

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL  
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

Arthur Pozzobon Dutra

**AVALIAÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA OPERACIONAL DE  
UMA UNIDADE ARMazenadora COMPOSTA POR SILOS-  
SECADORES E A QUALIDADE DE GRÃOS DE ARROZ**

Cachoeira do Sul, RS, Brasil  
2020

**Arthur Pozzobon Dutra**

**AVALIAÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA OPERACIONAL DE UMA UNIDADE  
ARMAZENADORA COMPOSTA POR SILOS-SECADORES E A QUALIDADE DE  
GRÃOS DE ARROZ**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Santa Maria, Campus Cachoeira do Sul,  
como requisito parcial para obtenção do  
título de **Engenheiro Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

Cachoeira do Sul, RS, Brasil  
2020

## Certificado de Aprovação

AUTOR: Arthur Pozzobon Dutra

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

### **AVALIAÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA OPERACIONAL DE UMA UNIDADE ARMAZENADORA COMPOSTA POR SILOS SECADORES E A QUALIDADE DE GRÃOS DE ARROZ**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Santa Maria, Campus Cachoeira do Sul,  
como requisito parcial para obtenção do  
título de **Engenheiro Agrícola**.

Aprovado em 10 de julho de 2020.



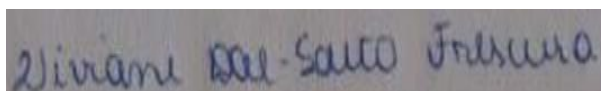
---

Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi  
Presidente/Orientador



---

Prof. Dr. Alfran Tellechea Martini  
(Membro Avaliador 1)



---

Profa. Dra. Viviane Dal-Souto Frescura  
(Membro Avaliador 2)

Cachoeira do Sul, RS, Brasil  
2020

## DEDICATÓRIA

À Deus e à minha família, minha eterna gratidão

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me manter firme no decorrer da caminhada.

A Universidade Federal de Santa Maria – Campus Cachoeira do Sul (UFSM-CS).

Ao Laboratório de Pós-Colheita (LAPOS-UFSM) pela oportunidade, experiência e ensinamentos.

Ao CNPq e FAPERGS pelas bolsas de iniciação científica e tecnológica.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi, pela oportunidade, orientações, dedicação, ensinamentos, e principalmente paciência no decorrer do trabalho.

Aos produtores rurais de arroz pela colaboração e apoio com a estrutura de pós colheita, para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, que sempre tiveram dispostos a ajudar, cada um com seu jeito.

Aos familiares, seus acolhimentos foram fundamentais nessa caminhada.

Aos professores pelo companheirismo, ensinamentos e formação ao longo do curso de Engenharia Agrícola.

A acadêmica Marcela Nunes, com seus conselhos, persistência e auxílio no decorrer do trabalho, todo sucesso na sua trajetória.

Aos colegas do LAPOS, pelo companheirismo, determinação e trabalho em equipe para a realização dos trabalhos.

A Juliany, que me ajudou a superar todos os obstáculos e os momentos difíceis no desenvolvimento do projeto, me auxiliando e apoiando sempre.

Aos graduandos Gabriel Miritz e Guilherme Coelho, que me auxiliaram e incentivaram ao longo da graduação, minha gratidão eterna e todo sucesso na carreira de vocês.

Aos colegas e amigos que me aconselharam no desenvolvimento do trabalho.

Ao Neni, que sempre esteve presente em todos os momentos de produção do trabalho.

A todos que desejaram forças para a finalização desse trabalho.

## EPÍGRAFE

Agricultura sem ciência é uma fazenda  
de porteiras fechadas.

(Iago Fernandes)

## RESUMO

### AVALIAÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA OPERACIONAL DE UMA UNIDADE ARMAZENADORA COMPOSTA POR SILOS-SECADORES E A QUALIDADE DE GRÃOS DE ARROZ

AUTOR: Arthur Pozzobon Dutra  
ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

O arroz é uma cultura de destaque pelo cultivo a nível mundial, além de ser fundamental na alimentação básica dos seres humanos. A garantia da padronização e qualidade dos grãos se deve às boas práticas de cultivo e de pós-colheita, especialmente a secagem e a armazenagem de grãos. Portanto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho técnico operacional e a qualidade de grãos de arroz secos e armazenados em silos-secadores, com aquecimento complementar do ar de secagem a gás. 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. Nesta primeira etapa, foram armazenados grãos de arroz em casca em cinco silos-secadores, para diferentes massas e alturas de coluna de grãos. Com isso, foi analisada a movimentação de ar nos silos, através de um termoanemômetro de pás, e também a temperatura da massa de grãos armazenados a partir de sensores termopares de temperatura. Na segunda etapa, avaliou-se a movimentação do ar no interior da massa de grãos nos silos-secadores, para os seguintes processos dos grãos: sem processo, repeneirado, em processo de repeneiramento, não peneirado, e, parcialmente, repeneirado. Nessa etapa foram avaliadas as velocidades, as vazões e os fluxos de ar, temperatura do ar de secagem e umidade relativa do ar. Em seguida, foram coletadas amostras, através de cabos de termometria, em pontos superiores e inferiores dos silos, para avaliar teores de água, massa específica aparente, rendimento dos grãos inteiros e quebrados. A partir das simulações e experimentações, pode-se concluir que as variações das alturas e da qualidade da forma de processamento da massa de grãos influenciaram na pressão estática e nos desempenhos do conjunto silos-secadores e exaustores reduzindo a capacidade de trabalho e conseqüentemente interferindo na qualidade dos grãos armazenados ao longo do tempo. Os desempenhos técnicos operacionais do conjunto silos-secadores não foram satisfatórios, com 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, com níveis de 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 postos específicos da massa de grãos, prejudicando a secagem e a qualidade dos grãos. Concluiu-se que o peneiramento completo da massa de grãos e a homogeneização dos lotes de grãos é fundamental para realizar uma secagem e armazenamento adequado do arroz em casca em silos-secadores.

