

**Avaliação do sistema operacional de uma unidade armazenadora de silos secadores e a
qualidade de grãos de arroz**

**Evaluation of the operating system of a storage unit for drying silos and the quality of
rice grains**

**Evaluación del sistema operativo de una unidad de almacenamiento para el secado de
silos y la calidad de los granos de arroz**

Recebido: 28/07/2020 | Revisado: 04/08/2020 | Aceito: 11/08/2020 | Publicado: 16/08/2020

Paulo Carteri Coradi

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9150-2169>

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

E-mail: paulocoradi@yahoo.com.br

Marcela Trojahn Nunes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9877-5714>

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

E-mail: marcelatrojahn@gmail.com

Arthur Pozzobon Dutra

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1957-7315>

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

E-mail: arthurpozzobon@gmail.com

Guilherme Abreu Coelho de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9796-0715>

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

E-mail: gcoelho.27@gmail.com

Letícia de Oliveira Carneiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8778-5239>

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

E-mail: tecnicaleticia@gmail.com

Jonatas Ibagé Steinhaus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5990-6649>

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

E-mail: jonatas.steinhaus@hotmail.com

Resumo

A garantia da padronização e qualidade dos grãos de arroz se devem às boas práticas de pós-colheita. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho operacional e a qualidade de grãos de arroz armazenados em silos secadores. O trabalho foi realizado numa unidade armazenadora composta por cinco silos secadores. Na primeira etapa, foram armazenados grãos de arroz em casca, com diferentes massas e alturas, analisando a movimentação de ar e a temperatura. Na sequência, avaliou-se a movimentação do ar no interior da massa de grãos para diferentes processos de peneiramento. Logo, realizou-se a coleta das amostras de arroz em onze diferentes pontos, para análise física dos grãos. Assim, as variações das alturas e a forma de processamento da massa de grãos influenciaram na pressão estática e no desempenho silos secador, reduzindo a capacidade de trabalho e interferindo na qualidade dos grãos. A eficiência da secagem dos grãos de arroz foi inversamente proporcional ao aumento da pressão estática, evidenciando secagem incompleta nas camadas superiores. A operação de peneiramento contribuiu na redução de impurezas e melhorou a distribuição da pressão estática das camadas de grãos, favorecendo a movimentação do ar. Os lotes de grãos de arroz não repeneirados apresentaram a formação de corredores de passagem de ar, prejudicando a secagem e a qualidade dos grãos. Concluiu-se, para que o sistema silo secador tenha eficiência operacional é fundamental homogeneizar os teores de água dos grãos, eliminar totalmente as impurezas e matérias estranhas através de rotinas de peneiramento.

Palavras-chave: Armazenamento; Operações de pré-processamento; Pós-colheita; Secagem.

Abstract

The guarantee of standardization and quality of rice grains is due to good post-harvest practices. Thus, the objective of the work was to evaluate the operational performance and the quality of rice grains stored in drying silos. The work was carried out in a storage unit made up of five drying silos. In the first stage, rice husks with different masses and heights were stored, analyzing air movement and temperature. Then, the movement of air within the grain mass was evaluated for different screening processes. Then, rice samples were collected at eleven different points for physical analysis of the grains. Thus, variations in heights and the way in which the grain mass is processed influenced the static pressure and the performance of dryer silos, reducing the work capacity and interfering with the quality of the grains. The drying efficiency of rice grains was inversely proportional to the increase in static pressure, showing incomplete drying in the upper layers. The screening operation contributed to the reduction of impurities and improved the distribution of the static pressure of the grain layers,

favoring the movement of the air. The lots of rice grains not re-sieved showed the formation of air passage corridors, impairing the drying and the quality of the grains. It was concluded, for the silo dryer system to have operational efficiency, it is essential to homogenize the water content of the grains, to totally eliminate impurities and foreign matter through sifting routines.

Keywords: Storage; Pre-processing operations; Post-harvest; Drying.

Resumen

La garantía de estandarización y calidad de los granos de arroz se debe a las buenas prácticas posteriores a la cosecha. Por lo tanto, el objetivo del trabajo fue evaluar el rendimiento operativo y la calidad de los granos de arroz almacenados en silos de secado. El trabajo se realizó en una unidad de almacenamiento compuesta por cinco silos de secado. En la primera etapa, se almacenaron cáscaras de arroz con diferentes masas y alturas, analizando el movimiento del aire y la temperatura. Luego, se evaluó el movimiento del aire dentro de la masa de grano para diferentes procesos de selección. Luego, se recolectaron muestras de arroz en once puntos diferentes para el análisis físico de los granos. Por lo tanto, las variaciones en las alturas y la forma en que se procesa la masa de grano influyeron en la presión estática y el rendimiento de los silos de secado, reduciendo la capacidad de trabajo e interfiriendo con la calidad de los granos. La eficiencia de secado de los granos de arroz fue inversamente proporcional al aumento de la presión estática, mostrando un secado incompleto en las capas superiores. La operación de cribado contribuyó a la reducción de impurezas y mejoró la distribución de la presión estática de las capas de grano, favoreciendo el movimiento del aire. Los lotes de granos de arroz que no se volvieron a tamizar mostraron la formación de corredores de paso de aire, perjudicando el secado y la calidad de los granos. Se concluyó que, para que el sistema de secador de silos tenga eficiencia operativa, es esencial homogeneizar el contenido de agua de los granos, para eliminar por completo las impurezas y la materia extraña mediante las rutinas de tamizado.

Palabras clave: Almacenamiento; Operaciones de preprocesamiento; Poscosecha; Secado.

1. Introdução

O arroz, dentro do grupo dos cereais, se destaca pelo cultivo a nível mundial, sendo fundamental na alimentação básica dos seres humanos (Sosbai, 2018). Com o passar dos anos, o aumento da produção ocorre constantemente, entretanto a produtividade e a qualidade do

grão ainda impõem alguns desafios (Embrapa, 2013). Com a produção estimada de 10,26 milhões de toneladas, o Brasil é um dos maiores produtores mundiais, sendo o estado Rio Grande do Sul responsável por 57% da produção nacional, caracterizando-se como o maior produtor de arroz do Brasil (IBGE, 2019).

