e 0,16 %. Para o Silo 07, o erro foi um pouco maior, chegando a 5,12 %, porém, de forma geral, o aplicativo apresentou boa precisão ao descrever os três sistemas.

Ao considerar o consumo de gás, os valores simulados para cada silo apresentaram maior discrepância do que os demais parâmetros avaliados. De forma semelhante, ao analisar o erro relativo, os Silos 06 e 08 atingiram, respectivamente, 1,36 e 1,56 %, e o Silo 07 apresentou grande diferença, atingindo 69,87 %.

Entretanto, para complementar a análise do consumo de gás, é importante avaliar também o tempo de aquecimento, que no programa é calculado baseado nas características psicrométricas do ar ambiente. Para os Silos 06 e 08 os erros relativos (6,2 e 9,8 %) se enquadram dentro dos critérios de aceitação citados. Nesses casos, o erro observado se deve, possivelmente, à utilização dos valores médios para descrever a temperatura e a umidade relativa do ar ambiente durante o período da secagem.

Para o Silo 07, por outro lado, grande diferença foi observada novamente, com o erro relativo chegando a 53,3 %. Essa discrepância em relação aos demais silos pode ser explicada pela independência do sistema de acionamento do queimador. O Silo 07 apresentou tempo de aquecimento bem inferior aos demais, apesar de estar inserido no mesmo contexto de condições do ar ambiente, com diferença apenas de posicionamento do silo na planta da empresa.

Diante dos resultados apresentados, o aplicativo foi capaz de descrever o comportamento do consumo de GLP de forma satisfatória para os Silos 06 e 08. Como resultado geral da validação, ao considerar todos os parâmetros avaliados, é possível inferir que o modelo implementado conseguiu descrever o processo da secagem, a baixa temperatura, do arroz com casca com boa precisão.

5.3 Comparação de cenários de secagem

5.3.1 Etapa 1: enchimento em parcelas com quantidades iguais de produto

Durante os experimentos da primeira etapa foram avaliados quatro cenários com diferentes estratégias de preenchimento do silo. Na primeira estratégia o silo foi completamente preenchido em uma única parcela. Já nos cenários II, III e IV, foi respectivamente preenchido com duas, três e cinco parcelas.

Os resultados das simulações em função do teor de água inicial dos grãos (16, 17, 18, 19 e 20 %), incluindo o tempo de secagem total, os consumos de energia elétrica e GLP, e as perdas de matéria seca (PMS) média das camadas e por supersecagem foram apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Resultados da simulação para os cenários I, II, III e IV para diferentes teores iniciais de água do produto

Teor de água inicial (% b. u.)	Cenário	Tempo de secagem (h)	Consumo energia elétrica (kWh)	Consumo de GLP (kg)	PMS média (%)	Perda por supersecagem (toneladas)
16	I	1164	76217,37	3206,93	0,39	3,86
	II	1116	73074,27	3299,94	0,36	3,80
	III	1074	70324,17	3431,15	0,34	3,70
	IV	1060	69407,33	3994,56	0,31	3,24
17	I	1220	79884,04	3347,00	0,48	3,74
	II	1170	76609,94	3440,45	0,45	3,45
	III	1128	73859,84	3564,85	0,42	3,53
	IV	1112	72812,28	4141,64	0,34	3,49
18	I	1320	87307,06	4266,45	0,60	3,40
	II	1266	84376,78	4383,93	0,56	3,35
	III	1218	80560,68	4477,97	0,53	3,23
	IV	1180	78047,39	5045,84	0,46	3,10
19	I	1412	93391,78	4540,29	0,74	3,62
	II	1372	90746,16	4673,79	0,71	3,17
	III	1326	87703,71	4806,78	0,67	3,02
	IV	1250	82676,96	5244,95	0,59	2,99
20	I	1546	102254,45	4941,90	0,94	3,19
	II	1500	99212,00	5062,38	0,90	3,03
	III	1442	95376,26	5179,36	0,82	3,38
	IV	1360	89952,51	5589,77	0,75	2,86

Para melhor visualização, o gráfico da Figura 29 apresenta o comportamento do tempo de secagem nos diferentes cenários e para cada teor de água inicial avaliado.

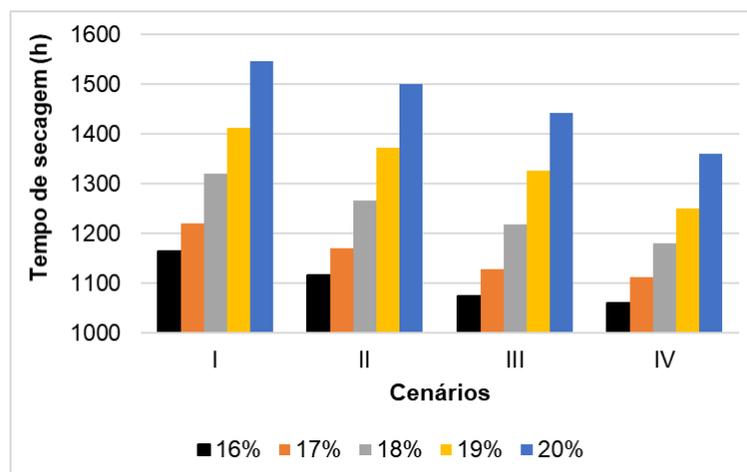


Figura 29: Comparação dos tempos de secagem dos Cenários I, II, III e IV em função do teor de água inicial

O carregamento parcelado do silo (Cenários II, III e IV) proporcionou reduções nos tempos de secagem para todos os teores iniciais de água avaliados, sendo os Cenários IV os que obtiveram os menores tempos. Ao comparar apenas os Cenários I e IV para cada teor de água, a redução foi de, respectivamente, 8,93; 8,85; 10,60; 11,47 e 12,03 % para os teores de água 16; 17; 18; 19 e 20 %. Portanto, além da adição em parcelas resultar na redução do tempo de secagem, esta redução foi maior para os maiores teores de água iniciais.

