

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



Dissertação

**Otimização da Secagem Intermitente de Arroz em Função dos Parâmetros
Operacionais e da Qualidade dos Grãos**

Liandro Leite Rodrigues

Pelotas, 2019

Liandro Leite Rodrigues

Otimização da Secagem Intermitente de Arroz em Função dos Parâmetros Operacionais e da Qualidade dos Grãos

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

Orientador: Prof. Dr. Moacir Cardoso Elias

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Scherer Pohndorf

Pelotas, 2019

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

R696o Rodrigues, Liandro Leite

Otimização da Secagem Intermitente de Arroz em Função dos Parâmetros Operacionais e da Qualidade dos Grãos / Liandro Leite Rodrigues ; Moacir Cardoso Elias, orientador ; Ricardo Scherer Pohndorf, coorientador. — Pelotas, 2019.

60 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Rendimento de inteiros. 2. Secagem de grãos - Temperatura. 3. Relação de intermitência. 4. Secagem de grãos - Otimização. I. Elias, Moacir Cardoso, orient. II. Pohndorf, Ricardo Scherer, coorient. III. Título.

CDD : 633.18

**Dedico este trabalho aos meus
pais, irmão, esposa e filho.**

Agradecimentos

Em especial ao professor Dr. Moacir Cardoso Elias, pelas orientações (“*se sentiu orientado? O importante é se sentir orientado*”), pelo incentivo, pela compreensão e carinho em todos os momentos de minha graduação e do mestrado.

Também em especial ao amigo e colega de longa data, que hoje é professor universitário, Dr. Ricardo Scherer Pohndorf quem com muita dedicação se envolveu e colaborou muito com esse trabalho, pelos conhecimentos compartilhados e pela sua enorme capacidade em ensinar (você lutou correu atrás e merece muito meu amigo).

Ao professor Dr. Nathan Levien Vanier por sua enorme dedicação em tudo que faz, pelos conhecimentos compartilhados em aula e suas orientações que tornam as coisas mais fáceis.

A todos os colegas e estagiários do Laboratório de Pós-Colheita, Industrialização e Qualidade de Grãos, pelos auxílios prestados e convivência agradável ao longo do curso.

Aos demais professores do curso, pelo conhecimento transmitido com muita serenidade e profissionalismo.

Ao Engenheiro Agrônomo Clovis Alberto Bauer, da empresa KROLOW E CIA. LTDA., pelo fornecimento das amostras de arroz para realização do estudo.

À ASCAR/EMATER/RS pelas oportunidades que me foram dadas.

À Tatiana Finato, esposa, pelo carinho, compreensão e pelas palavras de incentivo em todos os momentos. Ao nosso amado filho Antônio Pedro Finato Rodrigues, que foi concebido no decurso dos estudos do curso, e quem com tão pouca idade me fortaleceu muito para enfrentar as dificuldades encontradas.

Aos meus pais, pela paciência, pela fraternidade e pelo carinho em todas as etapas da vida. Em especial à minha mãe, mulher guerreira, que lutou muito na sua vida para oportunizar que seus filhos pudessem estudar, porque como ela sempre diz, o conhecimento ninguém tira de nós.

Resumo

RODRIGUES, Liandro. **Otimização da Secagem Intermitente de Arroz em Função dos Parâmetros Operacionais e da Qualidade dos Grãos**. 2019. 60f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Curso de Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

Objetivou-se neste estudo estabelecer condições que possibilitem otimizar o processo de secagem intermitente dos grãos de arroz em casca, classe longo, em função da qualidade dos grãos e de aspectos industriais, utilizando metodologia de superfície de resposta, onde foram avaliados os efeitos dos experimentos de secagem no rendimento de inteiros, no grau de brancura, na renda do benefício, na cor (L , a , b), na temperatura máxima da massa de grãos ($^{\circ}\text{C}$) e no tempo de secagem (min). As variáveis independentes estudadas com a finalidade de otimizar o processo de secagem foram temperatura do ar (35, 40, 47,5, 55 e 60 $^{\circ}\text{C}$), tempo de exposição ao ar aquecido (5, 7, 10, 13 e 15 min) e relação de intermitência (1:0,0 - 1:1,0 - 1:4,0 - 1:2,5 - 1:5,0). Também foram propostos modelos cinéticos de secagem em função dos dados experimentais, a fim de verificar o modelo que melhor se ajuste. A verificação do ajuste do modelo matemático aos dados experimentais foi realizada comparando o coeficiente de determinação R^2 (ajustado), o erro médio relativo (EMR), pela análise dos resíduos e os gráficos de correspondência entre os valores estimados e os observados. Os resultados indicam que nas temperaturas mais baixas (42 $^{\circ}\text{C}$ ou menos na massa de grãos) o percentual de grãos inteiros é superior a 60% e na medida em que a temperatura do ar aumenta o percentual de grãos inteiros diminui. O efeito da temperatura foi o mais pronunciado para todas as respostas avaliadas. A condição otimizada para correlacionar os aspectos industriais da secagem intermitente com a qualidade dos grãos foi: temperatura do ar de 47,5 $^{\circ}\text{C}$; tempo de exposição de 10 min e relação de intermitência de 1:2,5, que resultou em um rendimento de inteiros superior a 60%, tempo de secagem de 325 minutos e a temperatura máxima da massa de grãos de 44 $^{\circ}\text{C}$. A análise de efeitos, evidenciada pelo gráfico de Pareto, mostra que o efeito linear da temperatura do ar é o mais significativo para o rendimento de inteiros. O modelo cinético de Midilli apresenta melhor ajuste aos dados experimentais para descrever a secagem de arroz em casca, enquanto o modelo de Page apresenta um ajuste adequado com um menor número de parâmetros.

Palavras-chave: rendimento de inteiros; temperatura; relação de intermitência; otimização da secagem de grãos.

Abstract

RODRIGUES, Liandro. **Optimization of Intermittent Rice Drying as a Function of Operating Parameters and Grain Quality**. 2019. 60f. Dissertation (Master Degree in Food Science and Technology) – Curso de Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

In this study, our aim was to establish great conditions to the intermittent drying system of rice with peel, long class, because of the grain quality and industrial aspects, using response surface methodology, where we evaluated the drying effects in the whole grain yield, whiteness degree, income of the benefit, color (L, a, b), grain mass maximum temperature (C°) and drying time (min.). The independent variables studied, to optimize the drying process, were the air temperature (35, 40, 47.5, 55, and 60 c°), the hot air exposure time (5,7,10, 13, and 15 min.) and the intermittent ratio (1:0,0 – 1:1,0 – 1:4,0 – 1:2,5 – 1:5,0). Drying kinetic models were adjusted due to experimental data to check what model presented the best adjustment. The verification of the adjustment of the math model to the experimental data was carried out comparing the coefficient of determination R² (adjusted), the relative average error (RAE), the analysis of the residue and the correspondence graphics between the estimated values and the ones observed. The results indicated that, in lower temperatures, (42C° or less in the mass of the grains) the percentage of whole grains was over 60% and, as the temperature of the air increased, the percentage of whole grains decreased. The effect of the temperature was the most pronounced for all the evaluated answers. The optimized condition to correlate the industrial aspects of the intermittent drying to the quality of the grains was: air temperature 47.5 C°, 10-minute exposure time and intermittent ratio of 1:2,5, which resulted in whole grain yield over 60%, drying time around 325 minutes and the maximum temperature of the mass of the grain of 44 C°. The analysis of the effects, shown by Pareto graphic, indicated that the linear effect of the temperature of the air was the most significant for the whole grain yield. Midilli kinetic model was the one that presented the best adjustment to the experimental data to describe the drying of rice with peel. However, Page model presented a suitable adjustment with a lower number of parameters.

Keywords: yield of integers; temperature; intermittent ratio; drying grains optimization.

Lista de Figuras

Figura 1	Mapa da produção agrícola de arroz no Brasil.	15
Figura 2	Diagramas de Pareto para os efeitos das condições de processo sobre: (A) rendimento de inteiros; (B) Renda de benefício; (C) Grau de brancura; (D) Luminosidade 'L'; (E) Cromaticidade 'a'; (F) Cromaticidade 'b'; (G) Tempo de secagem e (H) Temperatura máxima da massa dos grãos.	34
Figura 3	Superfície de resposta do rendimento de inteiros em função da temperatura do ar e da relação de intermitência.	40
Figura 4	Superfície de resposta da renda de benefício em função da temperatura do ar e da relação de intermitência.	41
Figura 5	Superfície de resposta do tempo de secagem em função da temperatura do ar e da relação de intermitência.	42
Figura 6	Temperatura máxima da massa de grãos em função das seguintes variáveis operacionais de secagem: (A) tempo de exposição ao ar aquecido e temperatura do ar; (B) relação de intermitência e tempo de exposição ao ar aquecido e (C) relação de intermitência e temperatura do ar.	43
Figura 7	Rendimento de inteiros de arroz em função do tempo de secagem e da temperatura máxima da massa de grãos.	44
Figura 8	Gráfico da umidade da massa de grãos em relação ao tempo para as diferentes condições operacionais de secagem.	45
Figura 9	Taxa de secagem em relação a umidade da massa de grãos para diferentes condições operacionais de secagem.	46
Figura 10	Valores reais e estimados da razão de umidade pela estimativa dos parâmetros dos modelos de Midilli e Page dos experimentos 14 e 15 em relação ao tempo.	50

Lista de Tabelas

Tabela 1	Valores reais e codificados das variáveis independentes para o delineamento composto central rotacional – DCCR27
Tabela 2	Delineamento experimental27
Tabela 3	Modelos matemáticos utilizados para prever o processo de secagem29
Tabela 4	Propriedades físicas dos grãos de arroz, com umidade de colheita de 21%, base úmida.....31
Tabela 5	Resultados da matriz do delineamento experimental (DCCR).....32
Tabela 6	Resultados da análise de variância dos parâmetros de qualidade do arroz e dos aspectos industriais.....37
Tabela 7	Análise estatística dos modelos matemáticos de secagem47
Tabela 8	Propriedades físicas dos grãos de arroz, com umidade de 13%, base úmida60

Sumário

1	Introdução	10
1.1	Objetivo geral	11
1.2	Objetivos específicos	11
2	Revisão da literatura.....	12
2.1	Características físico-químicas do arroz	12
2.2	Produção e consumo de arroz.....	13
2.3	Secagem de arroz.....	16
2.3.1	Secagem contínua	17
2.3.2	Secagem intermitente.....	18
2.4	Efeitos da secagem na qualidade dos grãos de arroz.....	19
3	Material e métodos	20
3.1	Material.....	20
3.2	Experimentos de secagem	20
3.3	Caracterização dos grãos de arroz.....	21
3.3.1	Comprimento (C), largura (L) e espessura (E).....	21
3.3.2	Diâmetro equivalente (D).....	22
3.3.3	Esfericidade (ϕ).....	22
3.3.4	Área Superficial (A).....	22
3.3.5	Volume (V)	23
3.3.6	Peso de 1000 grãos	23
3.3.7	Peso volumétrico (ρ_a)	23

3.3.8	Massa específica unitária (ρ_u)	24
3.3.9	Porosidade (ϵ)	24
3.3.10	Ângulo de talude (θ)	24
3.3.11	Renda de benefício e rendimento de inteiros	25
3.3.12	Grau de umidade	25
3.3.13	Cor	25
3.4	Delineamento experimental	26
3.5	Determinação da razão de umidade	27
3.6	Modelos cinéticos de secagem	28
4	Resultados e discussão	31
4.1	Propriedades físicas dos grãos de arroz	31
4.2	Resultados da matriz do delineamento experimental	32
4.3	Efeitos dos parâmetros operacionais de secagem	33
4.4	Resultados da análise de variância dos parâmetros de qualidade do arroz e dos aspectos industriais	36
4.5	Avaliação cinética da secagem de arroz	45
5	Conclusões	51
6	Referências	52
	Apêndices	59
	Apêndice A – Tabela com as propriedades físicas dos grãos de arroz	60

1 Introdução

O arroz é um produto agrícola com grande importância econômica, social e política em todo o mundo, sendo o principal constituinte na dieta de mais de dois terços da população mundial.

O arroz (*Oryza sativa L.*) é geralmente colhido com grau de umidade acima de 22,0% (base úmida) e precisa ser secado rapidamente para um grau de umidade seguro, menos de 14,0% de umidade, para evitar a deterioração dos grãos durante o armazenamento e a diminuição do rendimento de inteiros.

A operação de secagem na pós-colheita do arroz demanda uma alta quantidade de energia e pode afetar significativamente a qualidade dos grãos. Durante a secagem ocorre o desenvolvimento de tensões térmicas e hidrostáticas, além de alterações químicas e bioquímicas indesejadas. O uso adequado da temperatura de secagem para não danificar os grãos conduz a uma maior capacidade do secador e reduz o consumo de energia. Usualmente, para manter a qualidade dos grãos, o padrão industrial impõe temperaturas de secagem limitadas e que podem variar de acordo com o grão e o método de secagem. Para o arroz, a temperatura da massa de grãos deve ser limitada e as características do ar de secagem, especialmente a temperatura, devem ser controladas. Reduções no valor nutricional ocorrem quando a temperatura da massa de grãos atinge de 90 a 100 °C, porém em temperaturas muito inferiores a estas já ocorrem alterações estruturais que promovem as fissuras nos grãos.

A secagem por ar aquecido é a forma mais usual para secar grãos de arroz. Os secadores comerciais utilizam diferentes desenhos, variando a temperatura e o tempo de exposição do grão ao ar aquecido. Entretanto, a maior dificuldade é gerar o mínimo gradiente de umidade entre o centro e a superfície do grão, devido à formação de fissuras, e ainda assim alcançar uma alta taxa de secagem. Independentemente do método ou do secador utilizado, a uniformidade do teor de umidade dos grãos durante a secagem é um fator importante para diminuir a ocorrência de fissuras no arroz.

O sistema intermitente de secagem é bastante usual para o arroz. Neste sistema, são estabelecidos períodos de exposição ao ar aquecido e períodos de têmpera ou repouso, os quais permitem que ocorra uma diminuição no gradiente de tensões e conseqüentemente no número de fissuras. Os principais parâmetros operacionais de controle dos secadores são a temperatura do ar de secagem, a vazão do ar de secagem, o tempo de exposição ao ar aquecido e a relação de intermitência. A otimização destes fatores, para a variedade de arroz a ser secada, permite alcançar o máximo rendimento de inteiros, uma vez que cada variedade de arroz tem as suas características e o comportamento da secagem pode variar.