A qualidade do arroz reflete na comercialização e está relacionada às etapas de pós-colheita que vão desde o recebimento, a secagem, a armazenagem até o beneficiamento do produto (Coradi et al., 2020a). A secagem tem como finalidade reduzir os teores de água dos grãos para as condições de armazenamento (Bragantini e Eifert, 2013). Esta etapa é realizada nos lotes de arroz por sistemas intermitentes ou estacionários. A secagem intermitente é definida pela passagem de ar quente na massa de grãos a alta temperatura, na sequência os grãos são submetidos a um período de descanso-intermitência para que a umidade interna dos grãos migre do centro para a periferia pela diferença de potencial, sem ação direta de calor, utilizando a própria temperatura adquirida pelos grãos quando passou pela câmara de secagem. Entretanto, esse sistema necessita de um alto investimento inicial e de operação, além das chances maiores de ocorrer danos mecânicos nos grãos (Franco e Petrini, 2006, Almeida et al., 2020, Coradi et al., 2020b).

Dessa maneira, a secagem estacionaria consiste na movimentação de ar aquecido pela massa de grãos, mantendo o produto estacionado no interior do silo secador. Caracterizando-se como uma secagem lenta, porém com custos operacionais reduzidos e com baixos níveis danos físicos e mecânicos causados aos grãos (Castro et al., 1999). Entretanto, uma das grandes desvantagens desse sistema é a baixa taxa de transferência de umidade, necessitando cuidados criteriosos para não ocasionar a migração de umidade na massa de grãos e aquecimento do produto ao longo do tempo de armazenamento, o que acelera o processo respiratório do arroz, levando a deteriorações físicas e físico-químicas (Elias et al., 2018).

Fatores como altura da coluna de grãos, vazão e fluxo de ar, temperatura e umidade relativa do ar de secagem e armazenamento, temperatura da massa de grãos, e tipo de processamento influenciam nas operações de secagem e armazenagem. Para que seja realizado um processo de secagem e armazenagem adequada em sistema silo secador, com eficiência operacional e qualidade de grãos necessita-se de um projeto dimensionado atendendo os fatores supramencionados.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho técnico operacional e a qualidade de grãos de arroz secos e armazenados em silos secadores, considerando fatores bióticos e abióticos do produto.

2. Metodologia

O trabalho foi realizado em uma unidade de secagem e armazenagem de arroz, composta por cinco silos metálicos de fundos perfurados, utilizados como silos secadores de aeração natural e com aquecimento complementar do ar a gás. Os silos secadores foram projetados para capacidade de 40.400 sacas de arroz cada, sem compactação, no corpo do silo, e 42.420 sacas de arroz cada, com 5% de compactação. A estrutura detém altura cilíndrica de 12,80 metros e altura total de 18,08 metros, diâmetro de 18,30 metros. A aeração de ar forçado foi projetada em fundo totalmente perfurado com dois ventiladores centrífugos, motor de 40,0 CV, vazão de $26.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e pressão estática de 284 mmca.

Todos os lotes de grãos de arroz recebidos na unidade armazenadora para destino aos silos secadores foram avaliados, quanto aos teores de água e matérias estranhas e impurezas. Esses resultados foram avaliados em gráfico de linha para identificação da variabilidade real dos lotes de arroz recebidos. Após o recebimento, os grãos eram peneirados em máquina de pré-limpeza e armazenados em silos secadores para secagem e posterior armazenagem.

A movimentação de ar na coluna de grãos armazenada foi avaliada considerando as quantidades e alturas plenas de grãos de arroz em função do processamento e da posição (Tabela 1).

Tabela 1 – Quantidades de grãos de arroz armazenados nos silos secadores, processos aplicados e posição de medições e amostragens.

Quantidades	Silos Secadores				
	Silo 1	Silo 2	Silo 3	Silo 4	Silo 5
Massa de grãos (sacas de 50 kg)	0	24.908	28.660	37.019	17.310
Altura de coluna de grãos (m)	0	7,90	9,10	11,70	5,50
Processos aplicados nos lotes de grãos	SP	RP	EPR	NR	PR
Posição de medição e amostragem	6 P / 5 BD	6 P / 5 BD	6 P / 5 BD	6 P / 5 BD	6 P / 5 BD

SP – sem processo, RP – repeneirado, EPR – em processo de repeneiramento, NR – não repeneirado, PR – parcialmente repeneirado, P – pêndulo superior de termometria, BD – boca de descarga inferior.
Fonte: Autores.

A velocidade do ar foi medida na entrada do exaustor, na saída do exaustor e na parte superior da massa de grãos, nos cabos de termometria (pêndulos) com auxílio de um termoanemômetro de pás. Para cada ponto foi repetida três medições e o valor médio foi utilizado como resultado. Com os resultados da velocidade do ar, calcularam-se as vazões e os

fluxos de ar em diferentes pontos do sistema: na entrada do exaustor, na saída do exaustor, acima da coluna de grãos (nos diferentes cabos de termometria), utilizando as equações apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Equações para o dimensionamento do sistema de aeração do silo secador.

Variável	Equação	Unidade de medida
Área de entrada	$A_e = \pi \times r_e^2$	m ²
Velocidade do ar de entrada	$V_e = d_e \times \Delta t$	m s ⁻¹
Vazão de ar de entrada	$Q_e = V_e \times A_e \times 3600$	m ³ h ⁻¹
Fluxo de ar de entrada	$F_e = \frac{Q_e/60}{A_e}$	m ³ min ⁻¹ m ⁻²
Área de saída do exaustor	$A_s = \pi \times r_s^2$	m ²
Velocidade de saída do exaustor	$V_s = d_s \times \Delta t$	m s ⁻¹
Vazão de saída do exaustor	$Q_s = V_s \times A_s \times 3600$	m ³ h ⁻¹
Fluxo de saída do exaustor	$F_s = \frac{Q_s/60}{A_s}$	m ³ min ⁻¹ m ⁻²
Área da base do silo	$A_b = \pi \times r_b^2$	m ²
Vazão de ar no plenum	$Q_p = A_b \times F_p \times 60$	m ³ h ⁻¹
Fluxo de ar no plenum	$F_p = \frac{Q_p}{\Delta t \times A_b}$	m ³ min ⁻¹ m ⁻²
Vazão de ar específico	$Q_{esp} = A_{esp} \times F_{esp} \times 60$	m ³ h ⁻¹
Pressão estática dos grãos	$P = \gamma \times h$	mmca

re: raio de entrada do exaustor (m); de: deslocamento do ar (m); Δt: variação de tempo (s); rs: raio de saída do exaustor (m); γ: massa específica dos grãos (mca); rb: raio da base do silo (m); Aesp: área específica do sensor (m²); Fesp: fluxo de ar específico (m³ min⁻¹ m⁻²); h: altura da massa de grãos armazenados (m). Fonte: autores.