**Palavras-chave:** Armazenamento; Operações de Pré-processamento; Pós-colheita do Arroz; Secagem.

## ABSTRACT

### TECHNICAL EVALUATION OF THE OPERATIONAL SYSTEM OF A STORAGE UNIT COMPOSED OF SILOS-DRYERS AND THE QUALITY OF RICE GRAINS

AUTHOR: Arthur Pozzobon Dutra  
ADVISOR: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

Rice is a crop of prominence for cultivation worldwide, in addition to being essential in the basic diet of human beings. The guarantee of standardization and quality of grains is due to good cultivation and post-harvest practices, especially drying and storage of grains. Therefore, the general objective of this work was to evaluate the technical operational performance and the quality of dry rice grains stored in silos-dryers, with complementary heating of the gas drying air. The work was carried out in a rice drying and storage unit, composed of five metallic perforated silos, used as natural aeration silos-dryers and with complementary heating of gas air. In this first stage, rice paddy grains were stored in five dryers, for different masses and column height. Thus, the movement of air in the silos was analyzed using a paddle thermometer, as well as the temperature of the mass of grains stored from thermocouple temperature sensors. In the second stage, the movement of the air inside the grain mass in the silos-dryers was evaluated for the following grain processes: without process, re-sieved, in a sieving process, not sieved, and partially re-sieved. In this stage, air velocities, flow rates and flows, drying air temperature and relative humidity were evaluated. Then, samples were collected, using thermometry cables, in upper and lower points of the silos, to evaluate water content, apparent specific mass, yield of whole and broken grains. From the simulations and experiments, it can be concluded that the variations in the heights and the quality of the grain mass processing form influenced the static pressure and the performance of the silos-dryers and exhaust fans, reducing the work capacity, and consequently interfering with the quality of the stored grains over time. The technical operational performances of the silos-dryers set were not satisfactory, with low drying efficiency and maintaining the quality of the stored grains. The drying efficiency of rice grains was inversely proportional to the increase in static pressure, with an increase in the height of the mass of rice grains, with incomplete drying levels in the upper layers. The sieving operations of the rice grain mass contributed to the reduction of impurities and a better distribution of the static pressure of the grain layers, favoring a more homogeneous movement of the intergranular drying air and the quality of the grains. The batches of rice grains not re-sieved and stored in the silos-dryers had the formation of air passage corridors at specific points of the grain mass, impairing the drying and the quality of the grains. It was concluded that the complete sieving of the grain mass and the homogenization of the grain lots is essential to perform an adequate drying and storage of paddy rice in silos-dryers.

**Keywords:** Storage; Pre-processing Operations; Post-harvest Rice; Drying.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Instalações das unidades de silos-secadores de arroz.....	21
Figura 2 -	Pisos perfurados dos silos-secadores.....	22
Figura 3 -	Detalhamento dos respiros de exaustão.....	22
Figura 4 -	Componentes do sistema de aeração.....	23
Figura 5 -	Aeração dos grãos.....	24
Figura 6 -	Exaustores, queimadores a gás, controladores e sistema de monitoramento .....	24
Figura 7 -	Vazão de ar do exaustor versus porcentagem de enchimento do silo...	34
Figura 8 -	Vazão específica do ar do exaustor versus porcentagem de enchimento do silo. ....	34
Figura 9 -	Resultados do percentual de teores de água e impurezas dos lotes repeneirados submetidos a secagem e armazenagem do silo-secador 2 .....	38
Figura 10 -	Resultados do percentual de teores de água e impurezas dos lotes em processo de repeneiramento submetidos a secagem e armazenagem no silo-secador 3. ....	39
Figura 11 -	Resultados do percentual de teores de água e impurezas dos lotes não repeneirado submetidos a secagem e armazenagem no silo-secador 4. ....	39
Figura 12 -	Resultados do percentual de teores de água e impurezas dos lotes parcialmente repeneirado submetidos a secagem e armazenagem no silo-secador 5. ....	40
Figura 13 -	Resultados 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.....	43
Figura 14 -	Resultados 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. ....	44
Figura 15 -	Resultados 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. ....	45
Figura 16 -	Resultados de grãos quebrados de arroz após beneficiamento, amostrados nos cabos de termometria superiores e nas bocas de descargas inferiores dos silos-secadores.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Arroz no Brasil.....	15
Tabela 2 - Classificação dos métodos de secagem com ar forçado de grãos de arroz. ....	17
Tabela 3 - Concentrações dos nutrientes presentes nos grãos de arroz em base seca (%).....	20
Tabela 4 - Características técnicas de projeto dos silos-secadores.....	25
Tabela 5 - Características técnicas de projeto dos exaustores .....	25
Tabela 6 - Dados gerais do sistema silo-secador.....	25
Tabela 7 - Quantidade de grãos de arroz armazenados nos silos-secadores.....	29
Tabela 8 - Processos dos grãos armazenados. ....	29
Tabela 9 - Valores calculados da simulação plena do sistema silos-secadores – parte 1. ....	32
Tabela 10 - Valores calculados da simulação plena do sistema silos-secadores – parte 2. ....	33
Tabela 11 - Velocidades, vazões e fluxos de ar nos silos-secadores – etapa 1.....	35
Tabela 12 - Termometria da massa de grãos de arroz armazenados nos silos-secadores – etapa 1.....	37
Tabela 13 - Velocidades, vazões e fluxos do ar antes e após exaustores e acima da coluna de grãos armazenados, no silo-secador 1.....	41
Tabela 14 - Velocidades, vazões e fluxos do ar antes e após exaustores e acima da coluna de grãos armazenados, no silo-secador 2.....	41
Tabela 15 - Velocidades, vazões e fluxos do ar antes e após exaustores e acima da coluna de grãos armazenados, no silo-secador 3.....	42
Tabela 16 - Velocidades, vazões e fluxos do ar antes e após exaustores e acima da coluna de grãos armazenados, no silo-secador 4.....	42
Tabela 17 - Velocidades, vazões e fluxos do ar antes e após exaustores e acima da coluna de grãos armazenados, no silo-secador 5.....	42