1.1 Objetivo geral

Estabelecer condições que possibilitem otimizar o processo de secagem intermitente de arroz, em casca, visando a alta qualidade industrial dos grãos.

1.2 Objetivos específicos

- Otimizar o processo de secagem intermitente de arroz em casca utilizando metodologia de superfície de resposta;
- Obter modelos matemáticos para prever a qualidade industrial dos grãos em função das variáveis de processo;
- Avaliar efeitos da secagem nos aspectos industriais e na qualidade dos grãos de arroz;
- Ajustar modelos cinéticos de secagem em função dos dados experimentais;
- Realizar a caracterização física dos grãos de arroz nas condições ótimas de processo.

2 Revisão da literatura

2.1 Características físico-químicas do arroz

O grão de arroz consiste da cariopse e de uma camada protetora, a casca. A casca é composta de duas folhas modificadas, a pálea e a lema e corresponde a cerca de 20% do peso do grão. Já a cariopse é formada por diferentes camadas, sendo as mais externas o pericarpo, o tegumento e a camada de aleurona, que representam 5-8% da massa do arroz integral. A camada de aleurona apresenta duas estruturas de armazenamento proeminentes, os grãos de aleurona (corpos protéicos) e os corpos lipídicos. O embrião ou gérmen está localizado no lado ventral na base do grão, é rico em proteínas e lipídios. O endosperma consiste de células ricas em grânulos de amido e com alguns corpos protéicos (JULIANO; BECHTEL, 1985).

O termo cariopse refere-se ao fruto do arroz, que quando maduro apresenta uma estrutura externa, fina e seca, chamada de pericarpo e apresenta, também, uma estrutura volumosa chamada de endosperma que possui uma camada externa de células de aleurona e um embrião. A distribuição de massa da cariopse abrange o pericarpo que perfaz de 2 a 3%, a aleurona mais tegumento e nucela contribuem com 4-6% do grão, embrião de 2 a 3% e a maior porção pertence ao endosperma, que corresponde a 90% da cariopse de arroz, em massa seca (ZHOU et al., 2002).

O farelo de arroz é a porção do grão que inclui o pericarpo, a camada de aleurona e o embrião, representando cerca de 10% da cariopse. Os lipídeos, as vitaminas, os minerais e as fibras estão, principalmente, concentrados no farelo de arroz. É do farelo de arroz que é extraído o óleo, que contém uma considerável quantidade de ácidos graxos essenciais, formados principalmente por ácidos graxos insaturados (ABDUL-HAMID et al., 2007). Para atender a demanda dos consumidores por um produto branco e translúcido, o percentual de remoção de farelo nas indústrias de beneficiamento de arroz varia entre 8,0 e 14,0% (GULARTE,

2002; MONKS et al., 2013). Os percentuais de remoção de farelo (grau de polimento) afetam a coloração e o valor nutricional dos grãos, ou seja, com o polimento do grão de arroz integral ocorre uma grande redução nos conteúdos de lipídeos, minerais, fibras, havendo também certa redução no conteúdo de proteínas e, assim, aumentando a proporção de amido no grão (MONKS et al., 2013). O teor protéico do arroz (grão cru), em média de 7,5% (base úmida), pode oscilar entre 5% e 13% pelas diferenças varietais (KENNEDY; BURLINGAME, 2003).

O endosperma representa em torno de 90% da cariopse do grão (base seca) e é formado, principalmente, por carboidratos, na forma principalmente de amido, e por proteínas. No arroz polido, aproximadamente 90% de sua matéria seca é composta por amido (BAO et al., 2004). A proteína presente no grão de arroz está fortemente associada aos grânulos de amido o que dificulta a extração do mesmo (CARDOSO; SAMIOS; SILVEIRA, 2006).

A casca dos grãos de arroz é constituída pela pálea e a lema, e é responsável por proteger os grãos contra fungos e insetos e também pela regulação do equilíbrio hídrico durante o desenvolvimento do grão (KRISHNAN; DAYANANDAN, 2003). A casca compreende de 16 a 28% da massa do grão de arroz (base seca) e os principais constituintes são a celulose, a hemicelulose e a lignina, com alto teor de cinzas, formada principalmente por sílica (CHAVES et al., 2009).

2.2 Produção e consumo de arroz

O arroz é considerado pela FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura) como o alimento mais importante para a segurança alimentar do mundo. Além de fornecer um excelente balanceamento nutricional é uma cultura extremamente rústica, o que faz ela também ser considerada a espécie de maior potencial de aumento na produção para combate a fome no mundo (GOMES et al., 2004).

Segundo a Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado - SOSBAI (2018), o consumo aparente médio mundial de arroz beneficiado é de 54 kg/pessoa/ano, sendo que os países asiáticos, onde são produzidos mais de 90,0% desse cereal, apresentam as médias mais elevadas com consumo de 78 kg/pessoa/ano, já na

América do Sul, são consumidos, em média, 29 kg/pessoa/ano, destacando-se o Brasil como grande consumidor, com média de 32 kg/pessoa/ ano.

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2019), o cultivo de arroz ocorre em todo o Brasil, mas tem maior concentração na Região Sul do país, que é responsável por quase 80,0% da produção nacional, mas tem perdido área ao longo dos anos, nas últimas dez safras, a área cultivada reduziu aproximadamente 39,0%, sobretudo em áreas de sequeiro, uma vez que o produtor tem optado por culturas mais rentáveis. De acordo com as estimativas da CONAB, a área brasileira de arroz, na safra 2018/19, deverá ser 10,8% menor que a área cultivada na safra anterior, com estimativa de área destinada à rizicultura de 1.759 mil hectares, sendo que desse total, cerca de 77% corresponde ao cultivo irrigado de arroz e os outros 23% estão relacionados ao sistema de produção em condição de sequeiro. Apesar da produção não ter sofrido grandes variações nesse período, o rizicultor nacional tem mantido a produção ajustada ao consumo, incrementando a produtividade com a utilização de um melhor pacote tecnológico, pois de acordo com dados também da CONAB o salto de produtividade entre a safra 2000/01 e 2017/18 foi de 91%, ou seja, de 3197 para 6118 kg/ha. Na Figura 1 é apresentado um mapa da produção agrícola de arroz no Brasil.

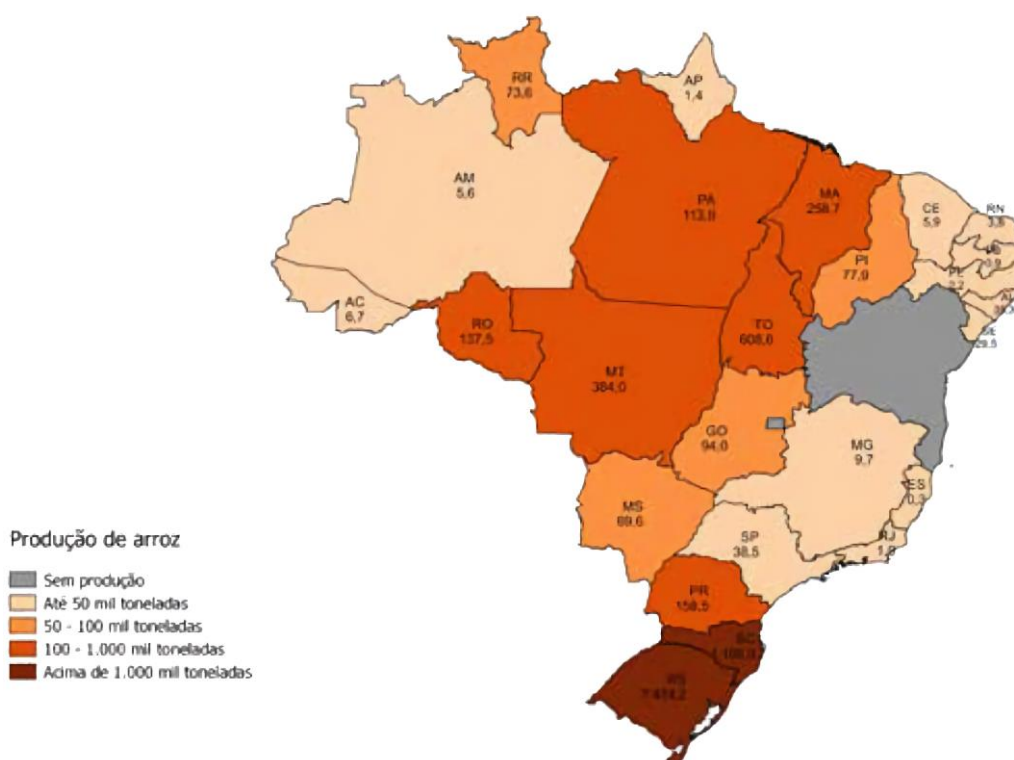


Figura 1 – Mapa da produção agrícola de arroz no Brasil.
Fonte: CONAB, 2019.

Conforme a SOSBAI (2018), o estado do Rio Grande do Sul se destaca como o maior produtor nacional, sendo responsável por em torno de 70,0% do total produzido no Brasil, seguido por Santa Catarina com produção de 8,5 % e 9,8%, nas safras 2014/15 e 2015/16, respectivamente. Esse grande volume produzido nos dois estados sulinos, totalizam cerca de 80% da oferta nacional, sendo assim considerado o estabilizador do mercado brasileiro e garante o suprimento desse cereal à população brasileira.

No Rio Grande do Sul, as condições meteorológicas de janeiro de 2019 foram contrastantes e atípicas no estado, após um início de ciclo da cultura muito bom em praticamente todo estado, os primeiros dez dias de janeiro foram de intensas precipitações, que causaram alagamentos e destruição de lavouras, com previsão de redução da produção, até o momento, de 11,7% em relação à safra anterior, podendo ainda ultrapassar essa marca nos próximos levantamentos (CONAB, 2019).

O arroz beneficiado polido representa cerca de 70,0% do total consumido no Brasil, devido as suas características suaves e agradáveis ao consumo, no entanto, do ponto de vista nutricional, o arroz beneficiado polido é constituído

predominantemente de amido, com baixa concentração de proteínas, minerais e vitaminas, os quais estão presentes na camada de aleurona, que é removida na etapa de polimento (LAMBERTS et al., 2007; ELIAS et al., 2012).

2.3 Secagem de arroz

A secagem de produtos é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade de alguns materiais agrícolas, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (RESENDE et al., 2008b).

A operação de secagem é uma etapa complexa no beneficiamento do arroz e envolve inúmeras variáveis que deverão ser ajustadas ao longo da operação e outras predefinidas na regulagem inicial do secador e de acordo com a experiência da indústria ou de recomendações da tecnologia, como a temperatura de transição vítrea e a temperatura da massa de grãos (AMATO; CARVALHO; SILVEIRA, 2002).

A secagem artificial é a mais utilizada, sendo caracterizada pela passagem forçada do ar pela massa de grãos, onde proporciona que sejam secadas grandes quantidades de grãos em um período de tempo reduzido quando comparados com a secagem natural, independente das condições psicrométricas do ar. Os processos mais utilizados na secagem de grãos são: (1) o estacionário, onde se utilizam temperaturas em torno dos 40°C para o ar, que pode ser por fluxo de ar axial ou radial e os grãos ficam estáticos; (2) o processo denominado convencional, que utiliza temperaturas mais elevadas, em torno de 60 a 80°C, de modo geral, que pode ser por fluxo contínuo ou intermitente dos grãos; (3) o processo misto, também conhecido como seca-aeração, sendo mais utilizado o intermitente para secagem de arroz em médias e grandes propriedades (AOSANI, 2007; ELIAS et al., 2012).

Pode-se conceber a secagem como um processo de transferência simultânea de calor e de massa. O ar, ao mesmo tempo em que fornece calor ao sistema, absorve água do produto em forma de vapor. O gasto de energia provocado pela evaporação da água é acompanhado por um resfriamento do ar.

Contudo, o ar absorve em forma de vapor o que perdeu sob a forma de calor, caracterizando um processo isoentálpico. Os grãos são produtos higroscópicos e,

como tais, sofrem variações no seu conteúdo de água, de acordo com as condições do ar que os rodeia (ELIAS, 2007).

O fenômeno de redução do teor de água dos grãos envolve simultaneamente a transferência de calor e de massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água por meio de evaporação, geralmente causada por circulação forçada de ar aquecido, podendo alterar de forma substancial sua qualidade, dependendo do método e das condições empregadas (BOEMEKE, 2000; MILMAN, 2001; ELIAS, 2002).

2.3.1 Secagem contínua

O sistema de secagem contínua é desenvolvido em secadores nos quais uma coluna de grãos úmidos são carregados no topo, caindo por gravidade até a base no tempo suficiente para atingirem a umidade desejada, saindo secos e resfriados. Os secadores são constituídos de no mínimo duas câmaras alternadas, uma de aquecimento ou secagem e uma de resfriamento ou arrefecimento. Alguns modelos são dotados de uma câmara intermediária entre essas. Os grãos ingressam úmidos, são aquecidos e secam na primeira câmara onde é insuflado ar quente. Passam imediatamente à segunda câmara onde são atravessados pelo ar em temperatura ambiente e são resfriados, este processo se dá de forma ininterrupta (USTRA, 2005).

A secagem contínua não é recomendada para arroz em casca devido à sensibilidade deste grão aos gradientes térmicos, porém admite-se o seu uso desde que sejam feitas alterações, tais como o aumento do número de passagens e da velocidade de fluxo da massa de grãos através da câmara de secagem (AGUIRRE; PESKE, 1992).

2.3.2 Secagem intermitente

O processo de secagem intermitente é caracterizado pela passagem descontínua do ar aquecido pela massa de grãos em movimento, promovida pela recirculação do grão no secador. Com isto, a difusão da água do interior para a periferia do grão e a evaporação da água superficial se dão de uma maneira mais branda e equilibrada (ELIAS, 2007).

Os secadores intermitentes são constituídos de uma coluna de grãos em movimento atravessada por um fluxo de ar quente em um espaço denominado câmara de secagem, onde ocorrem as trocas de massa e energia. Por gravidade, o arroz cai até a base da coluna onde é coletado e elevado mecanicamente para o topo do secador, passando para outra câmara denominada câmara de equalização. O volume da câmara de equalização determina o tempo de repouso (ou de equalização) que os grãos levam até serem liberados para a câmara de secagem novamente. O ciclo consiste em um período de secagem e um período de equalização que é repetido até a massa de grãos atingir a umidade desejada, geralmente na faixa de 12,0 a 14,0% (bulbo úmido). A relação de intermitência é a relação entre os tempos de secagem e de equalização e o período total de secagem é o somatório dos dois ciclos (USTRA, 2005).