Na sequência, foi realizada a coleta das amostras de arroz em casca, próximo aos cabos de termometria, nos pontos superiores da massa de grãos e nas bocas de descarga que ficam localizadas na parte inferior do silo secador, a fim de verificar os teores de água, massa específica aparente, rendimento de grãos inteiros e quebrados. Para cada ponto foram coletadas três amostras e os valores médios foram utilizados como resultados. Os teores de água dos grãos de arroz em casca foram medidos com um equipamento de medição indireta por capacitância elétrica, marca EAGRI, modelo AL-201. As massas específicas aparentes dos grãos foram determinadas com auxílio de um Becker de 150 mL e uma balança de

precisão, pela relação massa/volume, com quatro repetições (Brasil, 2009).

O beneficiamento dos grãos foi realizado em um provador de arroz, marca Zaccaria, modelo PAZ-1/DTA. Foram pesados 100 gramas de grãos em casca, colocados gradativamente na moega “cone” de entrada de alimentação do equipamento, submetidos a um tempo de 75 segundos de operação do equipamento beneficiador para obtenção do arroz polido, sendo que, nos primeiros 15 segundos realizaram-se o processo de descasque e os 60 segundos restantes, realizou-se o brunimento, responsável em realizar o polimento dos grãos. No registro de descarga do brunidor foram retirados os grãos polidos (quebrados e inteiros) e os farelos, enquanto que a casca foi retirada por um conjunto de ventilação e ciclone de ar.

Para a classificação dos grãos inteiros (polidos e integrais) utilizou-se um cilindro separador por alvéolos de 5,5 mm, a qual foi submetida à movimentação durante um tempo de 60 segundos em um eixo, sobre uma moega de descarga horizontal com inclinação de -2 graus. O cilindro separador ao girar com as amostras de grãos teve a função de deslocar por gravidade os grãos quebrados para a moega horizontal, enquanto que, os grãos inteiros permaneceram retidos nos alvéolos do cilindro, para posterior descarregamento. As amostras beneficiadas foram pesadas em uma balança de precisão marca Marte, modelo AD330.

3. Resultados e Discussão

Na Tabela 3 estão os resultados calculados para movimentação do ar na massa de grãos armazenada, conforme as características de projeto dos silos secadores e as condições do produto armazenado.

Tabela 3 – Resultados médios de velocidades, vazões e fluxos de ar nos silos secadores.

Silo Secador	E	A _e	V _e	Q _e	F _e	A _s	V _s	Q _s	F _s	A _b	F _p	Q _p
1	1	0,52	4,30	8.049	257,88	0,42	1,58	2.376	94,28	262,88	0,35	5.520
	2	0,52	5,25	9.828	315,00	0,42	1,58	2.376	94,28	262,88	0,35	5.520
2	1	0,52	4,00	7.488	240,00	0,42	1,72	2.592	102,85	262,88	0,39	6.151
	2	0,52	4,69	8.779	281,37	0,42	1,72	2.592	102,85	262,88	0,39	6.151
3	1	0,52	4,16	7.787	249,58	0,42	1,68	2.520	100,00	262,88	0,38	5.993
	2	0,52	4,75	8.892	285,00	0,42	1,68	2.520	100,00	262,88	0,38	5.993
4	1	0,52	4,11	7.693	246,57	0,42	1,68	2.520	100,00	262,88	0,38	5.993
	2	0,52	4,47	8.367	268,17	0,42	1,68	2.520	100,00	262,88	0,38	5.993
5	1	0,52	5,25	9.828	315,00	0,42	1,69	2.556	101,43	262,88	0,39	6.151

E – Exaustor; A_e – área de entrada (m^2); V_e – velocidade do ar de entrada ($m\ s^{-1}$); Q_e – vazões de ar de entrada ($m^3\ h^{-1}$); F_e – fluxo de ar de entrada ($m^3\ min^{-1}\ m^{-2}$); A_s – área de saída do exaustor (m^2); V_s – velocidade de saída do ar ($m\ s^{-1}$); Q_s – vazões de ar de saída ($m^3\ h^{-1}$); F_s – fluxo de ar de saída ($m^3\ min^{-1}\ m^{-2}$); A_b – área da base do silo (m^2); F_p – fluxo de ar no plenum ($m^3\ min^{-1}\ m^{-2}$); Q_p – vazões de ar no plenum ($m^3\ h^{-1}$). Fonte: Autores.

Na avaliação das velocidades, vazões e fluxos do ar, temperatura e umidade relativa do ar em diferentes pontos da massa de grãos, notou-se que os silos secadores com maiores porcentagens de impurezas na massa de grãos (Tabela 4) houve redução na pressão estática, possibilitando maior saída do ar em alguns pontos específicos, interferindo na distribuição do ar e na secagem. O arroz foi submetido ao processo de secagem, mantendo-se com teores de água em equilíbrio higroscópico.

Tabela 4 – Resultados médios de velocidades, vazões e fluxos do ar antes e após exaustores e acima da coluna de grãos armazenados.

Silo	Variáveis	E	S - SA	S - CA	Cabos de termometria					
					Cabo 1	Cabo 2	Cabo 3	Cabo 4	Cabo 5	Cabo 6
1	V ($m\ s^{-1}$)	29,17	28,05	29,72	-	-	-	-	-	-
	Q ($m^3\ s^{-1}$)	15,17	14,59	15,45	-	-	-	-	-	-
	F ($m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	T ($^{\circ}C$)	22,8	20,5	18,8	-	-	-	-	-	-
	UR (%)	-	44,00	-	-	-	-	-	-	-
2	V ($m\ s^{-1}$)	22,20	15,4	15,4	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,00
	Q ($m^3\ s^{-1}$)	11,57	6,47	6,47	0,00	0,001	0,00	0,001	0,001	0,00
	F ($m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$)	0,33	0,18	0,18	0,00	0,00002	0,00	0,00002	0,00002	0,00
	T ($^{\circ}C$)	25,00	22,3	19,3	34,00	34,00	32,50	26,50	30,00	32,50
	UR (%)	-	45,0	-	-	-	-	-	-	-
3	V ($m\ s^{-1}$)	20,60	12,22	12,22	0,00	0,01	0,0	0,00	0,00	0,00
	Q ($m^3\ s^{-1}$)	10,74	6,35	6,35	0,00	0,0007	0,0	0,00	0,00	0,00
	F ($m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$)	0,45	0,26	0,26	0,00	0,00002	0,0	0,00	0,00	0,00
	T ($^{\circ}C$)	25,00	27,4	22,3	31,5	30,90	29,6	27,60	30,00	29,60
	UR (%)	-	60,0	-	-	-	-	-	-	-
4	V ($m\ s^{-1}$)	21,20	16,20	16,20	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
	Q ($m^3\ s^{-1}$)	11,02	8,42	8,42	0,002	0,0002	0,00	0,00	0,0002	0,0002
	F ($m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$)	0,36	0,27	0,27	0,00007	0,00002	0,00	0,00	0,00002	0,00002
	T ($^{\circ}C$)	25,00	22,30	19,30	27,80	29,30	28,20	29,30	29,30	32,50
	UR (%)	-	45,00	-	-	-	-	-	-	-
5	V ($m\ s^{-1}$)	23,40	15,5	15,1	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00