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.2	HIPÓTESES .....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1	CULTURA E PRODUÇÃO DO ARROZ .....	14
2.2	PÓS COLHEITA DO ARROZ .....	15
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>21</b>
3.1	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE SECAGEM E ARMAZENAGEM DE ARROZ .....	21
3.2	EQUAÇÕES MATEMÁTICAS UTILIZADAS PARA O DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA SILOS-SECADORES .....	26
3.3	MOVIMENTAÇÃO DE AR NA COLUNA DE GRÃOS ARMAZENADOS NOS SILOS-SECADORES.....	28
3.4	MOVIMENTAÇÃO DE AR NA MASSA DE GRÃOS REPENEIRA E ARMAZENADA EM SILOS-SECADORES .....	29
3.5	ANÁLISES FÍSICAS DE QUALIDADE DOS GRÃOS DE ARROZ.....	30
3.6	ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>32</b>
4.1	MOVIMENTAÇÃO DE AR NA COLUNA DE GRÃOS ARMAZENADOS NOS SILOS-SECADORES .....	32
4.2	MOVIMENTAÇÃO DE AR NA MASSA DE GRÃOS REPENEIRADA.....	37
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O arroz é um cereal que 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, caracterizando-se como o maior produtor de arroz do Brasil (IBGE, 2019).

A qualidade do arroz interfere na comercialização e está relacionada às etapas de pós-colheita: recebimento, secagem, armazenagem, e o beneficiamento do produto.

O recebimento refere-se à primeira etapa da pós-colheita, onde a carga de arroz é pesada e amostrada para a análise de teor de água e caracterização da qualidade pela classificação física (ELIAS et al., 2018). Logo depois, o arroz passa pelo processo de pré-limpeza, através de peneiras e ventiladores, para a remoção de impurezas e matérias estranhas indesejáveis ao armazenamento, pois interferem na qualidade dos grãos. Esse processo é feito de forma criteriosa, com redução dos níveis de materiais indesejáveis para abaixo de 2% (EIFERT, 2009).

A secagem tem como finalidade reduzir os teores de água dos grãos para as condições de armazenamento (BRAGANTINI e EIFERT, 2013). Essa 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, após 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).

A secagem estacionária consiste da movimentação de ar aquecido pela massa de grãos, mantendo o produto estacionado no interior do silo-secador. Define-se como uma secagem lenta, com custos operacionais reduzidos, e causa menos danos físicos e mecânicos aos grãos. No entanto, uma das desvantagens desse sistema é a baixa

taxa de transferência de umidade, sua execução incorreta pode ocasionar migração de umidade na massa de grãos, aquecimento do produto ao longo do tempo de armazenamento, acelerando o processo respiratório do arroz, levando a deteriorações físicas e físico-químicas (ELIAS et al., 2018).

A armazenagem tem como objetivo conservar a qualidade dos grãos de arroz ao longo do tempo evitando o desenvolvimento de inseto-pragas e fungos no produto (PERES, 2012).

Após as etapas de pré-processamento, o arroz é submetido ao beneficiamento. Nesta etapa busca-se retirar a casca do grão que pode ser polido ou não, caso dos beneficiamentos integrais do arroz, que não são polidos. A qualidade física do arroz influencia diretamente no rendimento industrial, a qual leva-se em consideração percentual de grãos inteiros em relação aos grãos defeituosos (MÜLLER, 2019).

Os 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 sejam realizados os processos de secagem e armazenagem adequados em sistema silo-secador, com eficiência operacional e qualidade de grãos necessita-se de um projeto dimensionado atendendo os fatores supramencionados.

Portanto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho técnico operacional e a qualidade de grãos de arroz secos e armazenados em silos-secadores com aquecimento complementar do ar de secagem a gás, considerando fatores bióticos e abióticos do produto.

## 1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Avaliar o desempenho pleno do silo-secador pela altura de coluna de grãos no sistema silo-secador, através da movimentação do ar de secagem na massa nos grãos de arroz.
- II. Avaliar a influência do pré-processamento e limpeza da massa de grãos na movimentação do ar de secagem nos grãos de arroz armazenados em silos secadores e a qualidade.

## 1.2 HIPÓTESES

- I. No enchimento dos silos, o fluxo de ar tenderá a diminuir com o aumento da pressão estática, o que poderá influenciar na migração de umidade, aumento da temperatura da massa de grãos e redução da qualidade do produto armazenado.
- II. O aumento da altura da camada de grãos irá influenciar na secagem dos grãos, reduzindo o fluxo de ar nas camadas superiores, resultando em uma secagem ineficiente.
- III. O peneiramento adequado reduzirá a quantidade de impurezas na massa de grãos, resultando na homogeneidade dos lotes de grãos, e diminuindo as possibilidades de correntes de ar em pontos específicos do silo-secador.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A CULTURA E A PRODUÇÃO DO ARROZ

Sendo um dos cereais mais consumidos do mundo, o arroz ganha destaque por sua fundamental importância na alimentação básica humana, o preço relativamente baixo e o suprimento calórico considerável, fazendo do grão a base alimentar de todas as classes sociais, representando o consumo por mais de três bilhões de pessoas em todo mundo (SOSBAI, 2018). Com o passar dos anos, os ganhos em produção evoluem constantemente, entretanto ainda necessita de melhorias na produtividade e qualidade do grão, fatores que se tornam um desafio atualmente (CONAB, 2015).

O Brasil é um país privilegiado para a produção de arroz, onde consegue-se implementar várias opções de cultivo do cereal, com destaque nos sistemas de terras baixas e de terras altas. Os cultivos em áreas de terras baixas são de maioria na região Sul do país, irrigadas por inundação ou aspersão, já de terras altas se concentram na região do Serrado, sem irrigação, dependendo apenas da precipitação (EMBRAPA, 2013).