Normalmente, a temperatura do ar de secagem não ultrapassa 115 °C, nem é inferior a 70 °C. Este é um sistema que permite obter bons resultados, embora exija maiores investimentos e uso de tecnologia mais sofisticada quando comparado a outros métodos. Pelas características técnicas, operacionais e econômicas, o sistema intermitente é o mais recomendável para a secagem do arroz, devendo ser evitada a remoção brusca de água, que deve ser harmônica durante todo o processo, com temperatura do ar de secagem de no máximo 110 °C, para controlar os danos térmicos e mecânicos (BARBOSA et. al., 2005; SOSBAI, 2018).

2.4 Efeitos da secagem na qualidade dos grãos de arroz

Após a colheita, preservar a integridade física, química e biológica dos grãos torna-se uma necessidade imediata, e a técnica mais empregada para isso é a secagem. A secagem é, de fato, a fase mais crítica em relação à manutenção dos parâmetros de qualidade devido à grande influência que o teor de água e a atividade de água no grão têm sobre o metabolismo e o desenvolvimento de microrganismos no armazenamento (GENKAWA et al., 2008).

Problemas encontrados no processo de secagem de arroz com casca são similares aos de outros cereais, porém o arroz exige operação mais controlada, em razão da sua suscetibilidade a altas temperaturas de secagem e aos choques térmicos, devendo os mesmos ser controlados dentro de certos limites para evitar possíveis danos físico-químicos e biológicos às cariopses (ELIAS, 2002).

Conhecer os efeitos da intensidade das operações de beneficiamento do arroz em sua qualidade é importante para inserção do arroz no mercado nas suas diferentes formas de aceitação e padrões exigidos (ZHOU et al., 2002).

Informações a respeito das características físicas dos produtos agrícolas são atributos utilizados para determinar as condições de secagem e armazenagem, possibilitando a predição de perdas de qualidade do material até o momento de sua comercialização (RESENDE et al., 2008a).

3 Material e métodos

3.1 Material

Os grãos de arroz, classe longo, foram produzidos em sistema irrigado, no município de Santa Vitória do Palmar, no sul do Brasil, na safra 2017/2018 e colhidos com umidade próxima a 21% (base úmida), através de colheita mecanizada. Após a colheita, no laboratório, os grãos foram limpos em máquina de ar e peneiras (Intecnia, modelo Sintel, Brasil) para a eliminação de impurezas e matérias estranhas. Logo após a limpeza, as amostras com grãos úmidos e limpos foram colocadas em sacos de tecido e logo em seguida foram realizados os experimentos de secagem.

Os experimentos foram executados nas instalações do Laboratório de Pós Colheita, Industrialização e Qualidade de Grãos (LABGRÃOS) do Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas - UFPEL.

3.2 Experimentos de secagem

O arroz em casca limpo foi submetido à secagem em dezesseis experimentos diferentes. No processo de secagem dos grãos utilizou-se um secador de leito fixo, em escala piloto, composto por um ventilador centrífugo, dutos, um conjunto de resistências elétricas para realizar o aquecimento do ar, interligado a um sistema automático de controle de temperatura com precisão de ± 0.1 °C. O sistema de ventilação do secador foi regulado para proporcionar uma velocidade do ar no leito de grãos de $0,2 \pm 0,1$ m.s⁻¹ (SHEI; CHEN, 1998). Colocou-se no secador um saco de tecido com 2500 g de amostra bruta (úmida). O saco de

ráfia utilizado para o acondicionamento das amostras foi escolhido para exercer uma mínima resistência à passagem do ar. A espessura da camada de secagem foi de aproximadamente 10,0 cm. O grau de umidade da amostra, antes e após a secagem, foi obtido em estufa com circulação de ar (105 ± 3 °C por 24 h) e durante a secagem a umidade foi monitorada por diferença de peso em intervalos regulares, em uma escala digital de precisão $\pm 0,1$ g, até os grãos atingirem umidade próxima a 13 % (base úmida).

Para realizar a medição da temperatura da massa de grãos utilizou-se um termômetro de mercúrio durante o processo de secagem, no final de cada intervalo de ventilação forçada, a amostra era acondicionada em uma caixa térmica de isopor pequena, sendo medida a temperatura por meio de um termômetro durante aproximadamente 1 a 2 minutos no meio da amostra. Quando cessava a variação de temperatura no termômetro, realizava-se a leitura da temperatura da massa de grãos. A velocidade média do ar foi medida por um anemômetro digital de fio aquecido (Testo, modelo 405, Alemanha), colocado na saída do ar na câmara de secagem, e o ajuste da velocidade do ar foi através de um inversor de frequência conectado ao motor do ventilador, assim controlando o motor e, desta forma, a velocidade do ar na câmara de secagem. Também, durante os processos de secagem, a cada intervalo, foram feitas medições das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar, na saída do secador. Uma amostra controle foi secada de forma ininterrupta (sem intermitência) no secador, utilizando a temperatura de 32 ± 2 °C.

3.3 Caracterização dos grãos de arroz

3.3.1 Comprimento (C), largura (L) e espessura (E)

As medições das principais dimensões, ou seja, do comprimento, da largura e da espessura do grão de arroz foram determinadas usando um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Sendo selecionados aleatoriamente 100 (cem) grãos de arroz para realização das medições (KASHANINEJAD et al., 2008), sendo os resultados expressos em milímetros (mm).

3.3.2 Diâmetro equivalente (D)

O diâmetro equivalente é uma relação entre as dimensões fundamentais e traduz o diâmetro de uma esfera com o mesmo volume do grão. Para determinar o diâmetro equivalente do arroz, utilizou-se a equação 1 (KASHANINEJAD et al., 2008), sendo os resultados expressos em milímetros (mm).

$$D = (C \cdot L \cdot E)^{1/3} \quad (1)$$

3.3.3 Esfericidade (ϕ)

A esfericidade estabelece o grau de aproximação da forma de um grão ou partícula a da esfera ($\phi_{\text{máx.}} = 1$), sendo esta uma característica adimensional. Para determinar a esfericidade do arroz utilizou-se a equação 2 (MOHSENIN, 1980).

$$\phi = \frac{(C \cdot L \cdot E)^{1/3}}{C} \quad (2)$$

3.3.4 Área Superficial (A)

Para determinar a área superficial do arroz utilizou-se a equação 3, que está relacionada diretamente com o diâmetro equivalente, sendo os resultados expressos em milímetros quadrados (mm²) (MOHSENIN, 1980).

$$A = \pi \cdot D^2 \quad (3)$$

3.3.5 Volume (V)

Para determinar do volume do grão de arroz utilizou-se a equação 4, sendo os resultados expressos em milímetros cúbicos (mm³) (MOHSEIN, 1980).

$$V = \pi \cdot D^{3/6} \quad (4)$$

3.3.6 Peso de 1000 grãos

Para determinar o peso de mil grãos foi realizado segundo Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009), com contagem de oito repetições de 100 grãos íntegros para cada e pesagem em balança de precisão, sendo os resultados expressos em gramas (g).

3.3.7 Peso volumétrico (ρ_a)

Obteve-se o peso volumétrico (ρ_a) ou massa específica aparente por meio da escala de pesagem do hectolitro (Dallemole, modelo 40, Brasil) com 5 (cinco) repetições para cada experimento, sendo os resultados expressos em kilograma por metro cúbico (kg/m³), utilizando-se a equação 5 no cálculo para sua determinação.

$$\rho_a = \frac{m}{v} \quad (5)$$

onde:

m: é a massa dos grãos (kg);

v: é o volume do recipiente (m³).

3.3.8 Massa específica unitária (ρ_u)

A massa específica unitária (ρ_u) do grão de arroz foi determinada pelo método de deslocamento do tolueno (C_7H_8) (SACILIK; ÖZTÜRK; KESKIN, 2003). Em uma proveta graduada foi utilizado a equação 6, sendo os resultados expressos em kilograma por metro cúbico ($kg.m^{-3}$).

$$\rho_u = \frac{m}{v} \quad (6)$$

3.3.9 Porosidade (ε)

Para determinar a porosidade (ε) foi utilizada a equação 7, relacionando a massa específica aparente (ρ_a) com a massa específica unitária (ρ_u) do arroz, sendo os resultados expressos em porcentagem (%) (MOHSENIN, 1980).

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_u} \right) \times 100 \quad (7)$$

3.3.10 Ângulo de talude (θ)

Para determinar o ângulo de talude, amostras de 1 kg foram despejadas sob fluxo constante em uma caixa de madeira com as laterais de vidro, e a seguir foi realizada a medida da altura (H) e a medida horizontal da metade do comprimento base de grãos (a). Após isso o ângulo de talude do arroz foi calculado pela equação 8 (KASHANINEJAD et al., 2008), sendo os resultados expressos em ângulos ($^\circ$).

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{H}}{\mathbf{a}} \right) \quad (8)$$

3.3.11 Renda de benefício e rendimento de inteiros

Para a determinação da renda de benefício e do rendimento de inteiros o processamento foi realizado em uma máquina de beneficiamento de arroz (marca Zaccaria, modelo DTAZ1, Brasil). Os grãos (100 g) foram descascados em rolos de borracha. O polimento foi realizado por um minuto e trinta segundos. A separação dos grãos quebrados foi realizada em um cilindro alveolado (trieur) de 4,5 mm por 1 minuto, e considerou-se quebrado o grão com comprimento inferior à 4,5 mm, conforme descrito na IN MAPA 06/2009 (BRASIL, 2009). Testes preliminares determinaram o tempo de operação (VANIER et al., 2015). As análises foram realizadas em triplicata e os resultados foram expressos em porcentagem (%), em relação ao arroz em casca.

3.3.12 Grau de umidade

Determinou-se o grau de umidade (teor de água) das amostras de arroz nos grãos com casca através do uso de estufa a 105 ± 3 °C, com circulação de ar por 24 horas de acordo com o método oficial de análises de sementes estabelecido pelo Ministério da Agricultura (BRASIL, 2009). As análises foram realizadas em triplicata e os resultados foram expressos em porcentagem (%).

3.3.13 Cor

A coloração dos grãos foi avaliada através da determinação do perfil branquimétrico e colorimétrico. O perfil branquimétrico dos grãos polidos foi

determinado com uso do branquímetro Zaccaria (modelo MBZ-1, Indústria de Máquinas Zaccaria S/A, São Paulo, Brasil), operado de acordo com recomendações do fabricante. Para determinação do grau de brancura foram preparadas as amostras de cada experimento e em cada amostra foram realizadas três medições, obtendo-se uma média final das repetições de cada material.

O perfil colorimétrico dos grãos polidos foi determinado em um colorímetro (Minolta CR 300, Osaka, Japão), utilizando os parâmetros de cor CIELAB (valor L, a e b). Os valores de luminosidade variam de preto ($L = 0$) a branco ($L = 100$), sendo que quanto mais próxima de 100, mais clara é a amostra. A coordenada cromática “a” caracteriza coloração na região do verde ao vermelho, variando de verde ($a = -60$) a vermelho ($a = +60$), e a coordenada cromática “b” caracteriza coloração na região do azul ao amarelo, variando de azul ($b = -60$) ao amarelo ($b = +60$).

3.4 Delineamento experimental

A escolha do planejamento delineamento composto central rotacional (DCCR) foi feita em função do número de variáveis independentes (três) envolvidas no estudo, na disponibilidade de matéria prima, e na viabilidade do número de ensaios (16 experimentos) e do custo do processo em estudo.

Para a avaliação da secagem realizou-se o DCCR incluindo seis pontos axiais e dois pontos centrais para geração do erro conforme Tabelas 1 e 2, totalizando 16 experimentos. As variáveis estudadas foram temperatura do ar (X_1), tempo de exposição do arroz ao ar aquecido (X_2) e relação de intermitência (X_3). Utilizou-se uma análise de variância para validação do modelo verificando o coeficiente de determinação R^2 e o teste F de Fisher.

Tabela 1 – Valores reais e codificados das variáveis independentes para o delineamento composto central rotacional – DCCR

Variáveis independentes	Código de símbolo	Valores codificados				
		-1,68	-1	0	1	1,68
Temperatura do ar (°C)	X ₁	35	40	47,5	55	60
Tempo de exposição ao ar aquecido (min)	X ₂	5	7	10	13	15
Relação de intermitência	X ₃	1:0,0	1:1,0	1:2,5	1:4,0	1:5,0

Tabela 2 – Delineamento experimental

Tratamentos	Temp. do ar (°C)	Tempo de exposição (min)	Relação de intermitência	tempo de repouso (min)	Temp. do ar (°C), X1	Tempo de exposição (min), X2	Relação de intermitência, X3
1	40	7	1:1,0	7	-1	-1	-1
2	40	7	1:4,0	28	-1	-1	1
3	40	13	1:1,0	13	-1	1	-1
4	40	13	1:4,0	52	-1	1	1
5	55	7	1:1,0	7	1	-1	-1
6	55	7	1:4,0	28	1	-1	1
7	55	13	1:1,0	13	1	1	-1
8	55	13	1:4,0	52	1	1	1
9	35	10	1:2,5	25	-1,68	0	0
10	60	10	1:2,5	25	1,68	0	0
11	47,5	5	1:2,5	12,5	0	-1,68	0
12	47,5	15	1:2,5	37,5	0	1,68	0
13	47,5	10	1:0,0	0	0	0	-1,68
14	47,5	10	1:5,0	50	0	0	1,68
15	47,5	10	1:2,5	25	0	0	0
16	47,5	10	1:2,5	25	0	0	0

3.5 Determinação da razão de umidade

Para a determinação da razão de umidade do arroz em casca, nas suas diferentes condições de secagem, utilizou-se a equação 9:

$$RU = \frac{U - Ue}{Ui - ue} \quad (9)$$

Onde:

RU: razão de umidade do produto, (adimensional);

U: teor de umidade do produto, (decimal, base seca);

Ui: teor de umidade inicial do produto, (decimal, base seca);

Ue: teor de umidade de equilíbrio do produto, (decimal, base seca).