Q (m ³ s ⁻¹)	12,17	8,06	8,06	0,00	0,00	0,002	0,00	0,00	0,00
F (m ³ min ⁻¹ t ⁻¹)	0,81	0,54	0,54	0,00	0,00	0,0001	0,00	0,00	0,00
T (°C)	23,50	21,8	19,3	21,40	23,00	22,80	23,4	22,0	26,50
UR (%)	-	45,0	-	-	-	-	-	-	-

V: velocidade do ar; Q: vazão de ar; F: fluxo de ar; T: temperatura do ar; UR: umidade relativa do ar; E: entrada do ar no exaustor; S: saída do ar do exaustor; AS: sem aquecimento do ar; CA: com aquecimento do ar. Fonte: Autores.

Segundo Moraes e Rodrigues (2006), o baixo rendimento de secagem influencia no aumento do consumo de energia. Franco et al. (2013) afirma que para a ocorrência de uma secagem correta em silo secador, necessita-se que a massa de grãos esteja com valores percentuais de impurezas próximos a zero. A partir de estudos realizados, Rocha (2020) explica que mudanças na resistência do fluxo de ar em determinadas pontos da massa de grãos armazenada pode reduzir a eficiência da operação. O aquecimento do ar na saída dos exaustores não alterou a eficiência de secagem. Hoeltz (2005) afirma que o aquecimento do ar contribui com a eficiência de secagem, desde que o volume e a distribuição do ar no interior do silo secador sejam adequados, caso contrário o aquecimento do ar de secagem não terá efeito significativo no processo. Nos resultados obtidos, percebeu-se uma redução significativa do ar de entrada e saída do exaustor, chegando a 45%, sendo que nos pontos superiores da massa de grãos praticamente não houve fluxo de ar, indicando baixa capacidade de secagem na massa de grãos. Turner et al. (2016) informa que a sobrecarga do material, também chamada de compactação da massa de grãos, precisa ser levada em consideração, por ter influência direta no aumento da pressão estática ao longo do tempo de armazenamento. De acordo com os resultados obtidos na Tabela 5, observou-se uma redução de vazão do ar e da vazão específica do ar conforme é realizado o enchimento do silo, enquanto que a pressão estática é aumentada. A Figura 1 mostra graficamente os valores de vazão de ar e pressão estática, no período de enchimento do silo.

Tabela 5 – Valores calculados da simulação plena do sistema silos secadores.

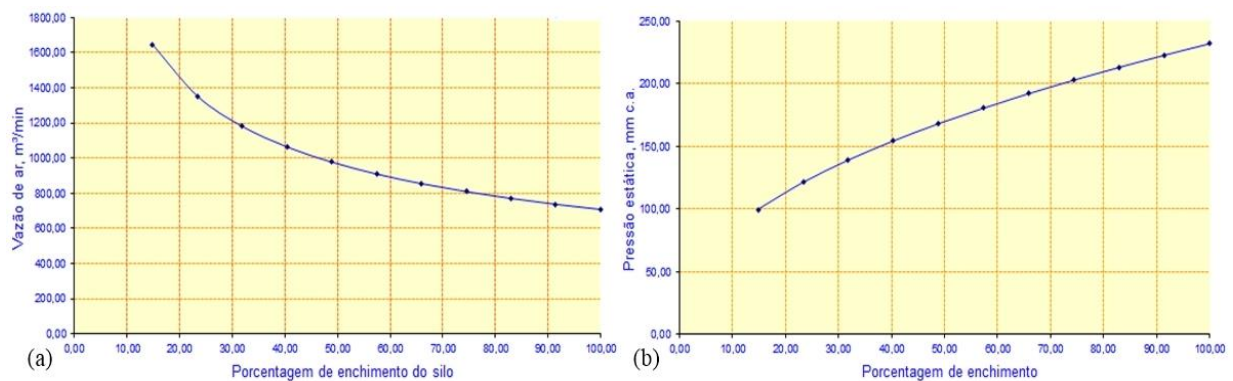
Porcentagem de enchimento do silo	Altura média da camada de grãos (m)	Vazão de ar (m ³ min ⁻¹)	Vazão específica de ar (m ³ min ⁻¹ t ⁻¹)	Pressão estática (mmca)
14,82	2,22	1646,70	4,71	99,76
23,33	3,49	1353,30	2,46	121,39
31,85	4,76	1181,19	1,57	139,08
40,37	6,04	1064,01	1,12	154,40
48,89	7,31	977,36	0,85	168,08

57,41	8,59	909,78	0,67	180,57
65,93	9,86	855,10	0,55	192,12
74,44	11,13	809,61	0,46	202,91
82,96	12,41	770,98	0,39	213,08
91,48	13,68	737,61	0,34	222,72
100,00	14,96	708,40	0,30	231,90

Fonte: Autores.

O fluxo e a vazão de ar por unidade de área estão dentro dos limites afirmados por Sosbai (2018), onde o recomendado deve ser entre 1,5 e 4,5 m³ min⁻¹ m⁻², garantindo a movimentação adequada do ar na massa de grãos. Entretanto, a vazão específica está muito abaixo do recomendado, o que pode acarretar o umedecimento dos grãos, assim potencializando o desenvolvimento de microrganismos (fungos e bactérias).

Figura 1 – Relação entre a vazão de ar do exaustor e o percentual de enchimento do silo (a); e relação entre a pressão estática e o percentual de enchimento do silo (b).



Fonte: Autores.