Como consequência da redução do tempo de secagem, também foi observada a redução do consumo de energia elétrica, sendo estabelecida uma correlação positiva entre estas variáveis. O consumo de gás, por outro lado, aumentou gradativamente com a adição de um maior número de parcelas. Apesar do tempo com aquecimento ter diminuído, foi observado um aumento da taxa de consumo médio de GLP (kg.h^{-1}). Este aumento no consumo de gás pode ser causado pelo não aproveitamento de todo o potencial térmico do gás nos Cenários II, III e IV, durante a adição das primeiras parcelas, dessa forma, o ar de exaustão ainda possui potencial de secagem ao deixar a camada de grãos.

Através dos resultados (Tabela 15), também foi possível verificar que quanto mais longo o processo, dois problemas principais foram evidenciados: o aumento da perda de matéria seca (PMS), principalmente nas camadas superiores, mais distantes do ar de entrada; e a secagem excessiva das camadas inferiores, que resultou no aumento das perdas por supersecagem.

Quanto maior o teor de água inicial das parcelas, maior foi a deterioração dos grãos, uma vez que a PMS é calculada em função do teor de água do produto e do tempo de exposição. Em contrapartida, o enchimento parcelado provocou a diminuição da perda de matéria seca média das camadas, sendo maior a redução com o aumento do número de parcelas. Este comportamento está claramente representado no gráfico da Figura 30, em que as menores porcentagens de PMS, para cada teor de água inicial, são observadas nos Cenários IV.

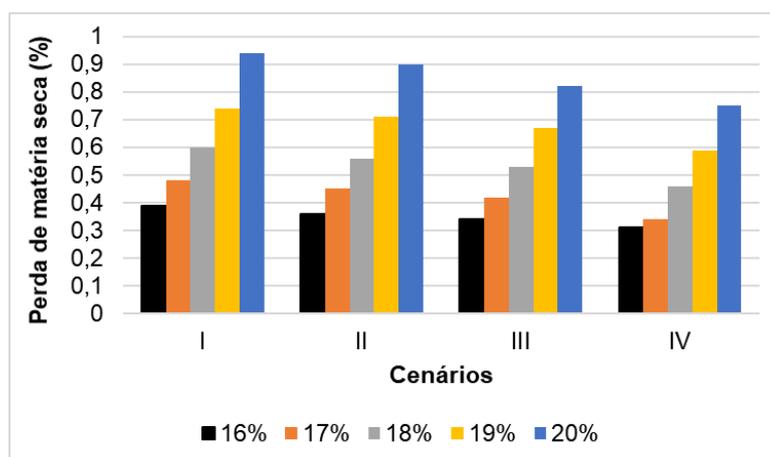


Figura 30: Comparação das perdas de matéria seca dos Cenários I, II, III e IV em função do teor de água inicial

Essa redução, entretanto, não foi suficiente nos experimentos com maiores teores de água iniciais (19 e 20 %), em que, para todos os cenários, a perda de matéria seca média ultrapassou o limite de 0,5 %, considerado aceitável segundo Kaleta e Górnicki (2013). Durante a simulação com os teores de água mais baixos (16 e 17 %), mesmo que para os quatro cenários todas as camadas tenham se enquadrado dentro do limite de 0,5 %, ainda assim foi possível observar a redução da PMS média das camadas com o aumento do parcelamento do enchimento.

Para o teor de água inicial de 18 %, os Cenários I, II e III também ultrapassaram o limite para a perda de matéria seca média das camadas, sendo evidenciado durante a simulação que a maior deterioração ocorreu nas camadas superiores do silo, devido ao maior tempo de exposição com maiores teores de água. O enchimento em 5 parcelas (Cenário IV), porém, possibilitou a redução da PMS média para dentro do aceitável (0,47 %), sendo que, para a maioria das camadas a perda foi inferior a 0,5 %, como apresentado na Tabela 16, cujos dados foram retirados da janela de diálogo “Simulação”

Tabela 16: Perfil de umidade e perda de matéria seca por camada resultante do Cenário IV para 18 % de teor de água inicial

Camadas	Altura (m)	Teor de água (%)	PMS (%)
14	12,78	13,10	0,36
13	11,87	12,91	0,35
12	10,96	12,85	0,41
11	10,05	12,84	0,41
10	9,13	12,83	0,41
9	8,22	12,85	0,45
8	7,31	12,84	0,46
7	6,39	12,85	0,46
6	5,48	12,87	0,51
5	4,57	12,87	0,52
4	3,65	12,88	0,52
3	2,74	12,87	0,57
2	1,83	12,88	0,58
1	0,91	12,85	0,58

Apesar da estratégia de enchimento parcelado ter minimizado as perdas, teores de água superiores a 18 %, para este sistema e na região em que está instalado, não possibilitaram a secagem segura e de qualidade nos cenários avaliados. Medidas extras devem ser tomadas, como a determinação de um limite para o teor de água dos grãos recebidos nos silos ou ainda a possibilidade do aumento do número de parcelas.

Seguindo a análise das perdas quantitativas, o gráfico da Figura 30 apresenta a comparação entre as perdas por supersecagem para os Cenários I, II, III e IV, para cada teor de água inicial.

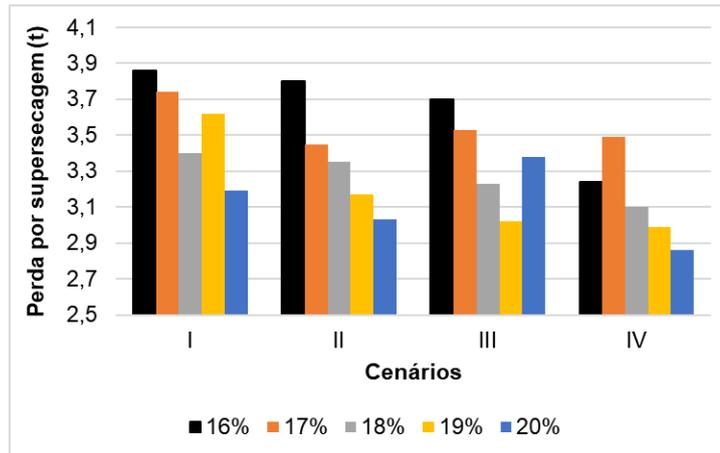


Figura 31: Comparação das perdas por supersecagem dos Cenários I, II, III e IV em função do teor de água inicial

Apesar do comportamento das perdas por supersecagem entre um cenário e outro não ser linear, observa-se uma tendência de redução com o aumento do número de parcelas. As menores perdas por supersecagem foram observadas para o Cenário IV de cada teor de água inicial, exceto para o teor de água de 17 %, que apresentou menor perda no Cenário II. As maiores reduções foram observadas para os teores de água de 19 e 16 %, entre seus respectivos Cenários I e IV, que representaram diminuições de 17,40 e 16,06 %.