A umidade de equilíbrio higroscópico dos grãos de arroz foi calculada pela equação 10, que expressa o modelo de Chung-Pfoust modificado (PFOUST et al., 1976).

$$UR = \exp. \left[-\frac{A}{T + C} \exp(-B \cdot Ue) \right] \quad (10)$$

Onde:

UR: umidade relativa do ar no espaço intersticial (decimal);

Ue: umidade de equilíbrio (decimal, base seca);

T: temperatura dos grãos (°C);

A, B e C: constantes.

As constantes utilizadas para o cálculo da umidade de equilíbrio higroscópico dos grãos de arroz da classe longo foram A (412,02), B (0,18) e C (39,02), de acordo com a Asae Standards (ASAE, 1996).

3.6 Modelos cinéticos de secagem

Diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas. Embora várias teorias tenham sido propostas para prever o comportamento da secagem de grãos e de sementes, na maioria das

vezes, as relações semi-empíricas e empíricas têm sido as melhores opções para descrever o processo de secagem apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Os dados experimentais da secagem de arroz deste estudo foram ajustados em modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas. O ajuste realizado foi relacionando o tempo de secagem (minutos) e a razão de umidade (adimensional), com a finalidade de verificar qual modelo apresenta o melhor ajuste ao descrever o comportamento do ciclo intermitente da secagem do arroz. Nesse estudo foram aplicados os modelos cinéticos e realizados cálculos estatísticos nos 16 experimentos, com variados parâmetros da dinâmica da secagem, ou seja, sob cinco condições de relação de intermitência: 1:0,0 - 1:1,0 - 1:4,0 - 1:2,5 - 1:5,0; em cinco temperaturas do ar: 35, 40, 47.5, 55 e 60 °C; em cinco tempos de exposição ao ar aquecido: 5, 7, 10, 13 e 15 min; e com velocidade do ar constante no leito de grãos de $0,2 \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$. Os resultados experimentais foram utilizados nos modelos de Newton, Page, Henderson e Pabis e Midilli, cujas equações estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Modelos matemáticos utilizados para prever o processo de secagem

Nome	Equação modelo	Referências
Newton	$RU = \exp(-k.t)$	O'Callaghan et al. (1971)
Page	$RU = \exp(-k.t^n)$	Agrawal e Singh (1977)
Henderson and Pabis	$RU = a.\exp(-k.t)$	Chhinman (1984)
Midilli	$RU = a.\exp(-k.t^n) + b.t$	Midilli, Kucuk e Yapar (2002)

k é a constante da taxa de secagem; a, b e n são coeficientes dos modelos.

Para realizar o ajuste dos modelos matemáticos, foi realizada análise de regressão não-linear. O valor da constante da taxa de secagem “k” e os coeficientes dos modelos “a”, “b” e “n”, foram calculados em função dos ajustes dos modelos matemáticos aos valores experimentais, da razão de umidade e do tempo de secagem, de cada experimento.

Com os dados da secagem realizou-se o ajuste das equações para determinação dos valores das constantes e dos coeficientes dos modelos cinéticos, ajustados à equação linear, e assim obtiveram-se os valores do coeficiente de

determinação R^2 (ajustado) e os valores do erro médio relativo (EMR) que foram calculados para realizar a verificação do ajuste dos modelos matemáticos aos valores experimentais em conjunto com a análise dos resíduos e os gráficos de correspondência entre os valores estimados e os observados. O erro médio relativo foi calculado pela equação 11.

$$\text{EMR} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Y - Y_0]}{Y} \quad (11)$$

Onde:

EMR: Erro médio relativo;

Y: valor observado experimentalmente;

Y_0 : valor calculado pelo modelo;

n: número de observações experimentais.

4 Resultados e discussão

4.1 Propriedades físicas dos grãos de arroz

A Tabela 4 apresenta os resultados da caracterização dos grãos de arroz úmidos quanto as propriedades físicas.

Tabela 4 – Propriedades físicas dos grãos de arroz, com umidade de colheita de 21%, base úmida

Propriedades	Amostra úmida
Comprimento (mm)	10,07 ± 0,51
Largura (mm)	3,22 ± 0,13
Espessura (mm)	2,23 ± 0,09
Diâmetro equivalente (mm)	4,16 ± 0,15
Esfericidade (adimensional)	0,41 ± 0,01
Área superficial (mm ²)	54,50 ± 3,81
Volume (mm ³)	37,91 ± 3,93
Porosidade (%)	51,8 ± 0,2
Peso volumétrico (kg.m ⁻³)	595,4 ± 3,1
Peso de 1000 Grãos (g)	16,30 ± 0,10
Ângulo de Talude (°)	36,5 ± 0,1
Peso específico real (kg.m ⁻³)	1235 ± 21

Conforme se observa na Tabela 4, as dimensões obtidas do arroz em estudo situam-se entre aquelas registradas na legislação brasileira para a classe longo, pois contém mais de 80,0% do peso dos grãos inteiros medindo mais de 6,00 mm em seu comprimento e após o polimento dos grãos sua espessura é maior que 1,90 mm (BRASIL, 2009). As propriedades dimensionais e físicas dos grãos de arroz estão de acordo com os valores encontrados na literatura (CORRÊA et al., 2007) e são parâmetros essenciais para dimensionamento e operacionalização de operações de pós-colheita de arroz, em especial a secagem.

4.2 Resultados da matriz do delineamento experimental

A Tabela 5 apresenta os resultados da matriz do delineamento experimental da secagem de arroz em casca.

Tabela 5 – Resultados da matriz do delineamento experimental (DCCR)

Temperatura do ar (°C), X ₁	Tempo de exposição ao ar aquecido (min), X ₂	Relação de intermitência, X ₃ *	Rendimento de inteiros (%)	Grau de Brancura	Renda de benefício (%)	Luminosidade	Cromaticidade "a"	Cromaticidade "b"	Temperatura máx. da massa de grãos (°C)	Tempo de secagem (min)
40 (-1)	7 (-1)	1:1,0 (-1)	63,9 ± 0,7	29,1 ± 1,6	70,1 ± 1	69,1 ± 2,8	-0,9 ± 0,1	7,6 ± 1,4	39,0	539,0
40 (-1)	7 (-1)	1:4,0 (+1)	64,4 ± 0,4	31,1 ± 0,8	69,2 ± 1	70,8 ± 2,8	-1 ± 0,2	6,7 ± 0,5	34,0	637,0
40 (-1)	13 (+1)	1:1,0 (-1)	62,4 ± 0,1	30,6 ± 0	69,3 ± 0,3	70,2 ± 2,3	-1,1 ± 0,2	7,5 ± 1,1	38,0	351,0
40 (-1)	13 (+1)	1:4,0 (+1)	63,9 ± 0,8	30,6 ± 0,4	69,8 ± 0,4	68,1 ± 1,9	-0,9 ± 0,2	7,2 ± 0,7	37,0	598,0
55 (+1)	7 (-1)	1:1,0 (-1)	34,6 ± 6,1	34 ± 0,7	66,2 ± 0,8	70,4 ± 2,4	-1,2 ± 0,1	7 ± 0,2	50,0	147,0
55 (+1)	7 (-1)	1:4,0 (+1)	53,3 ± 0,8	33,8 ± 1,9	68,4 ± 0,8	69,6 ± 2,9	-1,2 ± 0,1	6,6 ± 0,2	49,0	252,0
55 (+1)	13 (+1)	1:1,0 (-1)	35 ± 1,2	31,5 ± 1,4	66,3 ± 0,2	71,7 ± 3	-1,3 ± 0,1	7 ± 0,5	51,0	143,0
55 (+1)	13 (+1)	1:4,0 (+1)	55,3 ± 1,8	35 ± 1,6	68,2 ± 0,4	69,4 ± 2,4	-1,2 ± 0,2	7,3 ± 0,7	48,0	273,0
35 (-1,68)	10 (0)	1:2,5 (0)	64,6 ± 0,4	31,1 ± 0,8	69,4 ± 0,4	68,7 ± 1,6	-1 ± 0,2	7,9 ± 0,7	33,0	605,0
60 (+1,68)	10 (0)	1:2,5 (0)	33,2 ± 0,3	34,7 ± 0,8	66,2 ± 1,8	71 ± 2,4	-1,3 ± 0,1	7 ± 0,3	55,0	185,0
47,5 (0)	5 (-1,68)	1:2,5 (0)	60,5 ± 0,9	31,3 ± 0,6	68,8 ± 0,4	68,3 ± 2,3	-1,1 ± 0,2	7,8 ± 0,7	40,0	302,0
47,5 (0)	15 (+1,68)	1:2,5 (0)	62 ± 0,6	32,5 ± 1,9	69,6 ± 0,2	70,1 ± 1,5	-1,2 ± 0,3	8,8 ± 1,7	42,0	330,0
47,5 (0)	10 (0)	1:0,0 (-1,68)	45,9 ± 1,2	32,6 ± 1,3	67,8 ± 0,6	69,1 ± 3,9	-1,3 ± 0,1	7,8 ± 0,8	45,0	170,0
47,5 (0)	10 (0)	1:5,0 (+1,68)	65,2 ± 0,3	29,4 ± 1,4	70,6 ± 0,6	70,4 ± 2	-1,1 ± 0,1	8,1 ± 0,7	42,0	550,0
47,5 (0)	10 (0)	1:2,5 (0)	60,1 ± 0,2	30,4 ± 0,8	69,9 ± 0,6	70,9 ± 2	-1,3 ± 0,1	7,9 ± 0,8	44,0	325,0
47,5 (0)	10 (0)	1:2,5 (0)	58,5 ± 0,3	32 ± 0,7	69,1 ± 0,4	71,8 ± 2,8	-1,3 ± 0,3	8,2 ± 1,6	44,0	290,0

Valor real (valor codificado). *A relação de intermitência é expressa como (tempo de exposição ao ar aquecido, min) / (tempo de repouso, min).

Conforme a Tabela 5 a variação do rendimento de inteiros foi entre 33,2 e 65,2%. Nas temperaturas do ar menores, ou seja, até 42 °C na massa de grãos, o percentual de grãos inteiros foi superior a 60%. A medida que a temperatura do ar aumenta o percentual de grãos inteiros diminuiu, confirmando que grãos de arroz em casca não suportam uma operação de secagem com temperaturas elevadas, pois altas taxas de remoção de água contribuem para aumentar o percentual de grãos quebrados no beneficiamento industrial (BUGGENHOUT et al., 2014).

Os valores do grau de brancura do arroz polido foram de 29,1 a 35,0 GBZ, sendo que o experimento 8 foi o que apresentou o maior grau de brancura do arroz e o experimento 1 o que apresentou o menor grau de brancura.

A variação do parâmetro luminosidade (L) foi pequena, isto é, de 68,1 a 71,8. Os grãos secos de acordo com os parâmetros utilizados no experimento 16 apresentaram a maior luminosidade em relação aos demais experimentos. Nos experimentos realizados a variação da coordenada cromática "a", do perfil colorimétrico dos grãos, foi de -1,3 a -0,9, mostrando pouca variação e pequena intensidade de coloração verde. Já a variação da coordenada cromática "b", do perfil colorimétrico dos grãos, foi de 6,6 a 8,8 (Tabela 5), mostrando pouca variação e pequena intensidade de coloração amarela.

O tempo de secagem apresentou elevada variação (de 143 a 637 minutos) para reduzir a umidade de 21% para 13%. O mesmo ocorreu com a temperatura máxima da massa de grãos, variando de 33,0 a 55,0 °C. De acordo com Lang et al. (2018), as variáveis operacionais da secagem de arroz, especialmente a temperatura do ar, alteram significativamente alguns parâmetros de qualidade do arroz e a eficiência da operação, podendo diminuir drasticamente o tempo de secagem, porém aumentando o percentual de grãos quebrados.

4.3 Efeitos dos parâmetros operacionais de secagem

Através dos resultados obtidos, com relação à influência dos parâmetros operacionais de secagem (temperatura do ar, tempo de exposição ao ar aquecido e relação de intermitência) na qualidade dos grãos de arroz, foram elaborados os diagramas de Pareto (Figura 2). Estes diagramas indicam os fatores mais significativos na otimização do processo de secagem de arroz, em função de algumas respostas do processo e da qualidade do arroz seco.

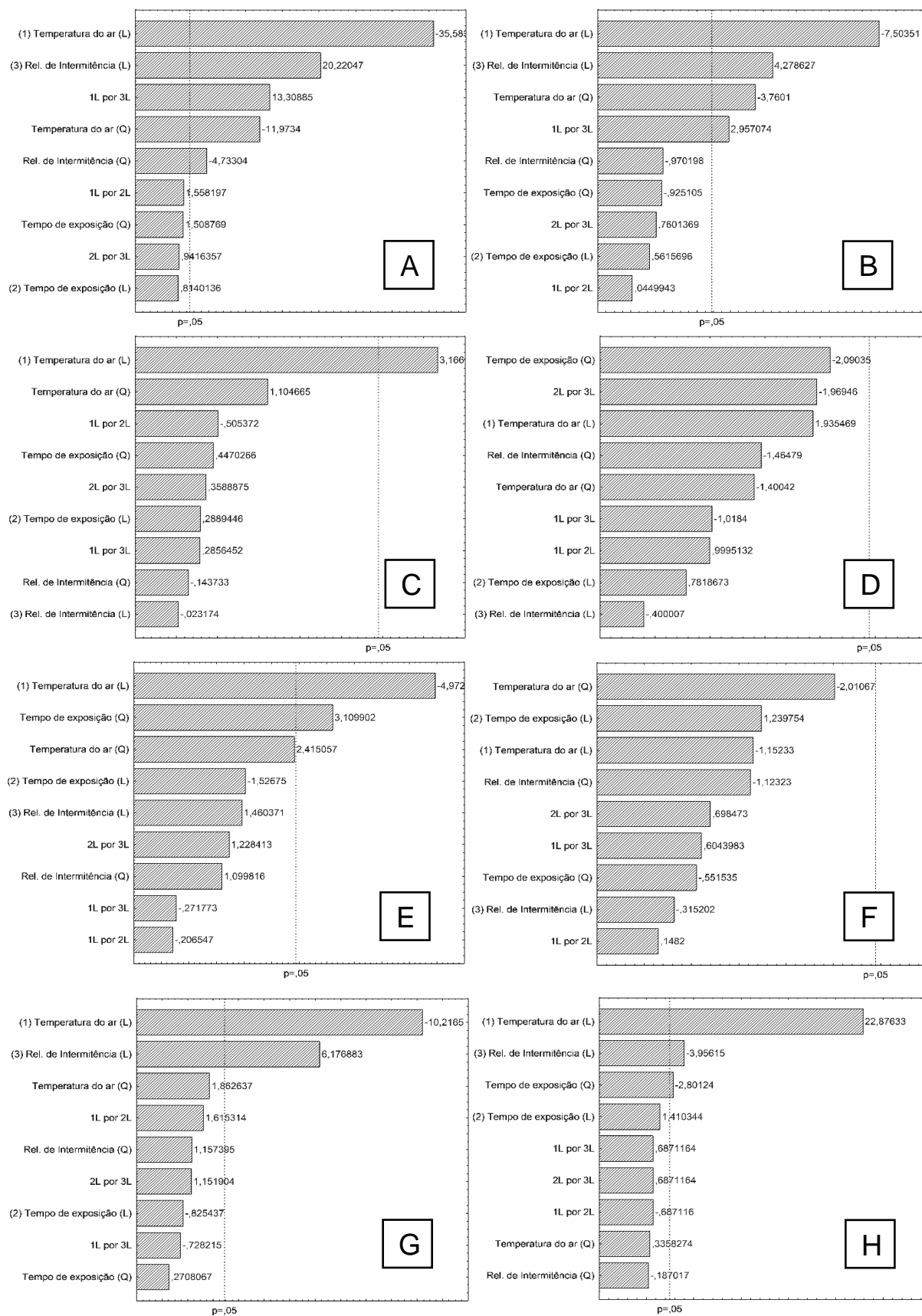


Figura 2 – Diagramas de Pareto para os efeitos das condições de processo sobre: (A) rendimento de inteiros; (B) Renda de benefício; (C) Grau de brancura; (D) Luminosidade 'L'; (E) Cromaticidade 'a'; (F) Cromaticidade 'b'; (G) Tempo de secagem e (H) Temperatura máxima da massa dos grãos.