Conforme o estudo realizado por Silva et al. (2008) para secar grãos de arroz armazenados a 20% de teor de água, com ar não aquecido, necessita-se de um fluxo com pelo menos 1,5 m³ min⁻¹ t⁻¹, enquanto que os valores obtidos foram abaixo de 0,3 m³ min⁻¹ t⁻¹ quando o silo esteve 100% cheio de grãos. A partir dos resultados obtidos, a secagem poderia ocorrer com 31,85% da capacidade de carregamento para que o fluxo de ar flua corretamente nas camadas de grãos. Os resultados de vazões e fluxos de ar influenciaram no aumento da temperatura da massa de grãos (Tabela 6).

Tabela 6 – Resultados de temperatura média da massa de grãos de arroz armazenados.

Silo	Pêndulo/Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	29	28	26	22	22	22	22	22
	2	29	28	23	21	22	22	22	23
	3	30	29	23	21	23	23	23	23
	4	29	27	21	21	22	22	23	24
	5	29	28	24	20	21	22	22	23
	6	30	25	23	23	22	23	23	23
3	1	29	27	27	22	21	22	22	23
	2	27	27	21	20	20	21	22	23
	3	27	26	26	24	20	21	22	24
	4	32	30	30	27	23	24	24	25
	5	29	28	28	23	21	22	22	23
	6	21	22	21	22	21	21	22	22
4	1	29	27	22	21	20	21	22	22
	2	29	28	24	22	21	21	22	24
	3	29	28	21	20	20	20	22	23
	4	29	27	22	21	21	19	22	23
	5	29	27	22	21	21	20	22	22
	6	28	24	21	20	19	20	22	22
5	1	24	22	22	22	22	22	23	23
	2	24	22	23	23	23	23	23	24
	3	23	22	19	23	23	23	23	23
	4	28	22	22	20	23	23	23	24
	5	23	22	21	22	21	21	22	23
	6	23	21	22	21	23	22	22	22

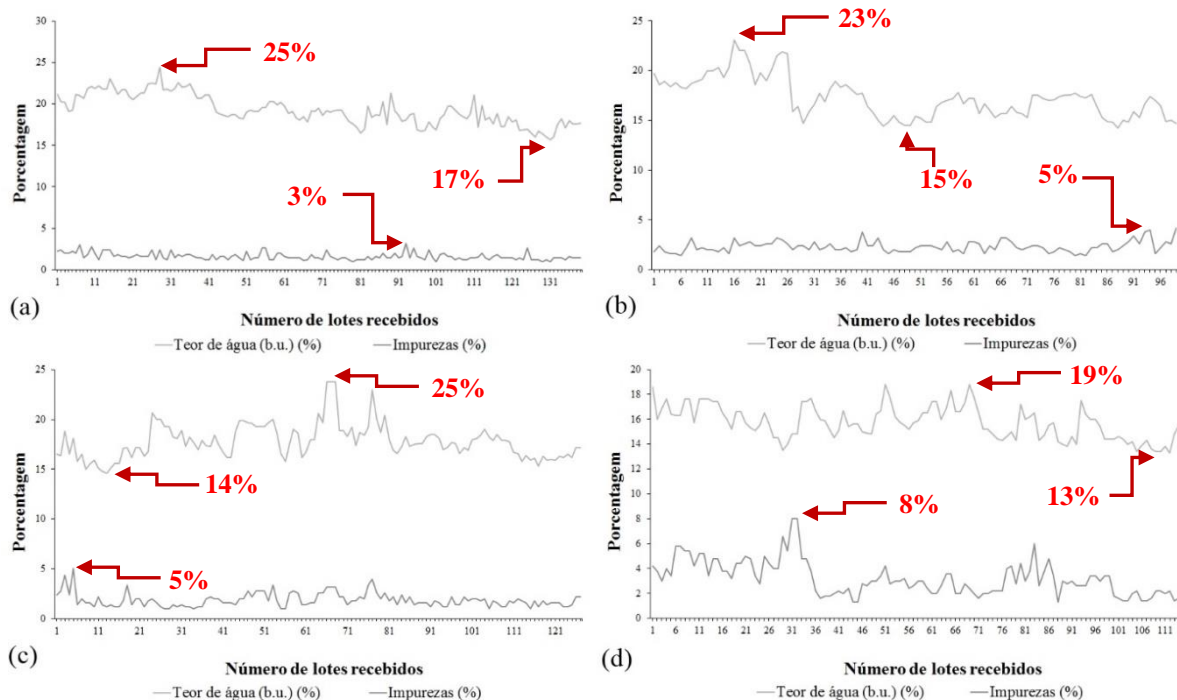
Fonte: Autores.

Para Sosbai (2018), nesse caso, seria necessário o aumento da vazão específica do ar no sistema, o implemento de ventiladores mais potentes ou promover o redimensionamento da largura dos rotores. Segundo Rocha (2020), a seleção dos equipamentos de secagem e aeração são princípios básicos para a movimentação de ar com boa distribuição na massa de

grãos. Na Figura 2 estão os resultados médios de teores de água e impurezas dos lotes de grãos de arroz recebidos e armazenados nos silos secadores 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

Verificou-se que o processo de repeneiramento feito no silo secador 2 (Figura 2a) contribuiu com menores índices de impurezas nos lotes e homogeneidade dos lotes quanto aos teores de água. A homogeneização dos lotes colaborou para uma secagem mais eficiente, garantindo a qualidade dos grãos durante o processo. Nos demais silos secadores a ocorrência de maior variação de impurezas e teores de água dos lotes recebidos reduziu a eficiência e uniformidade da secagem, provocando uma amplitude da temperatura da massa de grãos armazenada em até 10°C entre os lotes, contribuindo para a redução da qualidade dos grãos armazenados (Tabela 6). Embora Rocha (2020) justifica que as variações nos teores de água nos grãos armazenados não interferem na secagem, desde que estejam dentro dos limites aceitáveis (abaixo de 20%).

Figura 2 – Resultados médios do percentual de teores de água e impurezas dos lotes repeneirados e submetidos à secagem e armazenagem, em (a) silo secador 2; (b) silo secador 3; (c); silo secador 4; e (d) silo secador 5.