De forma geral, dentre os cenários avaliados, o carregamento de forma parcelada se mostrou mais vantajoso para todos os teores de água iniciais. O cenário IV, foi o que apresentou os melhores resultados, principalmente para grãos com teor de água mais elevado, pois resultou na maior diminuição do tempo de secagem e das perdas quantitativas. A diminuição da perda de matéria seca significa também a diminuição das perdas qualitativas, já que é provocada pela respiração dos grãos e ação de microrganismos, e associados a esses processos tem-se o aumento do índice de grãos amarelos.

Resultados semelhantes foram encontrados por Valente, Souza e Queiroz (2015) e Dorn (2017) ao realizarem a simulação da secagem, em baixa temperatura, do arroz e do milho, respectivamente. Através do enchimento parcelado do silo foram verificadas a diminuição do tempo de secagem, do consumo de energia elétrica e da deterioração dos grãos, cuja intensidade também foi dependente do teor de água inicial do produto.

5.3.2 Etapa 2: enchimento em parcelas com diferentes quantidades de produto

Para análise mais detalhada dos custos do processo, foram realizadas comparações de cenários para duas situações distintas com enchimento parcelado em três parcelas (Tabela 3). Os resultados das simulações foram apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Resultados da simulação das situações 1 e 2, para os cenários I, II, III e IV com teor de água inicial de 18 %

Cenário	Tempo de secagem (h)	Consumo energia elétrica (kWh)	Consumo de GLP (kg)	Água evaporada. (t)	Tempo de aquecimento (h)	Consumo específico (kcal.kg ⁻¹ água evap.)
Situação 1						
I	1320	87307,06	4266,45	118,19	942	686,53
II	1296	85719,59	4328,63	118,34	924	686,38
III	1268	83867,44	4367,96	117,94	902	686,45
IV	1260	83338,28	4399,37	117,94	896	687,71
Situação 2						
I	1320	87307,06	4266,45	118,19	942	686,53
II	1320	87307,06	6323,66	118,19	942	880,79
III	1192	78840,87	4882,06	117,83	850	719,33
IV	1202	79502,54	4857,09	118,11	860	717,36

Para cada situação (1 e 2), ao comparar os Cenários II, III e IV ao Cenário I, o enchimento parcelado em três parcelas, resultou na diminuição do tempo de secagem, da energia elétrica e do tempo de aquecimento utilizando gás, como pode ser observado também nos gráficos das Figuras 32, 33 e 34.

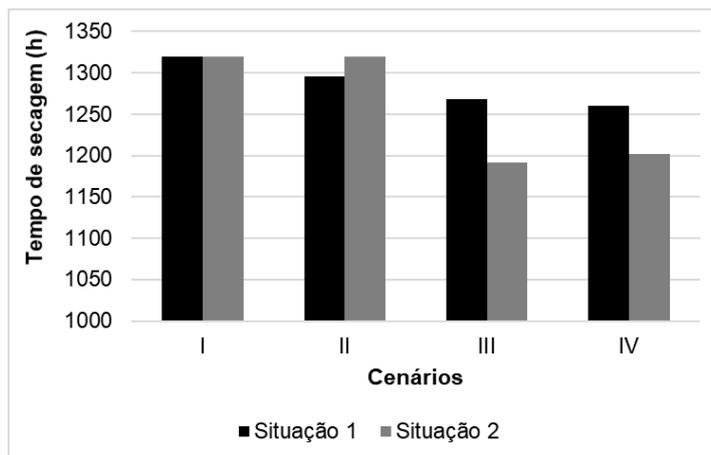


Figura 32: Comparação entre os tempos de secagem dos Cenários I, II, III e IV para as Situações 1 e 2

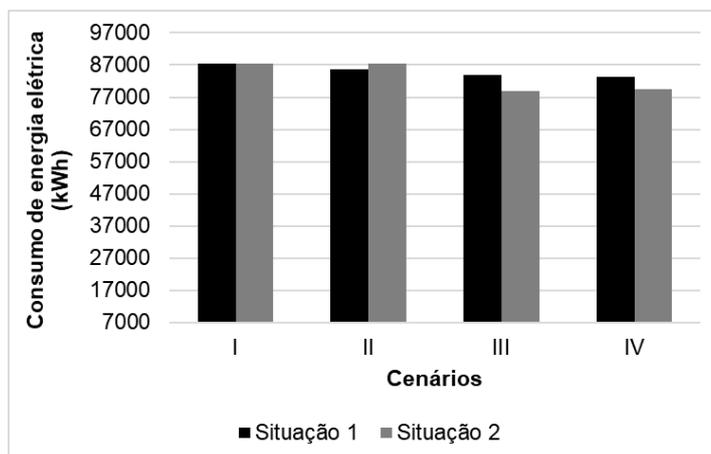


Figura 33: Comparação entre os consumos de energia elétrica dos Cenários I, II, III e IV para as Situações 1 e 2