O arroz ocupa a segunda colocação dos cereais mais cultivados do mundo, atrás somente do milho, com produção estimada de 512 milhões de toneladas de grãos processados na safra 2018/2019, porém havendo um decréscimo de 0,5% em relação à safra 2017/2018 (FAO, 2019). O Brasil corresponde à uma pequena parcela dessa produção, equivalente a 1,5% do total, sendo a China (30%) e a Índia (23%) como grandes representantes de cultivo do cereal (CONAB, 2020).

A produção brasileira, segundo o Levantamento Sistemático de Produção Agrícola, é estimada nos 10,26 milhões de toneladas de arroz com casca, ou 7,1 milhões de toneladas de grãos beneficiados para a comercialização. Com uma área semeada de 1,7 milhões de hectares, representa uma produtividade média de 6,1 toneladas/hectare, aproximadamente 122 sacas. O Rio Grande do Sul é responsável por 57% dessa produção, em 59% da área nacional cultivada, sendo o estado com maior produção de arroz do Brasil (IBGE, 2019).

O mercado do arroz é de maioria interna, o suprimento do cereal atende grande parte da demanda brasileira, necessitando uma pequena porcentagem de importação

decorrente da quantidade exportada (CONAB, 2015). Segundo Brasil (2020), a safra 2018/2019 foi definida com um suprimento de 12,15 milhões de toneladas de arroz, contra 10,25 milhões no consumo, além de 1,04 milhões em importações e 1,36 milhões em exportações. Um problema a ser analisado é a diminuição constante de grãos estocados, um exemplo disso foi o ocorrido da safra 2017/2018 para a safra 2018/2019 houve um decréscimo em 128 mil toneladas. Os dados completos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Arroz no Brasil

Arroz no Brasil (mil toneladas)							
Safra	Estoque Inicial	Produção	Importação	Suprimento	Consumo	Exportação	Estoque Final
2013/2014	1.082,1	12.121,6	807,2	14.010,9	11.954,3	1.188,4	868,2
2014/2015	868,2	12.448,6	503,3	13.820,1	11.495,1	1.362,1	962,9
2015/2016	962,9	10.603,0	1.187,4	12.753,3	11.428,8	893,7	430,8
2016/2017	430,8	12.327,8	1.042,0	13.800,6	12.024,3	1.064,7	711,6
2017/2018	711,6	12.064,2	845,2	13.621,0	11.239,0	1.710,2	671,8
2018/2019	671,8	10.445,1	1.037,7	12.154,6	10.250,0	1.360,9	543,7

Fonte: CONAB (2020).

Por um lado, há grandes investimentos na área de produção, com destaque para melhorias na produtividade, por outro lado, o investimento na conservação dos grãos produzidos impacta diretamente na comercialização. Embora tenha um aumento no interesse no melhoramento da qualidade de conservação dos grãos, o uso de tecnologias de pós-colheita necessita de novos estudos (ELIAS et al., 2018).

## 2.2 PÓS-COLHEITA DO ARROZ

A conservação do arroz tem como princípio o controle de fatores bióticos e abióticos, com o intuito de reduzir as atividades metabólicas e, conseqüentemente, aumentando a vida útil do grão (ELIAS, 2002; CANABARRO et al., 2018). Com isso, os processos de pós-colheita se tornam necessários para manter a qualidade do arroz. São divididas em cinco etapas: recebimento, pré-limpeza, secagem, armazenamento e beneficiamento (MASSONI et al., 2013). As etapas são descritas a seguir.



O recebimento e a pré-limpeza são as etapas iniciais da pós-colheita, onde baseiam-se na retirada de amostras do lote de grãos recebido para avaliação dos teores de água, impurezas e matérias estranhas e realização da classificação física. O teor de água ideal para o recebimento dos lotes de grãos está entre 18 e 24%. Na etapa de pré-limpeza é realizado o peneiramento da massa de grãos para a remoção de impurezas e matérias estranhas, em até 2% (SOSBAI, 2018).

Uma vez limpo, a secagem torna-se o processo mais importante dentro da pós-colheita, sendo decisiva na conservação dos grãos na armazenagem (BRAGANTINI e EIFERT., 2013). Tem a finalidade de reduzir o teor de água do grão, por meio do processo de transferência de calor e massa entre o grão e o ar da secagem, reduzindo sua umidade até entrar em equilíbrio higroscópico, entre 12 e 14%, para estender o período de conservação da qualidade (SILVA et al., 1995; ANTUNES, 2017).

A secagem pode ser realizada de forma natural ou artificial. O método natural é pouco utilizado para secagem de grãos em grandes escalas, é geralmente realizada por pequenos produtores que não detém o sistema artificial, estão sujeitos à deterioração do grão, além da dependência de climas secos no período de secagem, tornando evidentes as chances de perdas quantitativas e qualitativas durante o processo (FRANCO et al., 2013). A secagem artificial é feita com a entrada forçada de ar, sendo quente ou natural, com o intuito de reduzir o tempo de aplicação e evitar perdas (FRANCO e PETRINI, 2006). A secagem artificial é muito utilizada pelos produtores com grandes volumes de grãos colhidos e que necessitam armazenar por um determinado tempo, antes de comercializá-lo (SANTOS et al., 2002)

No método de secagem com ar não aquecido, o fluxo de ar deve ser maior, por ser um processo mais lento, a fim de evitar o início da deterioração dos grãos durante a própria secagem. Enquanto que, na secagem com ar aquecido, é recomendado que o sistema de aquecimento do ar não seja realizado de forma direta para evitar o contato de gases da combustão com o produto, afim de evitar danos por choques térmicos nos grãos (SOSBAI 2018).

A secagem artificial é classificada em três sistemas: estacionários, convencionais e mistos. Para cada sistema são utilizados diferentes métodos de secagem (Tabela 2).

Tabela 2 - Classificação dos métodos de secagem com ar forçado de grãos de arroz.

Processos	Sistemas	Métodos
Tecnificados	a. Estacionários	a1. Secador em leito fixo a2. Silo-secador de fluxo axial a.3 Silo-secador de fluxo radial
	b. Convencionais	b1. Contínuos adaptados (secador de coluna) b2. Intermitente
	c. Mistos	c1. Seca-aeração

Fonte: SOSBAI, 2018.