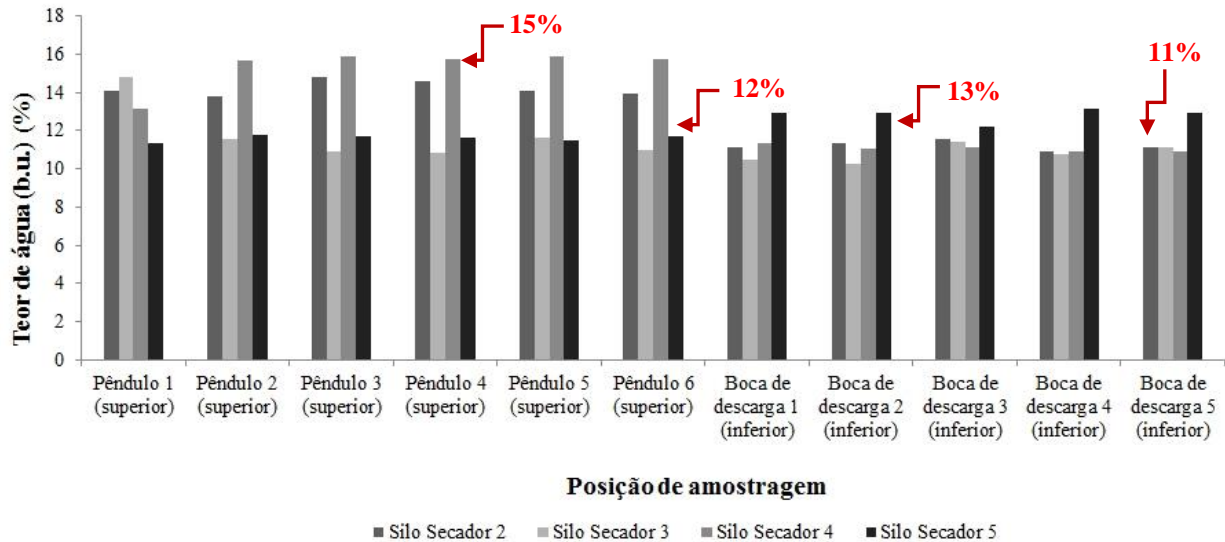


Fonte: Autores.

Nas Figuras 3, 4, 5 e 6, estão os resultados das análises de teores de água, massa específica aparente, rendimento de grãos inteiros e grãos quebrados das amostras coletadas na parte superior dos silos, nas direções dos pêndulos de termometria e na parte inferior dos

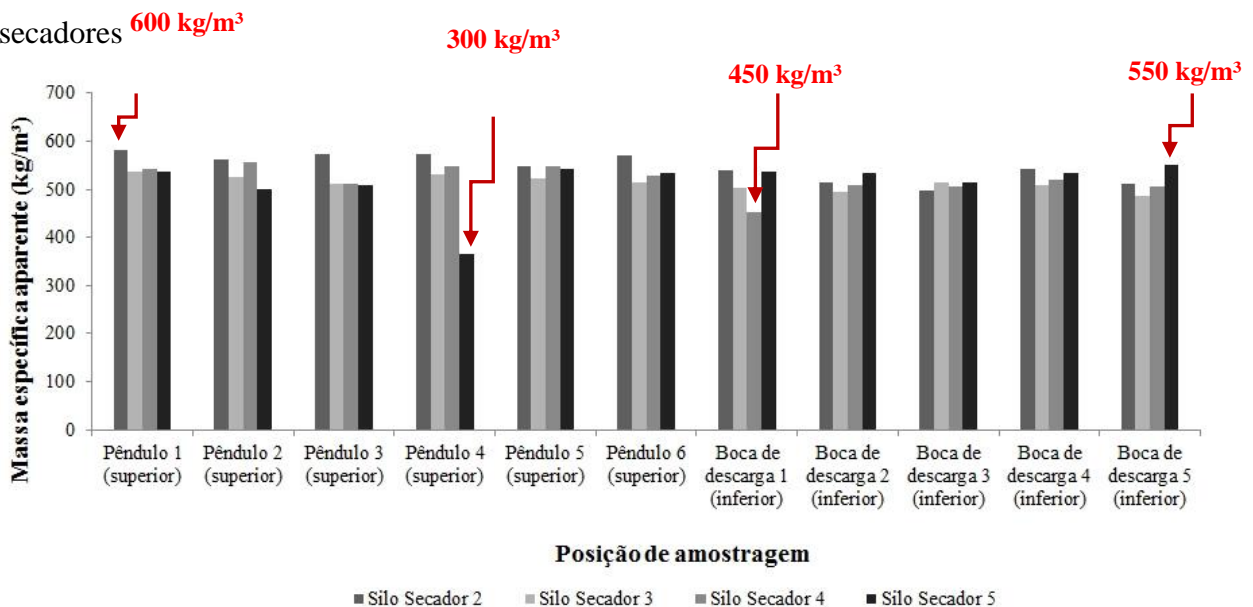
silos, na direção das bocas de descarga dos grãos.

Figura 3 – Resultados médios dos teores de água dos grãos de arroz em casca amostrados nos cabos de termometria superiores e nas bocas de descargas inferiores dos silos secadores.



Fonte: Autores.

Figura 4 – Resultados médios da massa específica aparente dos grãos de arroz em casca amostrados nos cabos de termometria superiores e nas bocas de descargas inferiores dos silos secadores



Fonte: Autores.

Observa-se na Figura 3 que os teores de água dos grãos variaram conforme a posição de amostragem. Sendo que, nas proximidades das bocas de descarga houve secagem dos