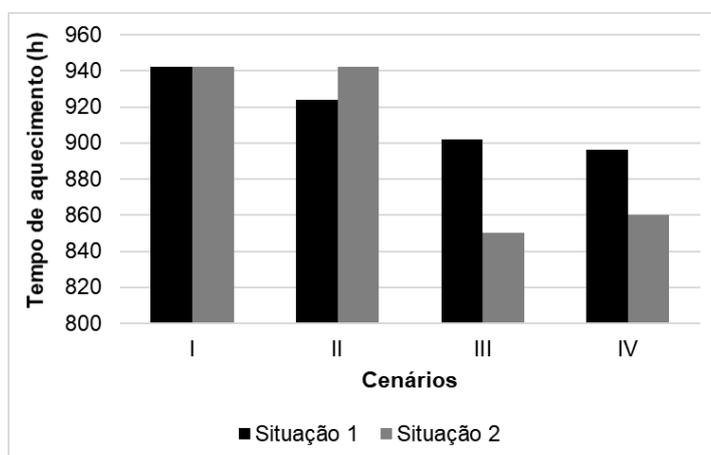


Figura 34: Comparação entre os tempos de aquecimento com GLP dos Cenários I, II, III e IV para as Situações 1 e 2

Ao comparar as duas Situações, foram observados comportamentos semelhantes das variáveis. As diferenças de um cenário para outro, porém, foram mais acentuadas na Situação 2, cujo enchimento atribuiu maiores quantidades de produto nas camadas superiores. Para os Cenários II, a Situação 2 obteve piores resultados do que a Situação 1, porém, a partir dos Cenários III apresentou menores tempos de secagem, consumos de eletricidade e tempos de aquecimento.

Diante dos resultados, a quantidade de produto a ser adicionada em cada parcela, além de depender do teor de água inicial do produto, deve ser dependente principalmente da velocidade da frente de secagem. Para este sistema, dentre os enchimentos em três parcelas, os que atingiram os melhores resultados foram da Situação 2. O melhor resultado foi o do Cenário III, que contava com o preenchimento com 20 % na parcela inferior, 20 % na parcela intermediária e 60 % na parcela superior, sendo responsável por uma redução de 9,69 % no tempo de secagem, 9,69 % no consumo de energia elétrica e 9,76 % no tempo de aquecimento, ao ser comparado ao Cenário I. Em seguida está o Cenário IV, com 20 % na parcela inferior, 30 % na parcela intermediária e 50 % na parcela superior, que resultou na redução de 8,93 % no tempo de secagem, 8,93 % no consumo de energia elétrica e 8,70 % no tempo de aquecimento.

A quantidade de água evaporada variou pouco entre os Cenários, tendo a variação máxima de 0,21 % entre os Cenários I e III da Situação 1, e de 0,18 % entre os Cenários I e III da Situação 2.

Assim como nas comparações de cenários da Etapa 1, foi observado um aumento do consumo de gás com o enchimento parcelado. Ao comparar as duas situações, as diferenças foram mais acentuadas na Situação 2, atingindo aumentos de 48,22 % entre os Cenários I e II, 14,43 % entre os Cenários I e III e 13,84 % entre os Cenários I e IV. Enquanto isso, entre os mesmos cenários da Situação 1 os aumentos ficaram em 1,46; 2,38 e 3,12 %.

Em relação ao consumo específico de gás, ou seja, em kcal.kg⁻¹ de água evaporada, as variações na Situação 2 também foram mais acentuadas, como pode ser observado no gráfico da Figura 35.

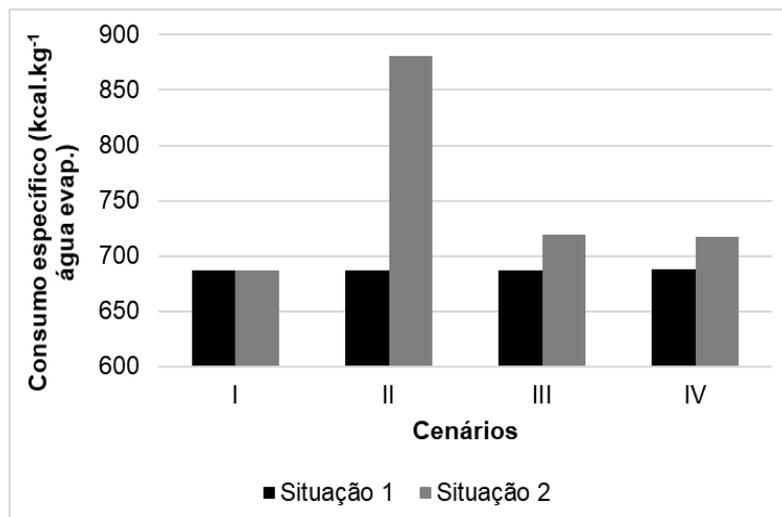


Figura 35: Comparação entre os consumos específicos de gás para os Cenários I, II, III e IV das Situações 1 e 2

A maior variação, evidenciada na Figura 35, ocorreu entre os Cenários I e II da Situação 2, cujo aumento do consumo específico de gás foi de 28,30 %, o que acompanha a grande variação também no consumo de GLP.

Finalmente, para definir a melhor estratégia operacional em relação aos custos, foram calculados os custos de cada operação baseados nos consumos de energia elétrica e GLP. Os resultados foram apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Comparação entre os custos da secagem nos Cenários I, II, III e IV com teor de água inicial de 18 %

Cenários	Energia elétrica		Gás GLP		Custo total
Cenário	Consumo (kWh)	Custo (R\$)	Consumo (kg)	Custo (R\$)	(R\$)
Etapa 1 (18 %)					
I	87307,06	35795,89	4266,45	18089,75	53885,64
II	84376,78	34594,48	4383,93	18587,86	53182,34
III	80560,68	33029,87	4477,97	18986,59	52016,47
IV	78047,39	31999,43	5045,84	21394,36	53393,79
Situação 1					
I	87307,06	35795,89	4266,45	18089,75	53885,64
II	85719,59	35145,03	4328,63	18353,39	53498,42
III	83867,44	34385,65	4367,96	18520,15	52905,80
IV	83338,28	34168,69	4399,37	18653,32	52822,02
Situação 2					
I	87307,06	35795,89	4266,45	18089,75	53885,64
II	87307,06	35795,89	6323,66	26812,32	62608,21
III	78840,87	32324,75	4882,06	20699,93	53024,69
IV	79502,54	32596,04	4857,09	20594,06	53190,10

Após a análise de custos foi possível verificar que, ao comparar os cenários com enchimento parcelado (II, III e IV) ao Cenário I, em uma única parcela, o enchimento parcelado resultou na diminuição dos custos totais do processo, exceto para o Cenário II da Situação 2. Os custos totais foram reduzidos, já que o aumento do consumo de GLP foi compensado pela diminuição da energia elétrica, como pode ser observado mais facilmente na Figura 36.