No diagrama de Pareto da Figura 2(A) podem se constatar os efeitos das variáveis operacionais do processo de secagem do arroz no rendimento de inteiros, onde observou-se que o efeito linear da temperatura do ar foi o mais significativo para o rendimento de inteiros. Este efeito negativo indica uma redução no rendimento de inteiros com o aumento da temperatura. A relação de intermitência apresentou efeito linear positivo, revelando que o aumento da relação de intermitência favoreceu o aumento do rendimento de inteiros. A interação linear entre a temperatura de secagem e a relação de intermitência, assim como seus efeitos quadráticos mostraram-se estatisticamente significativos ao nível de significância de 5,0% ($p < 0,05$). O tempo de exposição dos grãos ao ar aquecido não foi significativo no rendimento de inteiros, uma vez que ele depende do fluxo de ar utilizado e das trocas térmicas entre o ar e a massa de grãos. Assim, um fluxo de ar elevado aumenta mais rapidamente a temperatura da massa de grãos, tendendo ao equilíbrio com a temperatura do ar ambiente.

No diagrama de Pareto da Figura 2(B) podem ser constatados efeitos das variáveis do processo de secagem dos grãos de arroz longo na renda de benefício. Observou-se que o efeito linear da temperatura do ar foi o mais significativo, este efeito negativo indica uma redução na renda de benefício com o aumento da temperatura do ar. O efeito quadrático da temperatura do ar também se mostrou significativo ($p > 0,05$), juntamente com a relação de intermitência e a interação linear entre a temperatura do ar e a relação de intermitência. O efeito linear e o efeito quadrático do tempo de exposição do arroz ao ar aquecido não interferiram significativamente na renda de benefício.

No diagrama de Pareto da Figura 2(C), referente ao grau de branura do arroz, observou-se que a temperatura do ar foi a única variável significativa ($p < 0,05$), apresentando efeito linear positivo. Assim, pode ser entendido que o aumento na temperatura do ar causou um aumento no grau de branura do arroz.

Em relação ao perfil colorimétrico dos grãos de arroz, a escala de Hunter foi utilizada para medir a luminosidade e a cromaticidade. Para ambos os parâmetros luminosidade (L) e cromaticidade 'b', apresentados nos diagramas de Pareto das Figuras 2(D) e 2(F), respectivamente, observou-se que os efeitos lineares, os efeitos quadráticos e as interações entre a temperatura do ar, a relação de intermitência e o tempo de exposição no processo de secagem, mostraram-se não significativos ($p > 0,05$). Porém, no diagrama de Pareto da Figura 2(E) observou-se os efeitos das

variáveis do processo de secagem do arroz na cromaticidade 'a' (vermelho/verde), onde o efeito linear da temperatura do ar e o efeito quadrático do tempo de exposição dos grãos ao ar aquecido foram significativos ($p < 0,05$). O efeito linear negativo da temperatura do ar indica uma redução no valor da coordenada cromática 'a' com o aumento da temperatura do ar. Os resultados da cromaticidade 'a' indicam uma pequena tendência dos grãos à coloração verde.

No diagrama de Pareto da Figura 2(G) podem se constatar os efeitos das variáveis do processo de secagem do arroz no tempo de secagem. Onde constatou-se que o efeito linear da temperatura do ar foi o mais significativo ($p < 0,05$). Este efeito negativo indica uma redução no tempo de secagem com o aumento da temperatura. A relação de intermitência apresentou efeito linear positivo ($p < 0,05$), revelando que o aumento da relação de intermitência aumentou o tempo de secagem. Os demais efeitos não foram significativos ($p > 0,05$).

No diagrama de Pareto da Figura 2(H) pode se constatar os efeitos das variáveis do processo de secagem do arroz na temperatura máxima da massa de grãos, onde observou-se que o efeito linear da temperatura do ar foi o mais significativo na temperatura máxima da massa de grãos. Este efeito positivo indica um aumento na temperatura máxima da massa de grãos com o aumento da temperatura do ar. A relação de intermitência apresentou efeito linear negativo, o que significa que o aumento na relação de intermitência não contribuiu para a elevação da temperatura da massa de grãos. O tempo de exposição do arroz ao ar aquecido apresentou efeito quadrático negativo. O restante dos efeitos quadráticos e os efeitos das interações lineares entre a temperatura do ar, a relação de intermitência e o tempo de exposição, mostraram-se não significativos ($p > 0,05$) em relação à temperatura máxima da massa de grãos.

4.4 Resultados da análise de variância dos parâmetros de qualidade do arroz e dos aspectos industriais

Na Tabela 6, são apresentados os resultados da análise de variância dos modelos polinomiais obtidos para a otimização da secagem de arroz em relação aos parâmetros de processo e de qualidade dos grãos. Além disso, é apresentado o teste F de Fisher (F calculado / F tabelado), para verificar a capacidade dos modelos em prever o comportamento das variáveis resposta utilizadas.

Tabela 6 – Resultados da análise de variância dos parâmetros de qualidade do arroz e dos aspectos industriais

	Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	$F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$
Rendimento de inteiros (%)	Regressão Linear	1983,80	9	220,42	55,71
	Resíduos	5,79	6	0,97	
	Total	1989,59	15		
	R ²	0,997			
Renda de benefício (%)	Regressão Linear	28,87	9	3,21	3,01
	Resíduos	1,75	6	0,29	
	Total	30,62	15		
	R ²	0,943			
Grau de Brancura	Regressão Linear	31,81	9	3,53	0,33
	Resíduos	15,53	6	2,59	
	Total	47,34	15		
	R ²	0,672			
Luminosidade (L)	Regressão Linear	14,07	9	1,56	0,42
	Resíduos	5,49	6	0,92	
	Total	19,56	15		
	R ²	0,719			
Cromaticidade “a”	Regressão Linear	0,22	9	0,02	1,15
	Resíduos	0,03	6	0,01	
	Total	0,25	15		
	R ²	0,876			
Cromaticidade “b”	Regressão Linear	3,03	9	0,34	0,22
	Resíduos	2,23	6	0,37	
	Total	5,26	15		
	R ²	0,576			
Temperatura máxima da massa de grãos (°C)	Regressão Linear	586,08	9	65,12	15,00
	Resíduos	6,35	6	1,06	
	Total	592,44	15		
	R ²	0,989			
Tempo de secagem (min)	Regressão Linear	433063,90	9	48118,21	4,12
	Resíduos	17113,04	6	2852,17	
	Total	450176,94	15		
	R ²	0,962			

O resultado da análise de variância do modelo polinomial para a otimização da secagem de arroz considerando as variáveis que foram significativas no rendimento de inteiros (Tabela 6) indica que o modelo polinomial obtido pelo DCCR para a otimização da secagem de arroz em função do rendimento de inteiros foi estatisticamente significativo, indicado pelo elevado coeficiente de determinação R^2 e preditivo, indicado pelo Teste F de Fischer. De acordo com Khuri e Cornell (1996), o modelo é considerado preditivo quando o valor de “F calculado” é pelo menos três vezes maior do que o valor do “F tabelado”. A equação 12 descreve o rendimento de inteiros (Y_1), em função da temperatura do ar (X_1) e da relação de intermitência (X_3), na forma codificada.

$$Y_1(\%) = 59,4 - 9,5X_1 - 3,9X_1^2 + 5,4X_3 - 1,5X_3^2 + 4,6X_1X_3 \quad (12)$$

Além do rendimento de inteiros, a renda de benefício dos grãos de arroz apresentou variação significativa ($p < 0,05$) em função das variáveis operacionais de secagem e o modelo de regressão é preditivo, de acordo com o teste F de Fischer (Tabela 6). A equação 13 descreve o valor da renda de benefício (Y_2) em função da temperatura do ar (X_1) e da relação de intermitência (X_3), na forma codificada.

$$Y_2(\%) = 69,5 - 1,1X_1 - 0,7X_1^2 + 0,6X_3 + 0,6X_1X_3 \quad (13)$$

Em relação aos demais parâmetros de qualidade analisados, grau de branura e perfil colorimétrico do arroz, os resultados da análise de variância indicam que os modelos polinomiais obtidos pelo DCCR para a otimização da secagem de arroz não são adequados para predizer o comportamento de secagem indicado pelos baixos valores dos coeficientes de determinação R^2 e pelos valores dos testes F de Fischer ($F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}} < 3$).

As variáveis resposta adotadas para verificar as condições industriais de secagem foram a temperatura máxima atingida pela massa de grãos e o tempo total de secagem, considerando o tempo de repouso e tempo de contato com o ar de secagem. Ambas as variáveis apresentaram modelos estatisticamente significativos e preditivos. As equações 14 e 15 podem ser utilizadas para descrever a temperatura máxima da massa de grãos (Y_3) e o tempo de secagem (Y_4), em função da temperatura do ar (X_1), tempo de exposição ao ar aquecido (X_2) e da relação de intermitência (X_3), na forma codificada.

$$Y_3(^{\circ}\text{C}) = 43,9 + 6,4X_1 - 0,9X_2^2 - 1,1X_3 \quad (14)$$

$$Y_4(\text{min}) = 306,8 - 147,6X_1 + 89,3X_3 \quad (15)$$

Na superfície de resposta da Figura 3, que apresenta o rendimento de inteiros em função da temperatura do ar e da relação de intermitência, o tempo de exposição ao ar aquecido não foi significativo para esta variável resposta.

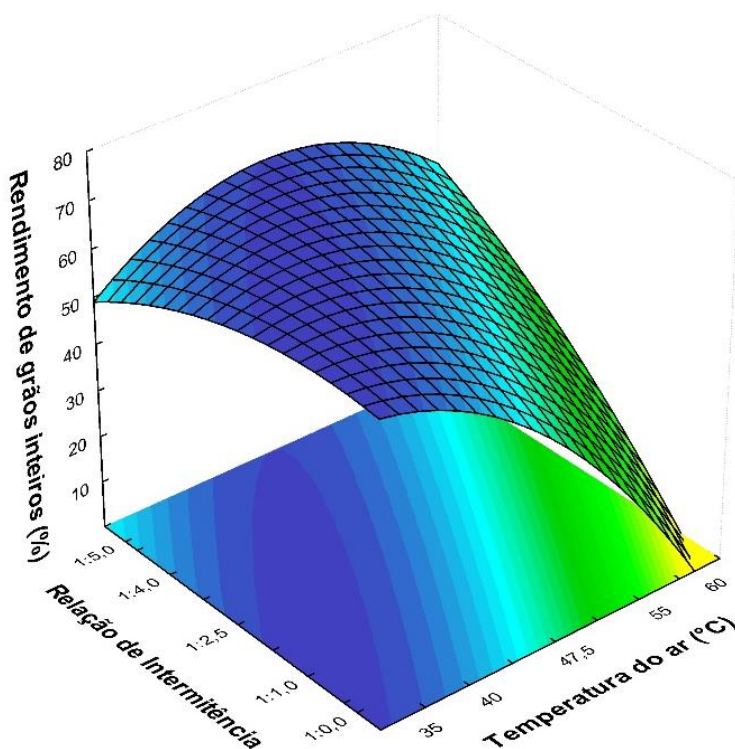


Figura 3 – Superfície de resposta do rendimento de inteiros em função da temperatura do ar e da relação de intermitência.

Observou-se que a medida que aumentou a relação de intermitência, a temperatura de secagem pôde ser elevada sem uma diminuição brusca do rendimento de inteiros, até a temperatura de 47,5 °C. Assim, quando se utilizou a relação de intermitência 1:5,0, a temperatura do ar de 47,5 °C manteve-se elevado o rendimento de inteiros. Nesta condição a temperatura da massa de grãos alcançou 42 °C. A condição de secagem otimizada em função do rendimento de inteiros foi com a temperatura do ar de 47,5 °C (42 °C na massa de grãos) e relação de intermitência de 1:5,0. Pode-se ressaltar que a diminuição da temperatura para 40 °C e a relação de intermitência para 1:2,5 manteve elevado o rendimento de inteiros.

Na superfície de resposta da Figura 4, que relaciona a renda de benefício do arroz em função da temperatura do ar (°C) e da relação de intermitência, observou-se que na medida em que se aumentou a relação de intermitência e se diminuiu a temperatura do ar, conseqüentemente, houve aumento na renda de benefício.