A secagem intermitente e os silos-secadores são os mais utilizados, com suas particularidades, diferenciados pela temperatura e tempo de secagem.

Na secagem intermitente, há movimentação de ar e dos grãos dentro do sistema, passam várias vezes pela câmara de secagem e resfriamento, de modo que a passagem pela secagem seja rápida, e a do resfriamento mais lenta, até que atinjam a umidade de 12 a 13% (EIFERT et al., 2009). A relação entre os dois períodos é chamada de relação de intermitência. A secagem rápida, entre 70 e 110°C, influencia na umidade interna do grão para que tenha tempo de migrar para a superfície, e seja evaporada no próximo ciclo de secagem. Segundo De Castro et al. (1999), é importante observar os períodos de repouso dos grãos para não ocorrer fermentação da massa de grãos, prejudicando a qualidade do produto pelo aparecimento de grãos amarelos.

Por outro lado, na secagem estacionária, realizada em silos secadores, não há movimentação de grãos, apenas do ar para a transferência de calor, podendo ser aquecido ou na temperatura ambiente, dependendo das condições climáticas (MORAES et al., 2006). Esse último método utiliza a temperatura do ar em até 45°C (EMBRAPA, 2005; LOURENSI, 2014). A altura de camada de grãos deve ser observada no interior do sistema de secagem, porque quanto maior a espessura da camada menor deverá ser a temperatura de secagem, para não ocorrer uma superssecagem nas camadas inferiores e comprometer a qualidade dos grãos, como aumento do número de quebrados (SOSBAI, 2018).

“Normalmente, na secagem com ar natural, o potencial de secagem do ar ambiente e o pequeno aquecimento provocado pelo ventilador (2 a 3°C) são suficientes para propiciar a obtenção do teor de umidade final recomendado para um armazenamento seguro. Sistemas de secagem com ar natural e em

baixas temperaturas devidamente projetados e manejados são métodos econômicos e tecnicamente eficientes” (SILVA et al, 2008, pg. 8).

Segundo Menezes et al. (2012), uma secagem a 50°C apresentou um significativo aumento de grãos com fissuras, sendo inadequado para manter a qualidade do arroz. A secagem por silo-secadores, apesar de lenta, garante uma secagem natural, mantendo a qualidade dos grãos.

A estrutura do silo-secador caracteriza-se por piso de chapas metálicas perfuradas, com no mínimo 15% de perfuração para ocorrer a ventilação correta, ventilador com vazão para secagem, calculado com base no tamanho do silo e na quantidade de produto armazenado (SILVA et al., 2008). Os autores afirmam que esse sistema apresenta problemas de secagem em regiões com alta umidade relativa, pelo processo ser lento e com temperaturas baixas, contribuindo para a deterioração do grão.

Para a aeração durante o armazenamento da massa de grãos em silo-secador, é indicado monitorar a temperatura e umidade relativa do ar ambiente com intuito de manter a uniformidade de secagem, utilizando um fluxo de ar entre 1,5 a 4 m<sup>3</sup>. min<sup>-1</sup>t<sup>-1</sup>(m<sup>3</sup> de ar por minuto por tonelada de grãos) (SOSBAI, 2018).

Os carregamentos dos silos-secadores podem ser feitos de três formas, são eles: enchimento em uma etapa, enchimento por camada e camada única. O enchimento em uma etapa consiste em carregar o silo em até cinco dias, com um tempo de secagem superior a 25 dias. Apresenta vantagens de pouca movimentação do produto, influenciando na redução de danos mecânicos, custo baixo em regiões secas, além de não depender da secagem das camadas de grãos (SILVA et al., 2008).

O segundo sistema, feito por camadas, determina o andamento da secagem conforme a última camada carregada esteja praticamente seca, para assim ser adicionado um novo carregamento de grãos. A quantidade de produto colocado dependerá da velocidade de vazão do ar, da umidade inicial dos grãos, além da temperatura de secagem. Apresenta vantagens por ser uma secagem mais rápida que o sistema anterior, menor risco de deterioração. Entretanto requer maior atenção no controle desse processo, para não ocorrer uma super secagem dos grãos (SILVA et al. 2008).

O carregamento do silo em uma única camada é feito com no máximo um metro de espessura, com a diferença do sistema anterior da retirada dessa camada única

quando estiver a secagem finalizada. Apresenta a secagem mais rápida dos três modos, maior fluxo de ar implementado e menor risco da deterioração dos grãos. Entretanto, esse método resulta em equipamentos menos eficientes e maior demanda de mão-de-obra (SILVA, 2008).

O monitoramento da secagem em silo-secador consiste no controle diário de temperatura e umidade. Segundo Silva et al. (2008), o funcionamento do ventilador depende do teor de água e o clima da região, sendo necessário a secagem interrompida quando os grãos estiverem com teores de água superiores a 16% e 75% de umidade relativa do ar.

De acordo com Menezes et al. (2012), o aumento nas temperaturas de secagem resulta em aumento na percentagem de grãos com fissuras, que, associado a outros efeitos de secagem, afetam, negativamente a qualidade. Uma secagem incorreta é capaz de influenciar na composição físico-química dos grãos, (BORTOLOTTI et al., 2008). Para De Castro et al. (1999), a principal causa de aparecimento de fissuras nos grãos decorre pela superssecagem dos grãos. Os parâmetros de monitoramento, como a velocidade de vazão do ar, a temperatura de secagem e os teores de água dos grãos influenciam diretamente na qualidade do arroz na secagem.

O sistema silo-secador apresenta vantagens e desvantagens na qualidade do grão durante essa etapa. Sua secagem mais lenta garante a redução do teor de água no grão de forma mais natural, garantindo a uniformidade do processo e reduzindo as chances de grãos trincados (EMBRAPA, 1999). Entretanto se mal dimensionado pode apresentar maiores chances de deterioração durante o processo.