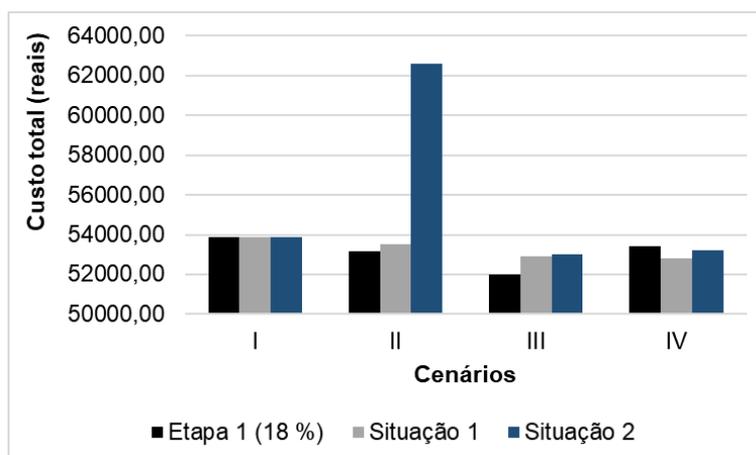


Figura 36: Comparação entre os custos totais dos cenários com teor de água de 18 %

Na situação 1, o menor custo foi obtido pelo Cenário IV, cujo enchimento foi realizado com 50 % na parcela inferior, 30 % na parcela intermediária e 20 % na parcela superior, o que resultou em uma redução de 1,97 % em relação ao Cenário I. Nos demais cenários a redução foi de 1,81 % para o Cenário III e 0,72 % para o Cenário II.

Na Situação 2, o melhor resultado ficou para o Cenário III, que contava com o preenchimento com 20 % na parcela inferior, 20 % na parcela intermediária e 60 % na parcela superior, com redução de 1,59 % nos custos. Já o Cenário IV, apresentou redução no custo total de 1,29 %. O Cenário II foi o único em que o enchimento parcelado apresentou maiores custos em relação ao Cenário I. Para este caso, o consumo de GLP foi 48,21 % maior do que no Cenário I e o consumo de energia elétrica se manteve o mesmo, com isso, o aumento no custo total foi de 16,18 %. O grande aumento no consumo do gás pode ser novamente explicado pelo não aproveitamento de todo o potencial térmico do GLP nas primeiras parcelas, já que esse cenário foi o que utilizou as menores porcentagens de grãos nas parcelas inferior (10 %) e intermediária (20 %).

Nos testes da Etapa 1 e dentre todos os cenários simulados para o teor de água de 18 %, o menor custo foi resultante do Cenário III. Neste cenário, a redução de custos em relação ao Cenário I foi de 3,46 %, seguido por 1,30 % no Cenário II e 0,91 % no Cenário IV. Portanto, ao considerar apenas os custos do processo, a melhor estratégia foi o enchimento parcelado em três parcelas de mesmo volume.

Entretanto, vale ressaltar que para este cenário a perda de matéria seca média entre as camadas foi de 0,53 %, um pouco superior ao limite estabelecido de 0,5 %.

Para o Cenário IV da Situação I, que apresentou o segundo menor custo, a perda de matéria seca foi ainda maior, com 0,56 %. A mesma PMS foi observada para o Cenário III da Situação I, que apresentou o terceiro menor custo total. Assim, seguindo este critério, o menor custo atrelado a uma perda de matéria seca dentro do limite aceitável, foi alcançado pelo Cenário III da Situação 2, com redução de 1,59 % nos custos, em relação ao Cenário I, e PMS de 0,5 %.

Diante destes resultados, para definir a estratégia de operação da secagem, os critérios a serem considerados devem ser definidos previamente. Ao considerar as perdas quantitativas, o enchimento parcelado em cinco parcelas representou a melhor opção (Cenário IV da Etapa I). Ao considerar apenas os custos, a melhor estratégia foi o enchimento parcelado em três parcelas de mesmo volume (Cenário III da Etapa I). Já considerando uma combinação dos dois critérios, a melhor opção foi o enchimento em três parcelas, com 20 % na parcela inferior, 20 % na parcela intermediária e 60 % na parcela superior (Cenário III da Situação 2).

6 CONCLUSÕES

O programa desenvolvido, fundamentado no Modelo de Thompson para secagem em baixas temperaturas, "*SecaBaixaTemperatura*", mostrou-se viável para simular a secagem a baixa temperatura do arroz com casca. Contudo, não apenas a precisão dos resultados foi considerada durante a implementação, também se objetivou a execução de um programa de fácil acesso e manipulação, que se tornou relativamente simples em concomitância ao bom desempenho.

Os dados experimentais coletados na empresa Realengo Alimentos Ltda. possibilitaram a validação do programa ao serem comparados com os resultados das simulações. Apesar de terem sido encontrados desvios de um silo para o outro, principalmente para o Silo 07, o modelo implementado descreveu com precisão satisfatória a secagem do arroz com casca em baixa temperatura.

Conforme os experimentos de comparação de cenários realizados, ficou evidenciado a aplicabilidade do programa desenvolvido para a avaliação de processos industriais reais, bem como o suporte à tomada de decisão quanto às estratégias para a redução das perdas qualitativas e quantitativas, e dos custos operacionais. Além disso, o programa ainda pode ser adaptado para a secagem de outros tipos de grãos ao serem inseridas equações que descrevam propriedades dos grãos como umidade e umidade relativa de equilíbrio e calor específico.

O enchimento parcelado mostrou-se estratégia fundamental na condução de secagem em baixas temperaturas do arroz, em razão da redução do tempo de secagem e do consumo de energia elétrica, além de garantir a preservação da qualidade.