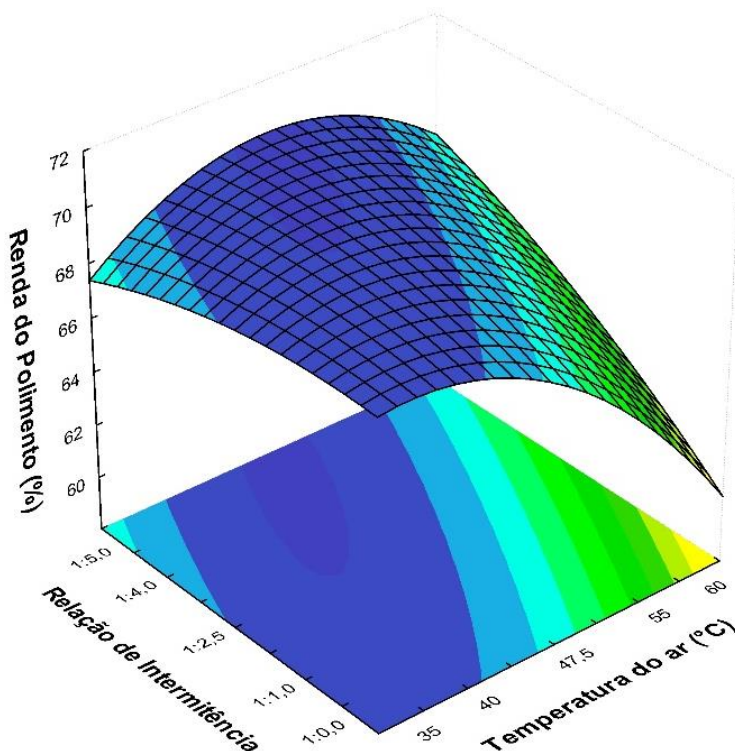


Figura 4 – Superfície de resposta da renda de benefício em função da temperatura do ar e da relação de intermitência.

A condição de secagem otimizada em função da renda de benefício foi com temperatura do ar de 47,5 °C (com temperatura máxima na massa de grãos de 42 °C) e a relação de intermitência de 1:5,0, sendo esta, a mesma condição ótima observada para rendimento de inteiros. A elevada renda de benefício, indicou uma remoção mínima do farelo de 8,8%. Isto foi atribuído a maior integridade física dos grãos secos nesta condição, que conseqüentemente apresentam menos fissuras. A remoção do farelo ocorre por atrito, assim os grãos fissurados na secagem são mais suscetíveis a quebra durante as operações de brunimento e polimento, e desta forma a medida que os grãos se quebram aumenta a área superficial e ocorre uma maior remoção de farelo.

Com relação às variáveis resposta do processo industrial, a Figura 5 apresenta o tempo de secagem do arroz em função temperatura do ar e a relação de intermitência, nesta superfície de resposta da Figura 5 observou-se que a medida que se aumentou a relação de intermitência e se diminuiu a temperatura do ar, ocorreu um aumento no tempo necessário para remover a água do arroz. A busca industrial pela diminuição do tempo de secagem e conseqüentemente do gasto energético é importante e necessária, porém está diretamente relacionada com os

padrões mínimos de qualidade exigidos. A condição que apresentou o menor tempo de secagem foi com a temperatura do ar de 55 °C, relação de intermitência de 1:1,0 e o tempo de exposição ao ar aquecido de 13 minutos, porém nessas condições de secagem o rendimento de inteiros foi de apenas 35,0%, não viabilizando a operação industrial, pois é necessário que exista um equilíbrio entre esses dois fatores para viabilizar o processo industrial de beneficiamento.

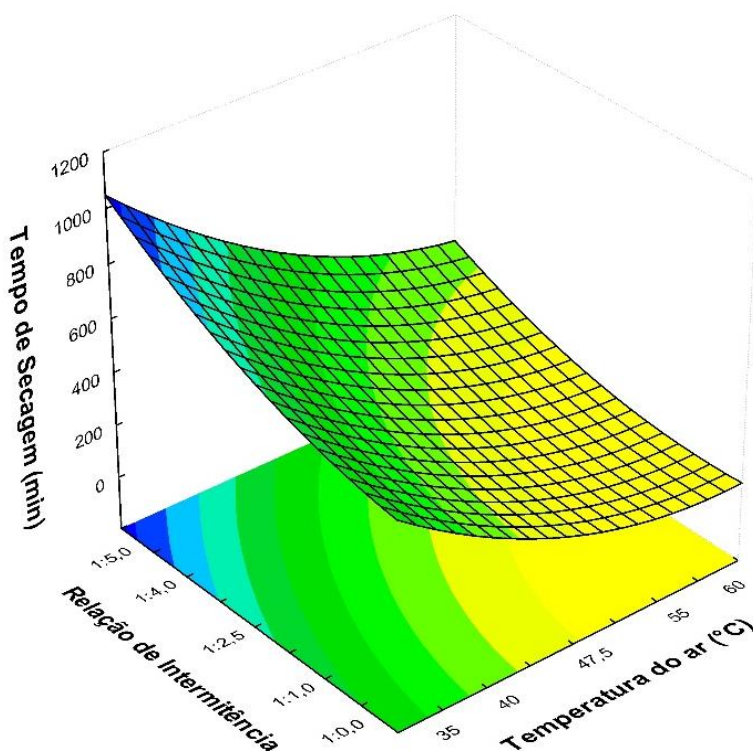


Figura 5 – Superfície de resposta do tempo de secagem em função da temperatura do ar e da relação de intermitência.

A temperatura da massa de grãos é um parâmetro muito utilizado na indústria para garantir a qualidade final do arroz na operação de secagem. Neste sentido, as superfícies de resposta apresentadas na Figura 6 relacionam a temperatura máxima da massa de grãos com as variáveis operacionais temperatura do ar de secagem, tempo de exposição do grão ao ar aquecido e relação de intermitência.

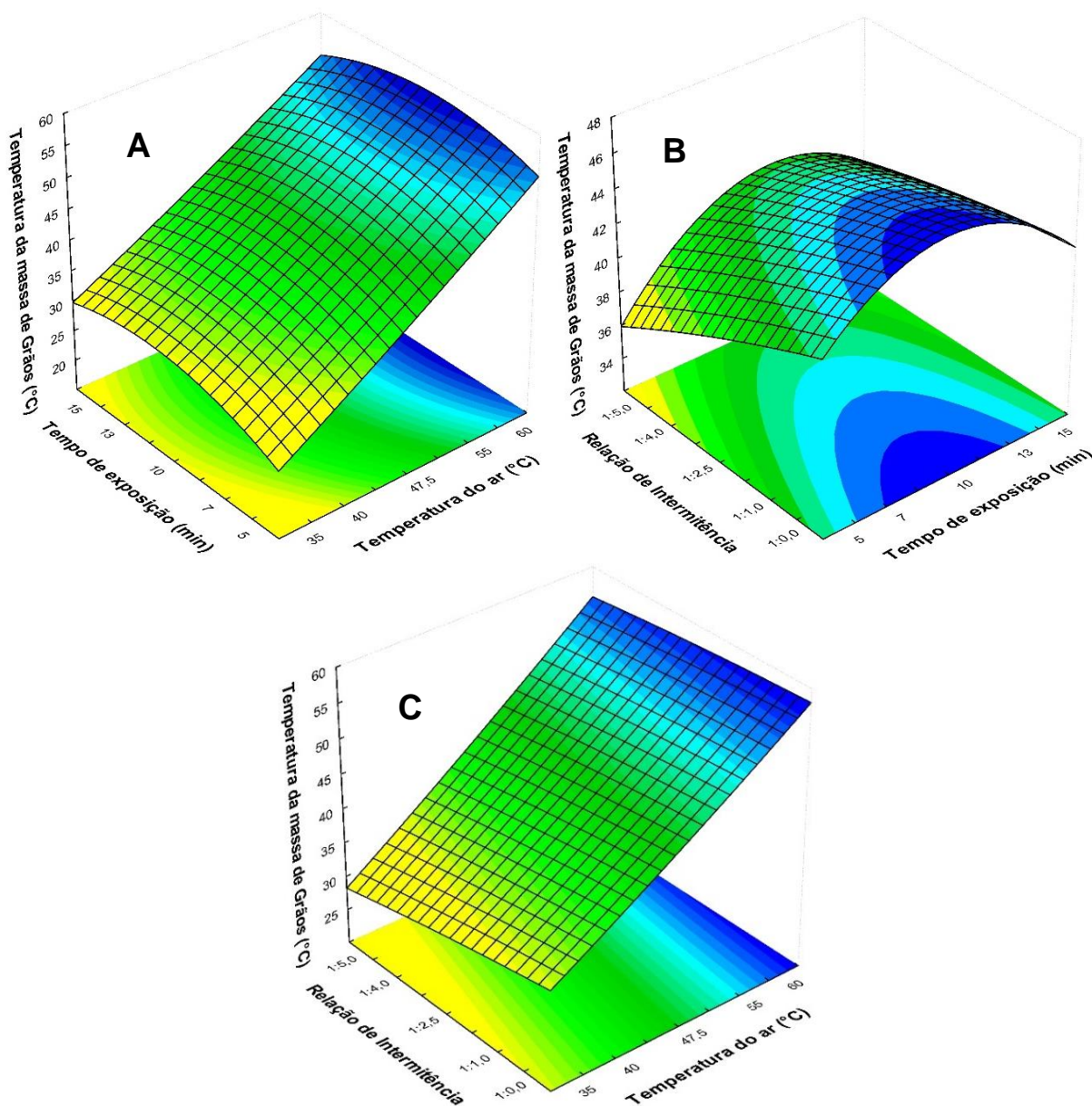


Figura 6 – Temperatura máxima da massa de grãos em função das seguintes variáveis operacionais de secagem: (A) tempo de exposição ao ar aquecido e temperatura do ar; (B) relação de intermitência e tempo de exposição ao ar aquecido e (C) relação de intermitência e temperatura do ar.

Estas três variáveis foram significativas ($p < 0,05$) no comportamento da temperatura máxima da massa de grãos durante o processo de secagem. Com relação ao tempo de exposição da massa de grãos ao ar aquecido, notou-se uma tendência de aumento na temperatura máxima da massa de grãos (Figuras 6A e 6B). A maior relação de intermitência resultou na diminuição da temperatura máxima da massa de grãos. Isto se explica pelo maior tempo de repouso dos grãos, não estando em contato com o ar aquecido, aliado com a difusão de água do interior dos grãos, que auxilia a resfriar a superfície e conseqüentemente evaporar a água, através das trocas isoentálpicas de calor e massa durante a secagem.

Ambas as variáveis resposta, temperatura máxima da massa de grãos e tempo de secagem, por si só, não atendem as condições de otimização de processo, por não estarem ligadas a qualidade final do arroz seco. Assim, levando em consideração que o rendimento de inteiros foi o fator de qualidade mais importante na otimização da secagem, foi construído um gráfico relacionando este fator com a temperatura máxima da massa de grãos e com o tempo de secagem (Figura 7).

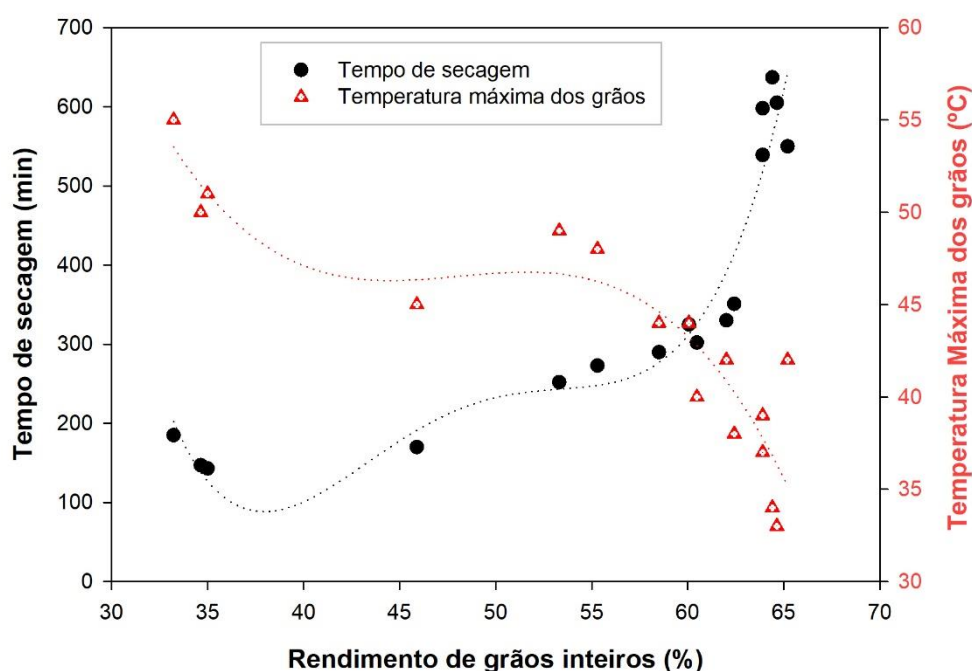


Figura 7 – Rendimento de inteiros de arroz em função do tempo de secagem e da temperatura máxima da massa de grãos.

A intersecção das linhas de tendência do tempo de secagem e da temperatura máxima da massa de grãos da Figura 7 indicam que uma condição ideal para correlacionar os aspectos industriais da secagem com a qualidade dos grãos foi encontrada no experimento 15 (temperatura do ar de 47,5 °C; tempo de exposição de 10 minutos e relação de intermitência de 1:2,5). Nestas condições, o arroz alcançou um rendimento de inteiros de 60,1%, o tempo de secagem foi de 325 minutos e a temperatura máxima da massa de grãos foi de 44 °C.

4.5 Avaliação cinética da secagem de arroz

Na Figura 8 são apresentadas as dinâmicas de secagem, ou seja, a relação entre a umidade dos grãos e o tempo de secagem para cada experimento, que foram realizados para avaliar o comportamento da secagem intermitente de grãos longo de arroz em função da temperatura do ar, tempo de exposição do grão ao ar aquecido e relação de intermitência.