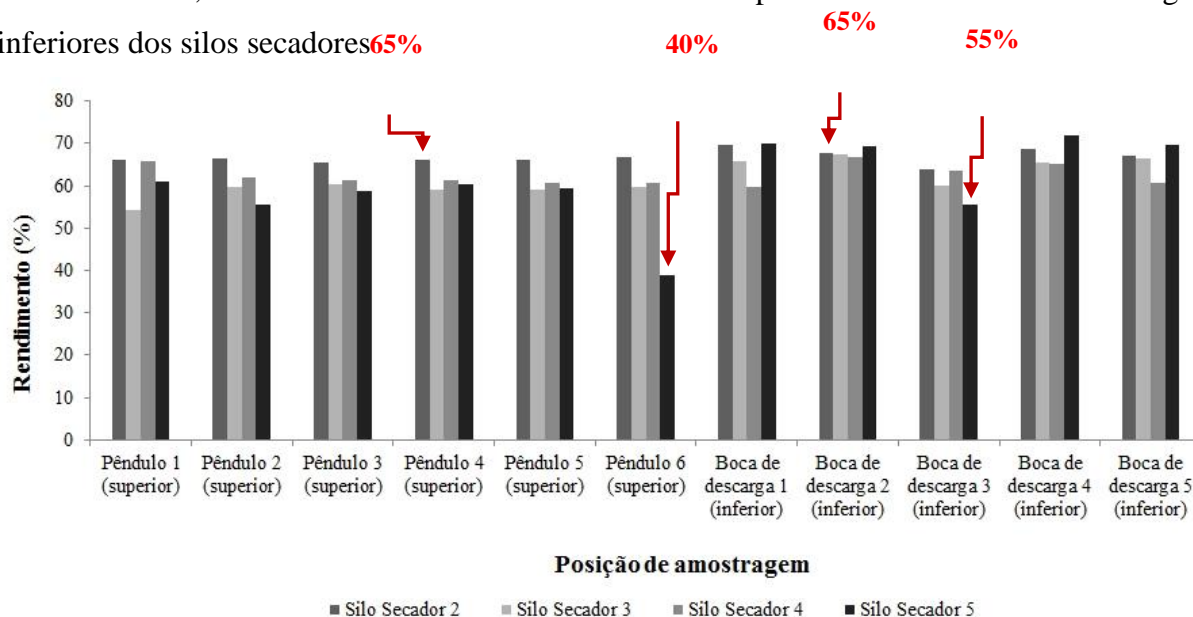
grãos até alcançarem a umidade de equilíbrio higroscópica de 12% (b.u.). Enquanto que, nas camadas superiores os grãos permaneceram com teores de água elevados, chegando até 16% (b.u.), em virtude do baixo fluxo de ar. Os silos secadores 3 e 5 apresentaram os melhores resultados, decorrente da altura de camadas de grãos serem mais baixas, conseqüentemente tiveram uma menor pressão estática e maior movimentação do ar intergranular. O silo secador 4 teve a maior diferença dos teores de água, entre as camadas inferiores e superiores, em função de apresentar a maior altura de camada de grãos e o não repeedimento.

A massa específica aparente dos grãos variou de 500 a 550 kg m³, como apresentado na Figura 4. O aumento da massa específica é decorrente do repeedimento dos grãos, reduzindo os índices de impurezas. Outro fator que influenciou nos resultados das amostras da posição de descarga e das amostras próximas dos pêndulos de termometria foram os teores de água. As camadas superiores de grãos de arroz em casca obtiveram teores de água mais elevados e maiores massas específicas, decorrentes da baixa eficiência do processo de secagem influenciadas pelas impurezas. Lukaszuk et al. (2008) complementa que a altura da camada de grãos influencia na massa específica dos grãos, onde nas alturas de 0, 0,95 e 1,9 metros obtiveram-se massas específicas aparentes de 773, 790 e 810 kg m⁻³, respectivamente.

Rocha (2020), com base no trabalho de Thompson et al. (1987), afirma que o teor de água interfere na massa específica dos grãos, sendo maior nos grãos úmidos para o arroz em casca. De acordo com as amostras coletadas nos pêndulos, o silo secador 2 revelou as maiores massas específicas por ter realizado o processo de repeedimento, reduzindo os percentuais de impurezas. Nas bocas de descarga os resultados foram similares aos pêndulos por serem as primeiras camadas de alcance do ar de secagem, diferente das camadas superiores onde o teor de água interferiu na massa específica dos grãos.

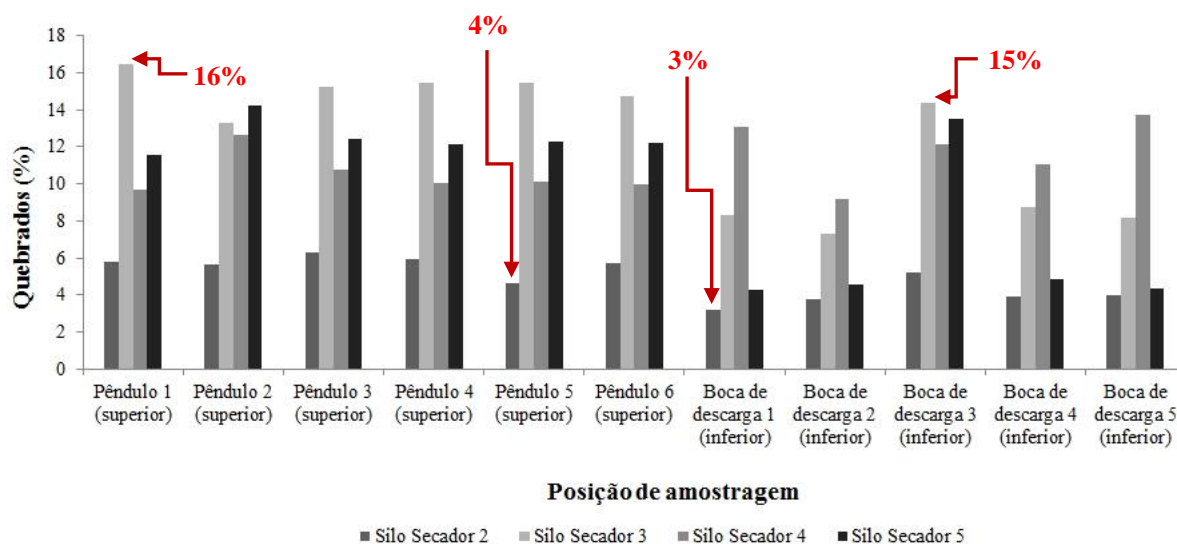
O arroz beneficiado apresentou bom rendimento de grãos inteiros, nos grãos com teores de água de 12% (b.u.), variando de 55% a 70%, apresentado na Figura 5. Castro et al. (1999), obtiveram valores médios de 58% no rendimento de grãos inteiros e polidos, estando dentro dos parâmetros estabelecidos para comercialização. Mingotte et al. (2012) realizaram estudos do rendimento de várias cultivares e obtendo valores de rendimento de grãos inteiros próximos a 65%. Nos pêndulos, o silo secador 4 obteve o melhor resultado, enquanto nas bocas de descarga, os silos secadores 2 e 5 alcançaram os melhores resultados. Essa variação ocorreu em função da variação das correntes de ar intergranular de secagem, ocasionando uma secagem ineficiente. Navarro et al. (2002), discutiu que o desempenho da secagem aumentou com a uniformidade do fluxo de ar por todo o silo secador, garantindo a homogeneidade das amostras.