Para o enchimento em parcelas com quantidades iguais, o cenário relativo a cinco parcelas (Cenários IV - Etapa 1) foi o que apresentou os melhores resultados para todos os teores de água iniciais avaliados.

Ao avaliar de forma conjunta os custos relativos aos consumos de energia elétrica e gás, e as perdas de matéria seca, a melhor estratégia de enchimento foi em três parcelas distribuídas quantitativamente na seguinte proporção percentual 20, 20 e 60 %, respectivamente (Cenário III - Situação 2).

Entretanto, mesmo utilizando o enchimento parcelado, teores de água iniciais acima de 18 % foram fatores limitantes ao processo, devido aos maiores índices de perda de matéria seca. Este comportamento reforça a importância da simulação

como ferramenta nos processos, para que situações assim sejam identificadas e resolvidas com antecedência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAE D271.2. *Psychrometric data in SI units*. **American Society of Agricultural Engineers**. St. Joseph, Michigan. p. 338-345, 1980.

ASAE D272.3. *Resistance to airflow of grains, seeds, other agricultural products, and perforated metal sheet*. **American Society of Agricultural Engineers**. St. Joseph, Michigan, p. 1-7, 1996 (R2011).

ASAE D245.5. *Moisture relationships of plant-based agricultural products*. **American Society of Agricultural Engineers**. St. Joseph, Michigan. p. 496-512, 1998.

ATUNGULU, G. G.; PAN, Z. *Rice industrial processing worldwide and impact on macro and micronutrient content, stability, and retention*. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1324, n. 1, p. 15-28, 2014.

AZMIR, J.; HOU, Q.; YU, A. *Discrete particle simulation of food grain drying in a fluidized bed*. **Powder Technology**, v. 323, n. 2018, p. 238-249, 2018.

BAKKER-ARKEMA, F. W.; BROOK, R. C.; LEREW, L. E. *Cereal grain drying*. In: POMERANZ, Y. (Ed.). **Advances in cereal science and technology**. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 1978, v. 2, p. 1-45.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 06, de 16 de fevereiro de 2009. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 fev. 2009, Seção 1, p. 3.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 02, de 06 de fevereiro de 2012. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 07 fev. 2012, Seção 1, p. 3.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Cereal grain drying**. Westport: AVI Book, 1974, v. 1, p. 398.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grain and oilseeds**. New York: AVI Book, 1992, v. 2, p. 350-457.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DANTAS, L.A.; BRAGA, M. E. D. Programa computacional para simulação de secagem de grãos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 1, n. 1, p. 33-50, 1999.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 1992. Relatório de Pesquisa, Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande-PB: 1992. p. 132.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: sétimo levantamento | abril 2018**. Brasília: CONAB, 2018. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_08_10_11_27_12_boletim_graos_abril_2018.pdf>. Acesso em: 10 de junho de 2018.

DANTAS, L. A. **Desenvolvimento de um programa computacional dinâmico para a simulação de secagem de grãos e sementes**. 2007. 71 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D.; MONKEN E SILVA, L. H. e KOLLING, E. *Fixed-bed drying simulation of agricultural products using a new backward finite difference scheme*. **Applied Mathematics and Computation**, v. 200, n. 02, p. 590-595, 2008.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D. Modelo de simulação de secagem de produtos agrícolas usando entalpia do ar constante. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 726-731, 2010.

DÍAZ MARTÍNEZ, J. A. **Modeling of grain dryers: thin layers to deep beds**. 2011. 88 f. Dissertação (M. Sc) - *Bioresource Engineering Department, McGill University*, Montreal, Canadá, 2011.

DORN, T. *Reduce drying time and energy cost by filling drying bins in layers*. **Institute of Agriculture and Natural Resources – CropWatch**, 2017. Disponível em: < <https://cropwatch.unl.edu/2017/fill-drying-bins-layers-reduce-drying-time-and-energy-cost>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2019.

DUTTA, H.; MAHANTA, C.L.; SINGH, V. *Changes in the properties of rice varieties with different amylose content on dry heat parboiling*. **Journal of cereal science**, v. 65, n. 5, p. 227-235, 2015.

ELGAMAL, R.; RONSSE, F.; ELMASRY, G. e PIETERS, J. G. *Development of a multi-scale model for deep-bed drying of rice*. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 3, p. 849-859, 2015.

ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M.; VANIER, N. L.; PARAGINSKI, R. T. e CASARIL, J. Manejo tecnológico na pós-colheita e inovações na conservação de grãos de arroz. In: ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M.; VANIER, N. L. **Qualidade de arroz da pós-colheita ao consumo**. Pelotas: Editora Universitária da UFPel, 2012, v. 1, p. 21-42.

FABIAN, C.; JU, Y. *A Review on rice bran protein: its properties and extraction methods*. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 51, n. 9, p. 816-827, 2011.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Embrapa Arroz e Feijão**. 2012. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/pesquisa/tecnolog>>. Acesso em: 11 de junho de 2018.

PESAGRO. EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Centros Estaduais de Pesquisa**. 2018. Disponível em: <http://www.pesagro.rj.gov.br/not09_mai17.html>. Acesso em: 7 de outubro de 2018.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Food outlook: biannual report on global food markets**. Roma, 2018. p. 133.

GOMES, A.S.; MAGALHÃES JUNIOR, A.M. Arroz irrigado no sul do Brasil. Brasília: **Embrapa Informação**, p. 143-147, 2004.

GUIMARÃES C. M.; STONE L. F.; CASTRO, E. M. Comportamento de cultivares de arroz de terras altas no sistema plantio direto em duas profundidades de adubação. **Bioscience Journal**, v. 22, p. 53-59, 2006.

GULARTE, M. R. Avaliação sensorial no controle de qualidade de arroz. In: ELIAS, M. C. F.; OLIVEIRA, M.; VANIER, N. L. **Qualidade de arroz da pós-colheita ao consumo**. Pelotas: Editora Universitária da UFPel, 2012, v. 1, p. 193-212.

GUNASEKARAN, S.; THOMPSON, T. L. *Optimal energy management in grain drying*. **CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 25, n. 1, p. 1-48, 1986.