O controle da etapa de armazenamento é importante para a manutenção da qualidade dos grãos por períodos mais longos, (CONAB, 2015). Grande parte dos grãos são armazenados a granel, em silos verticais metálicos ou concreto e em silos horizontais conhecidos como graneleiros. Durante o armazenamento a redução da temperatura da massa de grãos por meio da aeração natural ou artificial retarda o metabolismo dos grãos, diminuindo a respiração da massa de produto e estendendo o período de conservação, mantendo as características iniciais do arroz. (AGUIAR et al., 2012).

Para realizar uma armazenagem correta é necessário o monitoramento diário da temperatura dos grãos em pontos estratégicos, afim de evitar aquecimentos em algum local do silo (EIFERT, 2009).

Segundo Santos et al. (2002) é importante armazenar grãos de arroz nos silos com a mesma cultivar e o mesmo padrão de classificação comercial. Um lote de grãos misturados, entre um de melhor qualidade e outro de qualidade inferior, pode influenciar no valor de comercialização.

Na indústria, a qualidade do grão prevalece. Os processos de beneficiamento necessitam atender às normas legais de classificação física em vigor do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, através da Instrução Normativa MAPA N° 06, de 16 de fevereiro de 2009, e a MAPA N° 02 de 06 de fevereiro de 2012.

O produto final, independente de qual tipo de grão de arroz beneficiado, são os inteiros, sendo considerados descartados do consumo humano os quebrados, e destinam-se na produção de ração para animais ou farinha, ou mesmo parte dos grãos quebrados são comercializados para o exterior (EMBRAPA, 2013).

Os grãos de arroz que passam pelo processo de beneficiamento para a comercialização são caracterizados em três tipos: integrais, branco polido e parboilizado. No beneficiamento do arroz integral é feito apenas a retirada da casca, mantendo o endosperma e o farelo (pelicarpo) (BRASIL, 2009; CONAB 2015). Já os polidos são retirados através do polimento do grão, o germe, o pericarpo e a maior parte da aleurona (camada interna). A parboilização é um processo hidrotérmico, do qual o arroz é pré-cozido em água fervente (LOPES M. e LOPES A., 2009).

Os grãos integrais, brancos polidos e parboilizados apresentam porcentagens de nutrientes diferentes. O arroz branco apresenta maior quantidade de amido, já o arroz integral aparenta ter menor concentração de amido, decorrente da relação da maior porcentagem de proteínas e fibras, como apresentado na Tabela 3 (PEREIRA et al., 2012).

Tabela 3 - Concentrações dos nutrientes presentes nos grãos de arroz em base seca (%).

Nutriente	Arroz branco polido	Arroz parboilizado do polido	Arroz integral
Amido	87,58	85,08	74,12
Proteínas	5,94	9,44	10,46
Lipídeos	0,36	0,69	2,52
Cinzas	0,3	0,67	1,15
Fibra total	2,87	4,15	11,76

Fonte: STORCK (2004).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho realizado caracteriza-se de um estudo técnico de avaliação do desempenho operacional de silos-secadores de arroz, na região do Rio Grande do Sul, Brasil.

#### 3.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE SECAGEM E ARMAZENAGEM DE ARROZ

O trabalho foi realizado numa 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 (Figura 1).

Figura 1 - Instalações das unidades de silos secadores de arroz.



Fonte: autor.

Os silos secadores modelos SFP-18314-tecnologia foram projetados para uma capacidade de 40.400 sacas de arroz cada (2020 toneladas), sem compactação, no corpo do silo, e 42.420 sacas de arroz cada (2121 toneladas), com 5% de compactação, para um volume de 3.367,00 m<sup>3</sup> de arroz, com massa específica aparente de 0,60 t m<sup>-3</sup>. A estrutura detém altura cilíndrica de 12,80 metros e altura total de 18,08 metros, diâmetro de 18,30 metros, com tampas de inspeção de 30° e

autoportante em chapa #22 galvanizadas (Figura 2), com 25 respiros para atender à exaustão do ar (Figura 3).

Figura 2 - Pisos perfurados dos silos secadores.



Fonte: autor.

Figura 3 - Detalhamento dos respiros de exaustão.



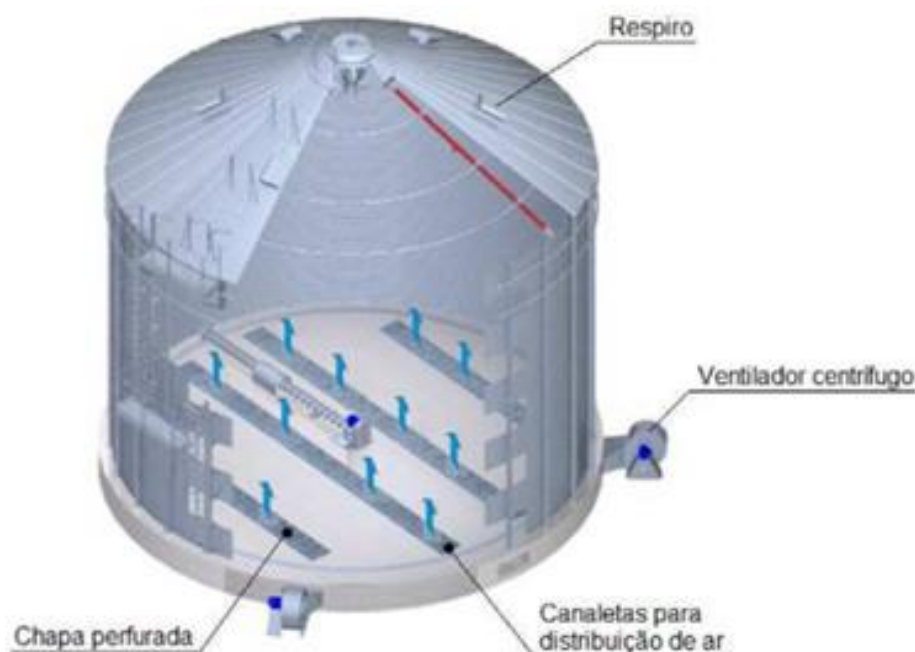
Fonte: autor.