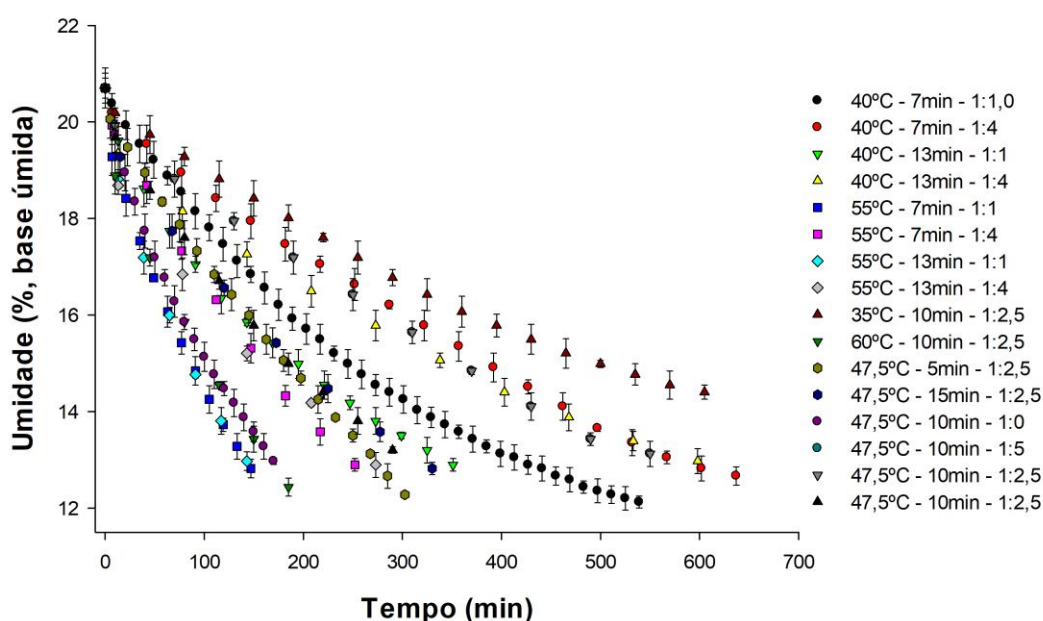


Figura 8 – Gráfico da umidade da massa de grãos em relação ao tempo para as diferentes condições operacionais de secagem.

Analisando as curvas de secagem, é possível notar que a umidade dos grãos de arroz foi diminuída de 21% para aproximadamente 13% em base úmida, e para isso os tempos de secagem variaram entre 143 e 637 minutos, resultando em uma taxa de secagem média que variou entre 0,75 e 3,26 pontos percentuais por hora. A condição experimental de secagem que utilizou a temperatura de 35 °C, pode ser considerada a mais alongada pois apresentou uma umidade ainda superior a 13%. As condições mais rápidas foram obtidas nas maiores temperaturas (55 e 60 °C) e nas menores relações de intermitência. Portanto, conforme verificado e relatado por diversos autores (BOEMEKE, 2000; SANTOS, 2007; ELIAS; OLIVEIRA; VANIER,

2015), confirma-se que a elevação da temperatura de secagem intensifica as trocas térmicas, ampliando a velocidade de secagem e reduzindo, portanto, o tempo de duração do processo.

A Figura 9 apresenta as curvas da taxa de secagem de arroz em função da umidade dos grãos, para as diferentes condições experimentais.

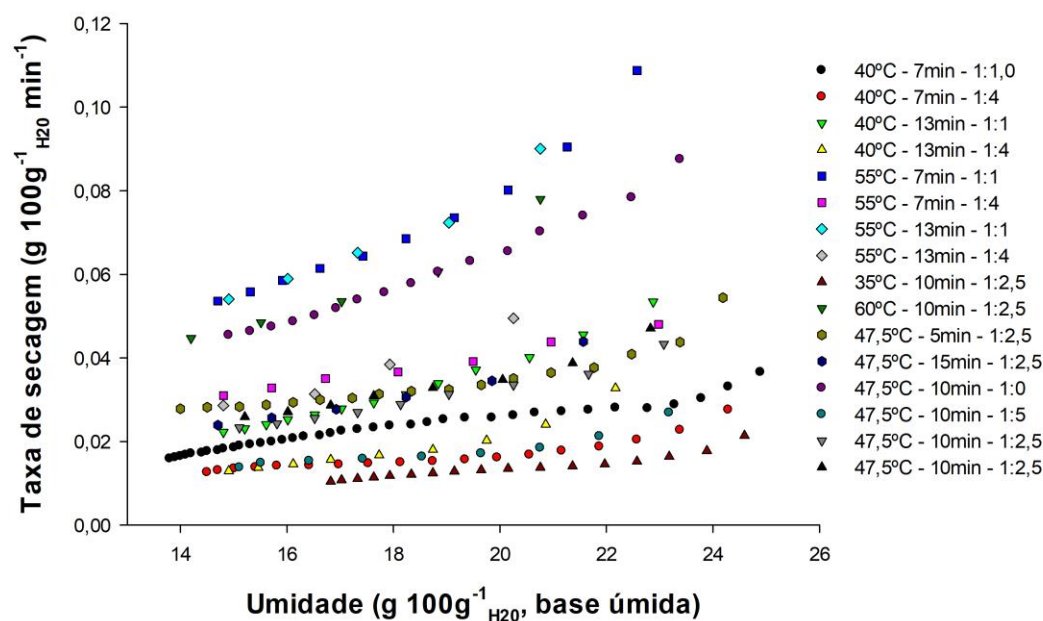


Figura 9 – Taxa de secagem em relação a umidade da massa de grãos para diferentes condições operacionais de secagem.

A taxa de secagem expressa a velocidade da difusão de água do interior do grão e sua posterior evaporação. Assim, observou-se que as taxas de secagem foram de 0,01 a 0,11 %_{água} min⁻¹. No início da secagem quando a umidade ainda era alta, a taxa de secagem tendeu a valores mais elevados em todos os experimentos, devido a maior facilidade de evaporar a água superficial dos grãos. A medida que a superfície seca, os mecanismos de difusão internos são mais lentos, fazendo com que ocorra a diminuição da taxa de secagem. As maiores taxas de secagem foram encontradas nas temperaturas do ar mais elevadas e nas menores relações de intermitência.

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados da análise estatística dos modelos cinéticos, ou seja, o ajuste dos modelos aos dados experimentais.

Tabela 7 – Análise estatística dos modelos matemáticos de secagem

Experimento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Temperatura (°C)	40	40	40	40	55	55	55	55	35	60	47,5	47,5	47,5	47,5	47,5	47,5
Tempo de exposição (min)	7	7	13	13	7	7	13	13	10	10	5	15	10	10	10	10
Relação de intermitência	1:1,0	1:4,0	1:1,0	1:4,0	1:1,0	1:4,0	1:1,0	1:4,0	1:2,5	1:2,5	1:2,5	1:2,5	1:0,0	1:5,0	1:2,5	1:2,5
Newton																
k (min ⁻¹) x10 ⁻³	1,83	1,20	2,21	1,26	4,45	2,53	4,50	2,35	1,03	3,67	2,32	2,11	3,99	1,18	1,98	2,18
R ²	0,983	0,994	0,944	0,935	0,962	0,991	0,963	0,915	0,988	0,954	0,995	0,965	0,976	0,986	0,977	0,978
R ² (ajustado)	0,983	0,994	0,944	0,935	0,962	0,991	0,963	0,915	0,988	0,954	0,995	0,965	0,976	0,986	0,977	0,978
EMR (%)	3,44	1,22	4,40	4,31	2,94	1,50	3,08	4,71	1,76	3,34	1,01	3,13	2,61	1,51	2,55	2,41
Page																
k (min ⁻¹) x10 ⁻³	4,56	2,04	11,26	9,67	14,66	5,23	16,34	21,82	2,54	16,62	3,46	2,11	10,26	3,00	6,46	6,73
n	0,84	0,91	0,70	0,66	0,74	0,86	0,72	0,58	0,85	0,69	0,92	0,73	0,80	0,84	0,78	0,79
R ²	0,997	0,997	1,000	0,993	0,997	0,998	0,999	0,991	0,998	0,994	0,997	0,996	1,000	0,995	0,998	0,997
R ² (ajustado)	0,997	0,997	1,000	0,992	0,997	0,998	0,998	0,989	0,998	0,993	0,997	0,996	1,000	0,994	0,998	0,997
EMR (%)	1,35	1,03	0,21	1,23	0,60	0,50	0,57	1,65	0,61	1,32	0,83	0,96	0,24	1,06	0,44	0,55
Henderson and Pabis																
k (min ⁻¹) x10 ⁻³	1,72	1,16	1,93	1,09	3,96	2,40	4,08	2,04	0,96	3,28	2,21	1,91	3,64	1,10	1,82	2,00
a	0,97	0,98	0,94	0,94	0,96	0,98	0,96	0,95	0,98	0,96	0,98	0,00	0,96	0,97	0,97	0,97
R ²	0,990	0,998	0,977	0,977	0,987	0,996	0,981	0,959	0,995	0,979	0,998	0,985	0,990	0,995	0,991	0,992
R ² (ajustado)	0,990	0,998	0,976	0,974	0,985	0,996	0,978	0,949	0,995	0,975	0,998	0,983	0,990	0,994	0,990	0,990
EMR (%)	2,58	0,82	2,54	2,34	1,52	0,97	2,19	3,33	0,97	2,18	0,65	1,94	1,53	1,04	1,49	1,43
Midilli																
k (min ⁻¹) x10 ⁻³	2,62	3,80	10,94	31,16	24,64	6,39	25,00	55,02	1,81	43,82	3,81	23,17	9,90	15,67	8,22	11,12
a	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	0,99	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
n	0,99	0,71	0,71	0,35	0,51	0,76	0,53	0,26	0,92	0,32	0,81	0,43	0,82	0,37	0,68	0,60
b	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	-	-	0,000	-	-	-	0,000	-	0,000	-
R ²	1,000	0,999	1,000	0,999	0,999	0,999	1,000	0,999	0,999	1,000	0,999	1,000	1,000	0,998	0,999	0,999
R ² (ajustado)	1,000	0,998	1,000	0,998	0,999	0,998	0,999	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	1,000	0,998	0,998	0,998
EMR (%)	0,33	0,75	0,22	0,65	0,43	0,54	0,32	0,47	0,55	0,34	0,36	0,40	0,22	0,74	0,53	0,63

k é a constante da taxa de secagem; a, b e n são coeficientes dos modelos.

Na Tabela 7 pode se verificar o resultado dos ajustes estatísticos dos modelos matemáticos, ou seja, os valores dos coeficientes dos modelos (a , b , n), a constante da taxa secagem (K), os coeficientes de determinação R^2 (ajustado) e o erro médio relativo (EMR) para cada experimento, de acordo com a matriz do delineamento experimental.

De acordo com Madamba, Driscoll e Buckle (1996), o coeficiente de determinação (R^2), não constitui, sozinho, um bom critério para a seleção de modelos não lineares, para isto, os valores do erro médio relativo (EMR) foram considerados na seleção dos modelos. Os valores do erro médio relativo (EMR) indicam o desvio dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo (KASHANI-NEJAD; MORTAZAVI; SAFEKORDI, 2007) e, segundo Mohapatra e Rao (2005), valores inferiores a 10,0% são recomendados para a seleção de modelos.

Deste modo, para realizar a análise de qual modelo matemático apresentou melhor ajuste se considerou a magnitude do valor do coeficiente de determinação R^2 (ajustado), que deve estar próximo de 1,00 (um), e da magnitude do valor do erro médio relativo (EMR).

Para os dezesseis experimentos realizados, de secagem de arroz em casca, verificou-se que todos os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais, apresentaram valores para os coeficientes de determinação R^2 (ajustado) superiores a 0,91 e valores do erro médio relativo (EMR) inferiores a 10,0%, ou seja, todos os modelos utilizados neste experimento podem descrever o comportamento cinético desse experimento de secagem, pois constituem uma representação satisfatória do fenômeno em estudo.

Sendo assim, o modelo cinético que mais se ajustou na descrição da secagem intermitente de arroz em casca foi o modelo de Midilli que resultou nos maiores valores do coeficiente R^2 (ajustado) e nos menores valores do erro médio relativo (EMR) na maioria dos experimentos. Entretanto, o modelo de Midilli apresenta quatro coeficientes diferentes, o que torna o ajuste mais fácil, porém a utilização do modelo deve levar em considerações mais parâmetros. De tal modo a superioridade do modelo de Midilli em relação aos demais testados pode ser explicada pelo maior número de parâmetros.

Neste sentido, observou-se que o modelo de Page, que apresenta apenas a constante da taxa de secagem “ k ” e o coeficiente do modelo “ n ”, apresentou um

ótimo ajuste aos dados experimentais e pode ser aplicado para descrever o comportamento da secagem intermitente de arroz em casca.

Para estes modelos, a constante da taxa de secagem “k” apresentou aumento nos seus valores em função da elevação da temperatura e da diminuição da relação de intermitência. Este mesmo comportamento de “k” foi observado por Lang et al. (2018) para secagem de arroz preto, utilizando o modelo de Page.

O coeficiente “n” possui um efeito de moderação do tempo e corrige os prováveis erros resultantes da negligência da resistência interna para a transferência de água (GUEDES; FARIA, 2000). Com relação ao coeficiente “n” dos modelos de Page, Newton, Henderson and Pabis e Midilli não se observou uma tendência definida dos seus valores em relação a temperatura o ar de secagem. Resultados semelhantes foram encontrados por Goneli et al. (2009), para a cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada fina. Normalmente, com a elevação da temperatura do ar de secagem, menor é o valor de “n”, uma vez que há maior diferença entre a pressão de vapor do ar e do grão, promovendo maior remoção de água. Comparando os valores do coeficiente “n”, observou-se que os valores foram maiores utilizando o modelo de Page do que os resultados de “n” no modelo de Midilli, na maior parte dos experimentos.

A Figura 10 apresenta o gráfico da curva de secagem juntamente com os modelos ajustados de Midilli e Page, aplicado aos experimentos 14 e 15, referentes às condições ideais de secagem, desse estudo, otimizadas em função da qualidade final do arroz (rendimento de inteiros e renda de benefício) e das respostas do processo industrial (temperatura máxima da massa dos grãos e tempo de secagem), respectivamente.