HARCHEGANI, M. T.; MOHEB, A.; SADEGHI, M.; TOHIDI, M. e NAGHAVI, Z. *Experimental study of deep-bed drying kinetics of rough rice*. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 14, n. 4, p. 195-202, 2012.

HAWK, A. L.; NOYES, R. T.; WESTELAKEN, C. M.; FOSTER, G. M. e BAKKER-ARKEMA, F. W. *The present status of commercial grain drying*. In: **ASAE SUMMER MEETING**. Logan: American Society of Agricultural Engineering, 1978. pp. 78-3008.

HEINEMANN, R.; FAGUNDES, P.; PINTO, E.; PENTEADO, M. e LANFERMARQUEZ, U. *Comparative study of nutrient composition of commercial brown, parboiled and milled rice from Brazil*. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 18, n. 4, p. 287-296, 2005.

HEMIS, M.; SINGH, C. B.; JAYAS, D. S. e BETTAHAR, A. *Simulation of coupled heat and mass transfer in granular porous media: application to the drying of wheat*. **Drying Technology**, v. 29, n. 11, p. 1267-1272, 2011.

HILBERT, L.; NEVES, E. G.; PUGLIESE, F.; WHITNEY, B. S.; SHOCK, M.; VEASEY, E.; ZIMPEL, C. A. e IRIARTE, J. *Evidence for mid-Holocene rice domestication in the Americas*. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 11, p. 1693-1698, 2017.

HUKILL, W. V. *Drying of grain*. In: ANDERSON, J. A.; ALCOCK, A. W. **Storage of cereal grain and their products**. Saint Paul: American Society of Cereal Chemists, 1954, cap. 9, p. 402-435.

IGATHINATHANE, C.; CHATTOPADHYAY, P. K.; PORDESIMO, L. O. *Moisture diffusion modelling of parboiled paddy accelerated tempering process with extended application to multi-pass drying simulation*. **Journal of food engineering**, v. 88, n. 2, p. 239-253, 2008.

IRRI. INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Paddy drying**. Postharvest Unit, CESD, ver. 2, 2013. Disponível em: <<http://www.knowledgebank.irri.org/images/docs/training-manual-paddy-drying.pdf>>. Acesso em: 15 de julho de 2018.

JANAUN, J.; KAMIN, N. H.; WONG, K. H.; THAM, H. J.; KONG, V. V. e FARAJPOURLAR, M. *Design and simulation of heat exchangers using Aspen*

HYSYS, and Aspen exchanger design and rating for paddy drying application. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 36, n. 1, p. 1-7, 2016.

JOAQUIN, T. N. M. **Modelagem e simulação de um secador intermitente de fluxos contracorrentes para frutos do cafeeiro**. 2013. 106 f., Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2013.

JULIANO, B. O. **Rice in human nutrition**. Rome: FAO, 1993. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/t0567e/T0567E00.htm#Contents>>. Acesso em: 09 de junho de 2018.

JULIANO, B. O.; BECHTEL, D. B. *The rice grain and its gross composition*. In: JULIANO, B. O. **Rice: chemistry and technology**. Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists, 1985, cap. 2, p.17-57.

KALETA, A; GÓRNICKI K. *Criteria of determination of safe grain storage time - A review*. **Advances in Agrophysical Research**, cap. 12, p. 296-318, 2013.

KATSURAYAMA, A.; TANIWAKI, M. Fungos e aflatoxinas no arroz: ocorrência e significado na saúde do consumidor. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 20, e2017006, 2017.

KJER, J.; DEBBAB, A.; ALY, A. H. e PROKSCH, P. *Methods for isolation of marine-derived endophytic fungi and their bioactive secondary products*. **Nature Protocols**, London, v. 5, n. 3, p. 479-490, 2010.

KULLENBERG, D.; TAYLOR, L. A.; SCHNEIDER, M.; MASSING, U. *Health effects of dietary phospholipids*. **Lipids in Health and Disease**, v. 11, n. 3, 2012.

LAI, V. M. F.; LU, S.; HE, W. H. e CHEN, H. H. *Non-starch polysaccharide compositions of rice grains with respect to rice variety and degree of milling*. **Food Chemistry**, London, v. 101, n. 3, p. 1205-1210, 2006.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling & analysis**, 2ª Ed., McGraw Hill, Inc: New York, 1991.

LAWRENCE, J.; ATUNGULU, G.; SIEBENMORGEN, T. *Modeling in-bin rice drying using natural air and controlled air drying strategies*. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 4, p. 1103-1111, 2015.

LIU, L.; WATERS, D. L.; ROSE, T. J.; BAO, J. e KING, G. J. *Phospholipids in rice: significance in grain quality and health benefits: A review*. **Food Chemistry**, v. 139, n. 4, p. 1133-1145, 2013.

LOPES, D. C.; MARTINS, J. H.; STEIDLE NETO, A. J. e STEIDLE FILHO, A. J. Simulação da secagem de grãos com baixas temperaturas utilizando-se o modelo de Hukill: uma nova abordagem. **Exacta**, v. 3, n. 3, p. 85-93, 2005.

MANIKANTAN, M.; BARNWAL, P.; GOYAL, R. *Drying characteristics of paddy in an integrated dryer*. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 4, p. 813-819, 2014.

- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit operations of chemical engineering**, 6ª Ed., McGraw-Hill, 2001.
- MEAS, P.; PATERSON, A. H. J.; CLELAND, D. J.; BRONLUND, J. E.; MAWSON, J.; HARDACRE, A. e RICKMAN, J. F. *Relating rice grain quality to conditions during sun drying*. **International Journal of Food Engineering**, v. 9, n. 4, p. 385-393, 2013.
- MOREY, R. V.; KEENER, H. M.; THOMPSON, T. L.; WHITE, G. M. e BAKKER-ARKEMA, F. W. *The present status of grain drying simulation*. **American Society of Agricultural Engineers**, pp. 78-3009, 1978.
- NAGHAVI, Z.; MOHEB, A.; ZIAEI-RAD, S. *Numerical simulation of rough rice drying in a deep-bed dryer using non-equilibrium model*. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 2, p. 258-264, 2010.
- NAVARRO, S.; NOYES, R. **The mechanics and physics of modern grain aeration management**. 1ª Ed, Boca Raton, FL: CRC Press, 2002.
- NERY, V. L. H.; SOARES, R. T. R. N.; CHIQUIERI, J. Desempenho e características de carcaça de suínos em terminação alimentados com rações contendo subprodutos de arroz. **Zootecnia Tropical**, Maracay, v. 28, n. 1, p. 43-49, 2010.
- ONDIER, G. O.; SIEBENMORGEN, T. J.; MAUROMOUSTAKOS, A. *Low-temperature, low-relative humidity drying of rough rice*. **Journal of Food Engineering**, v. 100, n. 3, p. 545-550, 2010.
- PARK, C.; KIM, Y.; PARK, K. e KIM, B. *Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures*. **Journal of Stored Products Research**, v. 48, n. 1, p. 25-29, 2012.
- PUTRANTO, A.; CHEN, X. D.; XIAO, Z. e WEBLEY, P. A. *Mathematical modeling of intermittent and convective drying of rice and coffee using the reaction engineering approach (REA)*. **Journal of Food Engineering**, v. 105, n. 4, p. 638-646, 2011.
- RANJBARAN, M.; EMADI, B.; ZARE, D. *CFD Simulation of deep-bed paddy drying process and performance*. **Drying Technology**, v. 32, n. 8, p. 919-934, 2014.
- SAHIN, A.; DINCER, I. *Prediction of drying times for irregular shaped multi-dimensional moist solids*. **Journal of Food Engineering**, v. 71, n. 1, p. 119-126, 2005.
- SARKER, M.; IBRAHIM, M.; AZIZ, N. A. e PUNAN, M. *Application of simulation in determining suitable operating parameters for industrial scale fluidized bed dryer during drying of high impurity moist paddy*. **Journal of Stored Products Research**, v. 61, p. 76-84, 2015.
- SEIB, P. A.; PFOST, H. B.; SUKABDI, A.; RAO, V. G. e BURROUGHS, R. *Spoilage of rough rice measured by evolution of carbon dioxide*. In: **Proceedings of the 3rd annual workshop on Grains Post-harvest Technology**, Kuala Lumpur, p. 75-93, 1980.

- SHARON, M.; PRIYA, E.P.; SUBHASHINI, S. *Thin layer and deep bed drying basic theories and modelling: a review. Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, v. 18, n. 1, p. 314-325, 2016.
- SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. Secagem e secadores. In: SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008, cap. 5, p. 107-138.
- SILVA, J. S.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, F. F. Estudo da secagem em camada espessa. In: SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008, cap. 6, p. 139- 169.
- SILVA, L. C. **Desenvolvimento e avaliação de um secador de café (*Coffea arabica* L.) intermitente de fluxos contracorrentes**. 1991, 89f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- SILVA, L. C.; QUEIROZ; D. M.; FLORES, R. A. e MELO, E. C. *A simulation toolset for modeling grain storage facilities. Journal of Stored Products Research*, v. 48, p. 30-36, 2012.
- SILVA, L. C. **Stochastic simulation of the dynamic behavior of grain storage facilities**. 2002. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- SINGH, N.; KAUR, L.; SANDHU, K. S.; KAUR, J. e NISHINARI, K. *Relationships between physicochemical morphological, thermal, rheological properties of rice starches. Food Hydrocolloids*, v. 20, n. 4, p. 532-542, 2006.
- SWEENEY, M.; MCCOUCH, S. *The complex history of the domestication of rice. Annals of Botany*, v. 100, n. 5, p. 951-957, 2007.
- THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. *Mathematical simulation of corn drying - a new model. Transactions of the ASAE*, v. 11, n. 4, p. 582-586, 1968.
- THOMPSON, T. L. **Predicted performance and optimal design of convection grain dryers**. 1967. 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - *Purdue University, Agricultural Engineering Department, West Lafayette*, 1967.
- THOMPSON, T. L. *Temporary storage of high-moisture shelled corn using continuous aeration. Transactions of the ASAE*. St. Joseph, Michigan. v. 15, n. 2, p. 333-337, 1972.
- VALENTE, D. S. M., QUEIROZ, D. M. D., SILVA, L. C.; OLIVEIRA, G. H. H. D. e SANTOS, F. L. *LINSEC: the software for modeling and simulation of grain drying systems. Revista Ciência Agrônômica*, v. 43, n. 4, p. 664-673, 2012.
- VALENTE, D. S. M.; SOUZA, C. M. A.; QUEIROZ, D. M. Simulação de secagem de milho e arroz em baixas temperaturas. **Centreinar**. 2015. Disponível em: <<http://www.centreinar.org.br/software/secbt.pdf>>. Acesso em: 12 de janeiro de 2019.

VAN EE, G. R.; KLINE, G. L. *Faldry - a model for low-temperature corn drying systems*. In: **ASAE WINTER MEETING**. Ames: American Society of Agricultural Engineering, 1979, p. 79-3524.

WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. Arroz: composição e características nutricionais. **Santa Maria: Ciência Rural**, v. 38, n. 4, p. 1184 -1192, 2008.

WANKHADE, P.; SAPKAL, R.; SAPKAL, V. *Drying characteristics of okra slices on drying in hot air dryer*. **Procedia Engineering**, v. 51, p. 371-374, 2013.

WEBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Canoas: Ed. Salles, 2005.

YADAV, B. K.; JINDAL, V. K. *Changes in head rice yield and whiteness during milling of rough rice (*Oryza sativa* L.)*. **Journal of Food Engineering**, v. 86, n. 1, p. 113-121, 2008.

ZARE, D.; JAYAS, D.; SINGH, C. *A generalized dimensionless model for deep bed drying of paddy*. **Drying Technology**, v. 30, n. 1, p. 44-51, 2012.

ZARE, D.; G. CHEN. *Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying*. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, n. 1, p. 78-87, 2009.