As escadas internas e externas (externa com guarda-corpo) – tipo marinheiro, foram projetados conforme as normas NR-12, com lances de 6 metros, mais plataforma de descanso. As vigas de reforços foram instaladas com formato “U”.

Na Tabela 5, estão as características estruturais das chapas e bitolas dos silos secadores. Os anéis dos silos secadores foram construídos de chapas galvanizadas ZAR-345, corrugadas, com montantes externos e com uma porta adicional de inspeção no 1º anel.

O projeto dos silos secadores apresenta uma resistência às pressões para uma massa específica aparente do produto de até  $820 \text{ kg m}^{-3}$  e esforços de vento de até  $120 \text{ km h}^{-1}$ , em condições normais de uso. As uniões das chapas metálicas para a construção dos silos secadores foram feitas com parafusos de arruela integrada, arruela lisa e arruela neoprene. As chapas são galvanizadas com revestimento de zinco de  $350 \text{ g m}^{-2}$ . Os pisos dos silos secadores foram considerados em projeto como 100% perfurados, com média de  $4,5 \text{ furos/cm}^2$  (Figura 2). A aeração de ar forçado foi projetada em fundo totalmente perfurado com dois ventiladores centrífugos modelo ILS-800, motor de 40,0 CV (cavalos de potência), vazão de  $26000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  (metro cúbico de ar por hora) e pressão estática de 284 mmca (milímetro de coluna d'água), acompanhado de um registro central e quatro registros secundários tipo cremalheira (Figuras 4, 5 e 6).

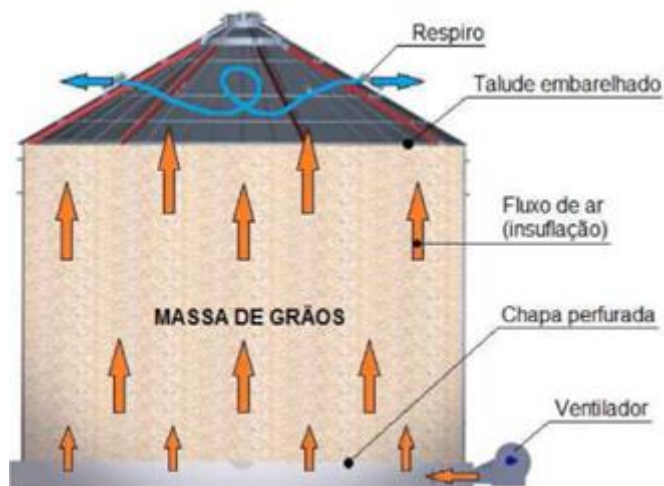
Figura 4 - Componentes do sistema de aeração.



Autor: Industrial Pagé.



Figura 5 - Aeração dos grãos.



Autor: Industrial Pagé.

Figura 6 - Exaustores, queimadores a gás, controladores e sistema de monitoramento.



Fonte: Autor.

O sistema não tem controle da temperatura, sendo projetado para controle da umidade relativa do ar insuflado, com auxílio de uma central meteorológica, que controla os motores dos exaustores e o sistema de acionamento do gás para

aquecimento complementar do ar de secagem, quando necessário reduzir a umidade relativa do ar.

Em casos de relativa do ar acima de 60% o sistema de gás liga automaticamente, desumidificando o ar até 50%. Para evitar o consumo excessivo de gás, não foi utilizada no trabalho a aeração com umidade relativa acima de 80%.

Nas Tabelas 4, 5 e 6 estão as características técnicas implementadas nos silos secadores, em relação à capacidade de armazenagem e o sistema de ventilação para a secagem.

Tabela 4 - Características técnicas de projeto dos silos secadores.

Tipo	Capacidade (t)	Diâmetro (m)	Altura (m)	Volume (t)	Volume (m <sup>3</sup> )	Fundo
Silo-secador	2.011	18,30	12,74	2.011	3.351	100% aerado

Tabela 5 - Características técnicas de projeto dos exaustores.

Tipo	Rotação (rpm)	Potência (c.v.)	Quantidade	Vazão (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Vazão total (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Pressão (mmca)	Fluxo de ar (m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	Fluxo de ar (t)
Exaustor	1.775	40	2	30.099	60.198	260,6	0,38	0,63

Tabela 6 - Dados gerais do sistema silo-secador.

Produto	Arroz
Diâmetro do Silo (m)	18,30
Altura do cilindro do silo (m)	12,74
Ângulo de repouso do produto (graus)	36,00
Massa específica do produto (kg m <sup>-3</sup> )	600,00
Vazão específica para o silo cheio (m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> t <sup>-1</sup> )	0,3
Eficiência do sistema de ventilação (%)	75
Coefficiente de compactação da massa de grãos (decimal)	1,05
Fator de segurança para cálculo da pressão estática (decimal)	1,3

### 3.2 EQUAÇÕES MATEMÁTICAS UTILIZADAS PARA O DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA SILOS-SECADORES

Neste tópico do trabalho serão apresentadas as equações utilizadas para a verificação das vazões e fluxos de ar, por meio dos dados de velocidade do ar obtido com o auxílio de um termoanemômetro.

A área de entrada do ventilador foi calculada pela Equação 1.

$$A_e = \pi \times r_e^2 = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (1)$$

Em que:

$A_e$  = Área de entrada (m<sup>2</sup>);

$r_e$  = raio de entrada do exaustor (m).

A velocidade do ar de entrada foi calculada pela Equação 2.

$$V_e = \frac{de}{\Delta t} \quad (2)$$

Em que:

$V_e$  = Velocidade do ar de entrada (m s<sup>-1</sup>);

$de$  = deslocamento do ar (m);

$\Delta t$  = variação de tempo determinado (s).