Figura 5 – Resultados médios do rendimento dos grãos de arroz em casca após beneficiamento, amostrados nos cabos de termometria superiores e nas bocas de descargas inferiores dos silos secadores 65% 40% 65% 55%



Fonte: Autores.

Figura 6 – Resultados de grãos quebrados de arroz após beneficiamento, amostrados nos cabos de termometria superiores e nas bocas de descargas inferiores dos silos secadores



Fonte: Autores.

Na Figura 6 caracterizaram-se os percentuais de grãos quebrados, as quais foram maiores nos pontos superiores da massa de grãos onde os teores de água foram mais elevados. Mingotti et al. (2012) observou valores elevados de grãos quebrados em lotes de grãos com secagem incompleta, segundo o autor, o alto teor de água dos grãos contribuiu com o aumento

dos índices de quebrados. Nos pêndulos, o silo secador 3 teve o maior percentual de quebrados, já nas bocas de descarga o silo secador 4 apresentou os maiores resultados.

4. Considerações Finais

O desempenho técnico-operacional do conjunto de silos secadores não foi satisfatório, apresentando baixa eficiência de secagem e manutenção da qualidade dos grãos armazenados.

A eficiência da secagem dos grãos de arroz foi inversamente proporcional ao aumento da pressão estática, com aumento da altura da massa de grãos de arroz, causando secagem incompleta nas camadas superiores.

As operações de peneiramento da massa de grãos de arroz contribuíram na redução de impurezas e uma melhor distribuição da pressão estática das camadas de grãos favorecendo uma movimentação mais homogênea do ar de secagem intergranular e a qualidade dos grãos.

Os lotes de grãos de arroz não repeneirados e armazenados nos silos secadores tiveram a formação de corredores de passagem de ar em locais específicos da massa de grãos, prejudicando a secagem e a qualidade dos grãos.

Para que o sistema silo secador tenha eficiência operacional de secagem e aeração de armazenamento é fundamental o carregamento dos silos com lotes de grãos homogêneos em teores de água e próximos a zero por cento de impurezas e matérias estranhas, através da manutenção de uma rotina de peneiramento.

Agradecimentos

Agradecimento a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Laboratório de Pós-Coheita (LAPOS) pelo apoio nas análises de qualidade realizadas no trabalho. Agradecemos ao CNPq, CAPES e FAPERGS pelos apoios financeiros e bolsas. Agradecimento aos produtores rurais de arroz pelo apoio e suporte estrutural para a realização das avaliações técnicas do trabalho.

Referências

Almeida, R. L. J., Santos, N. C., dos Santos Pereira, T., de Alcântara Silva, V. M., Silva, L. N., Santiago, Â. M., & de Queiroga, A. P. R. (2020). Morphological analysis in rice flakes. *Research, Society and Development*, 9(2), 11921978.

Bragantini, C., & Eifert, E. C. (2013). *Secagem e Beneficiamento*. Brasília: Embrapa Arroz e Feijão.

Brasil. (2009). *Regras para análise de sementes*. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Coradi, P. C., Oliveira, M. B., Carneiro, L. O., Souza, G. A. C., Cardoso, M. E., Brackmann, A., & Teodoro, P. E. (2020a). Technological and sustainable strategies for reducing losses and maintaining the quality of soybean grains in real production scale storage units. *Journal of Stored Products Research*, 87, 101624.

Coradi, P. C., Müller, A., Souza, G. A. C., & Steinhaus, J. I. (2020b). Wagner, R. Quality of soybean cultivars in the drying and storage processes in real scale and experimental. *Journal of Food Process Engineering*, 43, e13418, 2020.

Castro, E. da M. de, Viera, N. R. A., Rabelo, R. R., & da Silva, S. A. (1999) *Qualidade de grãos em arroz - Circular técnica 34*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão.

Elias, M. C., De Oliveira, M., & Vainer, N. L. (2018). *Tecnologias de pré-armazenamento, armazenamento e conservação de grãos*. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas.

Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2013) *Arroz: o produtor pergunta, a Embrapa responde*. Brasília: Embrapa Arroz e Feijão.

Franco, D. F., & Petrini, J. A. (2006). *Secagem do arroz - Comunicado Técnico*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado.

Franco, D. F., De Magalhães Júnior, A. M., Costa, C. J., & Da Silva M. G. (2013). *Colheita, Secagem, Beneficiamento e Tratamento de Sementes de Arroz Irrigado*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado.

Hoeltz, M. (2005). *Estudo da influência de manejos pós-colheita na incidência de fungos e micotoxinas no arroz (Oryza sativa L.)*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Levantamento Sistemático da Produção Agrícola*. Acesso em 02 abr. 2020, <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/lspa/tabelas>.

Lukaszuk, P., Molenda, M., Horabik, J., Szot, B., & Montross, M. D. (2008) Airflow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 54(2), 50-57.

Mingotte, F. L. C., Hanashiro, R. K., & Filho, D. F. (2012) Características físico-químicas do grão de cultivares de arroz em função da adubação nitrogenada. *Semina: Ciências Agrárias*, 33(1), 2605-2618.

Moraes, S. O., & Rodrigues, V. C. (2006). *Secagem de alimentos*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”.

Navarro, S., & Noyes, R. (2002). *The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management*. Boca Raton: CRC Press.

Rocha, J. C. (2020) *Efeitos da compactação do arroz em casca e da integridade física em soja sobre propriedades tecnológicas dos grãos e parâmetros de interesse operacional na aeração*. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas.

Silva, J. S., Afonso, A. D. L., Donzelles, S. M. L., & Nogueira, R. M. (2008) Secagem e Secadores. *Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas*. cap. 5, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.

SOSBAI. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. (2018). *Arroz irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil*. In: XXXII Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado. Farroupilha: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado.

Thompson, S. A., Mcneill, S. G., Ross, I. J., & Bridges, T. C. (1987). Packing Factors of Whole Grains in Storage Structures. *Applied Engineering in Agriculture*, 3(2) 215–221.

Tuner, A. P., Montross, M. D., Mcneill, S. G., Sama, M. P., Casada, M. E., Boac, J. M., Bhadra, R., Maghirang, R. G. & Thompson S. A. (2016). Modeling the compressibility behavior of hard red wheat varieties. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 59(3), 1029-1038.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Paulo Carteri Coradi – 30%

Marcela Trojahn Nunes – 20%

Arthur Pozzobon Dutra – 20%

Guilherme Abreu Coelho de Souza – 10%

Letícia de Oliveira Carneiro – 10%

Jonatas Ibagé Steinhaus – 10%