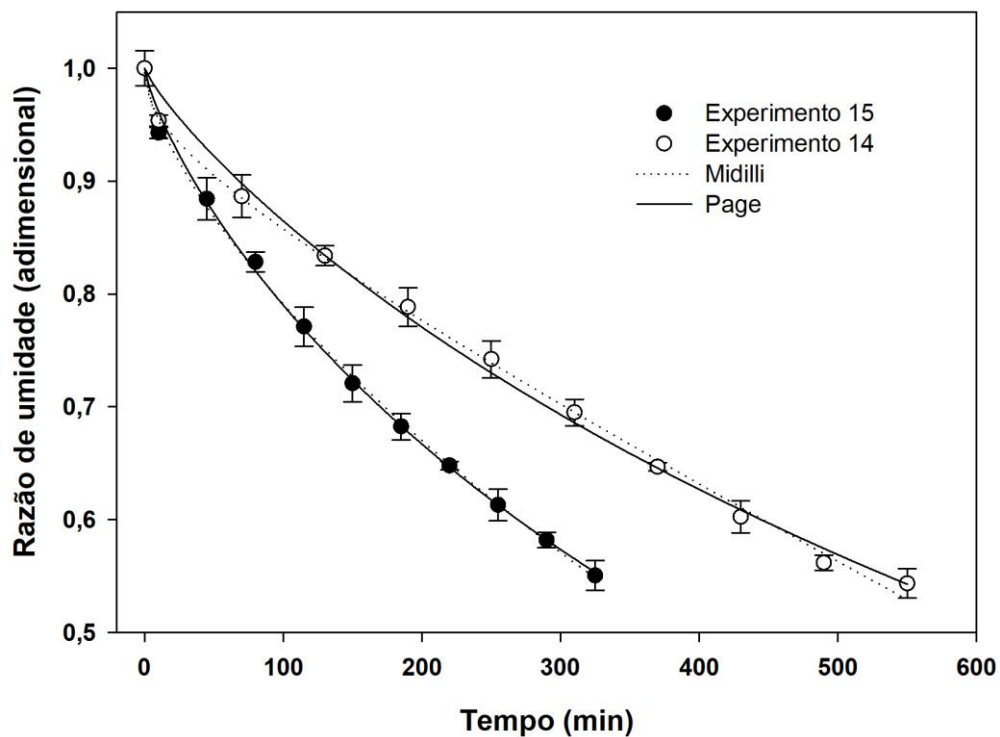


Figura 10 – Valores reais e estimados da razão de umidade pela estimativa dos parâmetros dos modelos de Midilli e Page dos experimentos 14 e 15 em relação ao tempo.

Observou-se na Figura 10 elevada correlação entre os valores experimentais e os estimados e um comportamento satisfatório da distribuição de resíduos gerados por essas equações, aproximando-se das distribuições normais esperadas. Assim, ambos os modelos representaram de forma adequada o comportamento de secagem intermitente de arroz.

5 Conclusões

A condição otimizada pelas superfícies de resposta para correlacionar os aspectos industriais da secagem intermitente com a qualidade dos grãos foi: temperatura do ar de 47,5 °C; tempo de exposição de 10 min e relação de intermitência de 1:2,5, que resultou em um rendimento de inteiros superior a 60%, tempo de secagem próximo de 300 min e a temperatura máxima da massa de grãos de 44 °C. A partir da análise estatística foram obtidos modelos polinomiais empíricos para prever, em função das variáveis de processo, quatro parâmetros da qualidade industrial dos grãos, ou seja, o rendimento de inteiros, a renda de benefício, a temperatura máxima da massa de grãos e o tempo de secagem. Em relação aos modelos cinéticos testados para secagem de grãos longos de arroz, verificou-se que o modelo cinético de Midilli foi o que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais. No entanto, o modelo semi-empírico de Page apresentou um ajuste adequado com um menor número de parâmetros, sendo também indicado para descrever a secagem com elevada precisão.

6 Referências

ABDUL-HAMID, A.; SULAIMAN, R. R. R.; OSMAN, A.; SAARI, N. Preliminary study of the chemical composition of rice milling fractions stabilized by microwave heating. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 20, p. 627–637, 2007.

AGRAWAL, Y.C.; SINGH, R.P. **Thin-layer drying studies on short-grain rice**. ASAE paper No. 77-3531, St. Joseph, MI, USA, 1977.

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

AMATO, G.W.; CARVALHO, J.L.V.; SILVEIRA, F.S. **Arroz parboilizado: tecnologia limpa, produto nobre**. Ricardo Lenz Editor, Porto Alegre, 2002.

AOSANI, E. **Efeitos da temperatura do ar de secagem e das condições de armazenamento sobre a conservabilidade de grãos de soja**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial), Universidade Federal de Pelotas 2007. 84f. Pelotas, 2007.

ASAE – American Society of Agricultural Engineering. **ASAE D245.5: moisture relationships of plant-based agricultural products**. 43rd edition, St. Joseph, MI, USA: ASAE, 1996.

BAO, J.; KONG, X.; XIE, J.; XU, L. Analysis of genotypic and environmental effects on rice starch. 1. Apparent amylose content, pasting viscosity, and gel texture. **Journal Agriculture and Food Chemistry**, v. 52, n. 19, p. 6010-6016, 2004.

BARBOSA, F. F.; ELIAS, M. C.; FAGUNDES, C. A. A.; PEREIRA, F. M.; RADÜNZ, L. L. Efeitos das secagens estacionária e intermitente e do tempo de armazenamento no desempenho industrial de grãos de arroz. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.30, n.1, p.83-90, 2005.

BOEMEKE, L.R.S. **Desempenho energético e qualidade de grãos nas secagens estacionária e intermitente de arroz**. 2000. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel", Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2000.

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

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450p.

BUGGENHOUT, J.; BRIJS, K.; VAN OEVELEN, J.; DELCOUR, J. Milling breakage susceptibility and mechanical properties of parboiled brown rice kernels. **LWT - Food Science and Technology**, v. 59, p. 369-375, 2014. Disponível em: <<https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-8fac6fd7-4328-3bed-8213-1278f4978a60>>. Acesso em: 18 set. 2018.

CARDOSO, M. B.; SAMIOS, D.; SILVEIRA, N. P. Study of protein detection and ultrastructure of brazilian rice starch during alkaline extraction. **Starch/Stärke**, v. 58, n. 7, p. 345-352, 2006.

CHAVES, T. F.; QUEIROZ, Z. F. DE; SOUSA, D. N. R. DE; GIRÃO, J. H. S. Uso da cinza da casca do arroz (CCA) obtida da geração de energia térmica como adsorvente de Zn (II) em soluções aquosas. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 1378-1383, 2009.

CHHINMAN, M.S. Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. *Transactions of the ASAE*, 27, 610–615, 1984.

CIHAN, A.; KAHVECI, K.; HACIHAFIZOGLU, O. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. **Journal of Food Engineering**, Article in press, 2006. Disponível em: <http://www.academia.edu/4746521/Modelling_of_intermittent_drying_of_thin_layer_rough_rice>. Acesso em: 28 set. 2018.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 6, 2019/2019, n. 5, quinto levantamento. Brasília: Conab, 2019. ISSN: 2318-6852

CORRÊA, P.C.; SILVA, F.S.; JAREN, C.; JÚNIOR, A.P.C.; ARANA, I. Physical and mechanical properties in rice processing. **Journal of Food Engineering**, n. 79, p. 137-142, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/222573633_Physical_and_mechanical_properties_in_rice_processing>. Acesso em: 15 set. 2018.

ELIAS, M. C. **Pós-colheita de arroz: secagem, armazenamento e qualidade**. v. 1, Pelotas: Editora e Gráfica Universitária UFPEL, 2007. 424 p.

ELIAS, M.C. **Tecnologias para armazenamento e conservação de grãos, em médias e pequenas escalas**. 3.ed. Pelotas: Editora Universitária da UFPEL, 2002. 218 p.

ELIAS, M.C.; OLIVEIRA, M.; VANIER, N.L. **Qualidade de arroz na pós-colheita e na agroindústria: análise, conservação e tipificação**. Pelotas: Editora e cópias Santa Cruz, 2015. 221p.

GENKAWA, T.; UCHINO, T.; INOUE, A.; TANAKA, F.; HAMANAKA, D. Development of a low-moisture-content storage system for brown rice: Storability at decreased moisture contents. **Biosystems Engineering**, v. 99, p. 515-522, 2008.

GOMES, A.S.; MAGALHÃES JUNIOR, A.M. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação. 2004. 899p.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, n. 11, p. 64-73, 2009.

GUEDES, A.M.M.; FARIA, L.J.G. Determinação da constante de secagem de urucum (*Bixa orellana L.*) em secador convectivo de leito fixo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.2, p.73-86, 2000.

GULARTE, M. A. **Manual de análise sensorial de alimentos**. Pelotas: Edigraf UFPEL, 2002. 59 p.

FAO – **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <<http://fao.org>>. Acesso em: 17 out. 2018.

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

KASHANINEJAD, M.; AHMADI, M.; DARAEI, A.; CHABRA, D. Handling and frictional characteristics of soybean as a function of moisture content and variety. **Powder Technology**, n. 188, p. 1-8, 2008. Disponível em: <<https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-e34ec7c4-3a58-317f-a9a5-49e183b76f20>>. Acesso em: 10 set. 2018.

KASHANI-NEJAD, M.A.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI A.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, p. 98-108, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000128&pid=S1516-0572201200030001400008&lng=pt>. Acesso em: 16 set. 2018.

KENNEDY, G.; BURLINGAME, B. Analysis of food composition data on rice from a plant genetic resources perspective. **Food Chemistry**, v. 80, n. A, p. 589-596, 2003.

KHURI, A.I.; CORNELL, J.A. **Response surfaces: designs and analyses**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1996.

KRISHNAN, S.; DAYANANDAN, P. Structural and histochemical studies on grain-filling in the caryopsis of rice (*Oryza sativa* L.), **Journal of Biosciences**, v. 28, p. 455-469, 2003.

LANG, G.H.; LINDEMANN, I.S.; FERREIRA, C.D.; POHNDORF, R.S.; VANIER, N.L.; OLIVEIRA, M. Influence of drying temperature on the structural and cooking quality properties of black rice. **Cereal Chemistry**. 2018, p. 1-11. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/cche.10060>>. Acesso em: 15 out. 2018.

LAMBERTS, L.; BIE, E. D.; VANDEPUTTE, G. E.; VERAVERBEKE, W. S.; DERYCKE, V.; WALTER DE MAN; W. D.; DELCOUR, J. A. Effect of milling on colour and nutritional properties of rice. **Food Chemistry**, v. 100, n. 4, p. 1496-1503, 2007.

MADAMBAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p.75-97, 1996. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0260877495000623>>. Acesso em: 12 set. 2018.

MARTINAZZO, R.; RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.563-570, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000100&pid=S0100-204X200800080001900010&lng=en>. Acesso em: 20 set. 2018.

MENEGHETTI, Volnei Luiz. **Parâmetros industriais e qualidade de consumo do arroz na secagem intermitente e no armazenamento**. 2008. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel", Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A New model for single-layer drying. **Journal Drying Technology**, v. 20, p.1503-1513, 2002. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/DRT-120005864>>. Acesso em: 10 out. 2018.

MILMAN, M.J. **Manejo da relação de intermitência e da temperatura do ar na secagem industrial do arroz**. 2001. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel", Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2001.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 513-18, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000165&pid=S1415-4366201300040000900024&lng=en>. Acesso em: 10 out. 2018.

MOHSENIN, N.N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. London: Gordon & Breach Science Publishers, 1980.

MONKS, J.L.F.; VANIER, N.L.; CASARIL, J.; BERTO, R.M.; OLIVEIRA, M.; GOMES, C.B.; CARVALHO, M.P.; DIAS, A.R.G.; ELIAS, M.C. Effects of milling on proximate composition, folic acid, fatty acids and technological properties of rice. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 30, p. 73-79, 2013. Disponível em: <https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Effects%20of%20milling%20on%20proximate%20composition,%20folic%20acid,%20fatty%20acids%20and%20technological%20properties%20of%20rice.&author=Monks%20J.L.F.>. Acesso em: 28 out. 2018.

O'CALLAGHAN, J.R.; MENZIES, D.J.; BAILEY, P.H. Digital simulation of agricultural dryer performance. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 16, n. 3, p. 223–244, 1971.

PFOUST, H.B.; MAURER, S.G.; CHUNG, D.S.; MILLIKEN, G. **Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains**. St. Joseph: ASAE, 1976. 11 p. (Paper, 76-3520).

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1, p. 17-28, 2008b.

RESENDE, O.; CORREA, P.C.; GONELLI, A.L.D.; RIBEIRO, D.M. Propriedades físicas de feijão durante a secagem: determinação e modelagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 225-230, 2008a.

SOSBAI, Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. Cachoeirinha: SOSBAI, 2018. 205p.

SACILIK, K.; ÖZTÜRK, R.; KESKIN, R. Some physical properties of hemp seed. **Biosystems Engineering**, n. 86, p. 191-198, 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/223515468_Some_Physical_Properties_of_Hemp_Seed>. Acesso em: 15 out. 2018.

SANTOS, G. L. et al. **Secagem e armazenagem de grãos**. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2007. Coleção Aprendendo a fazer melhor, 14. 70 p.

SHEI, H; CHEN, Y. Intermittent drying of rough rice. **Journal Drying Technology**, v.1, p. 839-851, 1998. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373939808917439>>. Acesso em: 15 set. 2018.

USTRA, L.A.R. **Secagem de grãos de arroz em leite fluidizado**. 2005. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2005.

VANIER, N.L.; PARAGINSKI, R.T.; BERRIOS, J.J.; OLIVEIRA, L.C.; ELIAS, M.C. Thiamine content and technological quality properties of parboiled rice treated with

sodium bisulfite: benefits and food safety risk. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 41, p. 98-103, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889157515000824>>. Acesso em: 21 out. 2018.

ZHOU, Z.; ROBARDS, K.; HELLIWELL, S.; BLANCHARD, C. Review: composition and functional properties of rice. **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v. 37, p. 849-868, 2002.

Apêndices

Apêndice A – Tabela com as propriedades físicas dos grãos de arroz

A Tabela 8 apresenta os resultados da caracterização dos grãos de arroz da amostra controle (13% de umidade) quanto as propriedades físicas.

Tabela 8 – Propriedades físicas dos grãos de arroz, com umidade de 13%, base úmida

Propriedades	Amostra controle
Comprimento (mm)	9,92 ± 0,57
Largura (mm)	3,15 ± 0,20
Espessura (mm)	2,15 ± 0,08
Diâmetro equivalente (mm)	4,06 ± 0,16
Esfericidade (adimensional)	0,41 ± 0,02
Área superficial (mm ²)	51,94 ± 4,12
Volume (mm ³)	35,29 ± 4,13
Porosidade (%)	51,13 ± 0,41
Peso volumétrico (kg.m ⁻³)	592,78 ± 4,98
Peso de 1000 Grãos (g)	15,10 ± 0,05
Ângulo de Talude (°)	33,77 ± 0,06
Peso específico real (kg.m ⁻³)	1213 ± 52,33