As vazões de ar de entrada foram calculadas pela Equação 3.

$$Q_e = V_e \times A_e \times 3600 \quad (3)$$

Em que:

$Q_e$  = Vazão de ar de entrada (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>);

O fluxo de ar de entrada foi calculado pela Equação 4.

$$F_e = \frac{Q_e / 60}{A_e} \quad (4)$$

Em que:

$F_e$  = Fluxo de ar de entrada (m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>).

A área de saída do exaustor foi calculada pela Equação 5.

$$A_s = \pi \times r_s^2 = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (5)$$

Em que:

$A_s$  = Área de saída do exaustor ( $m^2$ );

$r_s$  = Raio de saída do exaustor (m).

A velocidade de saída nos exaustores foi calculada pela Equação 6.

$$V_s = de \times t \quad (6)$$

Em que:

$V_s$  = Velocidade de saída ( $m \ s^{-1}$ ).

As vazões de ar de saída foram calculadas pela Equação 7.

$$Q_s = V_s \times A_s \times 3600 \quad (7)$$

Em que:

$Q_s$  = Vazão de saída ( $m^3 \ h^{-1}$ );

$\gamma$  = Massa específica dos grãos (mca).

O fluxo de ar de saída foi calculado pela Equação 8.

$$F_s = \frac{Q_s / 60}{A_s} \quad (8)$$

Em que:

$F_s$  = Fluxo de saída ( $m^3 \ min^{-1} \ m^{-2}$ ).

A área da base do silo foi calculada pela Equação 9.

$$A_b = \pi \times r_b^2 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (9)$$

Em que:

$A_b$  = Área de base do silo ( $m^2$ );

$r_b$  = Raio da base (m).

O fluxo de ar no plenum foi calculada pela Equação 10.

$$F_p = \frac{Q_p}{t \times A_b} \quad (10)$$

Em que:

$F_p$  = Fluxo de ar no plenum ( $m^3 \text{ min}^{-1} m^{-2}$ ).

As vazões de ar no plenum foram calculadas pela Equação 11.

$$Q_p = A_b \times F_p \times 60 \quad (11)$$

Em que:

$Q_p$  = Vazões de ar no plenum ( $m^3 h^{-1}$ ).

As vazões de ar específicas foram calculadas pela Equação 12.

$$Q_{esp} = A_{esp} \times F_{esp} \times 60 \quad (12)$$

Em que:

$Q_{esp}$  = Vazões de ar específicas ( $m^3 h^{-1}$ );

$A_{esp}$  = Área específica do sensor ( $m^2$ );

$F_{esp}$  = Fluxo de ar específico ( $m^3 \text{ min}^{-1} m^{-2}$ )

A pressão estática dos grãos no carregamento no silo foi calculada pela Equação 13.

$$P = \gamma \times h \text{ [mmca]} \quad (13)$$

Em que:

$P$  = Pressão estática dos grãos (mmca);

$\gamma$  = massa específica dos grãos úmidos (mca);

$h$  = Altura da massa de grãos armazenados (m).

### 3.3 MOVIMENTAÇÃO DE AR NA COLUNA DE GRÃOS ARMAZENADOS NOS SILOS-SECADORES

Na primeira etapa avaliou-se a movimentação de ar na massa de grãos armazenados nos silo-secadores, considerando as quantidades e alturas plenas de grãos de arroz, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Quantidades de grãos de arroz armazenados nos silos secadores.

Quantidades	Silos Secadores				
	Silo 1	Silo 2	Silo 3	Silo 4	Silo 5
Sacas de 50 kg	19.858,00	24.908,60	28.660,20	37.019,40	17.310,00
Altura de coluna de grãos (m)	6,30 m	7,90 m	9,10 m	11,70 m	5,50 m

A movimentação do ar (velocidades) nos silos-secadores foi determinada com auxílio de um termoanemômetro de pás, para possibilitar o cálculo das vazões e fluxos de ar supracitados. A temperatura da massa de grãos armazenada foi determinada com auxílio do sistema de termometria, composta por seis cabos e oito sensores termopares, instalados equidistantes no interior dos silos-secadores.

### 3.4 MOVIMENTAÇÃO DE AR NA MASSA DE GRÃOS REPENEIRADA E ARMAZENADA EM SILOS SECADORES

Na segunda etapa, avaliou-se a movimentação do ar no interior da massa de grãos armazenados nos silos secadores, em função de diferentes processos de peneiramento dos grãos (Tabela 8). O repeneiramento foi definido no projeto como a segunda limpeza dos grãos armazenados. Os lotes armazenados nos silos-secadores apresentaram altos níveis de impurezas, e por isso foram repassados para uma segunda etapa de pré-limpeza. No caso do silo-secador 5 com o processo “parcialmente repeneirado”, significa que 50% dos lotes armazenados passaram pelo processo de repeneiramento. E no silo-secador 3 com o processo “em processo de repeneiramento”, a pré-limpeza foi realizada apenas nos lotes iniciais.

Tabela 8 - Processos dos grãos armazenados.

Silo secador	Sacos (50 kg cada)	Processos dos grãos
1	0	Sem processo
2	24.908,60	Repeinerado
3	28.660,20	Em processo de repeneiramento
4	37.019,40	Não repeneirado
5	17.310,00	Parcialmente repeneirado

Determinou-se as velocidades e as temperaturas do ar de secagem e a umidade relativa do ar ambiente. Calculou-se as vazões, fluxos de ar, em diferentes pontos do sistema, sendo eles: na entrada do exaustor, na saída do exaustor, acima da coluna de grãos (nos diferentes cabos de termometria).

Coletaram-se amostras de arroz em casca de quantidades iguais próximo aos cabos de termometria, nos pontos superiores da massa de grãos e nas bocas de descarga, nos pontos inferiores dos silos-secadores, para avaliações de teores de água, massa específica aparente, rendimento de grãos inteiros e quebrados.

### 3.5 ANÁLISES FÍSICAS DE QUALIDADE DOS GRÃOS DE ARROZ

O teor de água dos grãos de arroz foi analisado pelo método indireto de capacitância elétrica, com cinco repetições para cada amostra. Em seguida determinaram-se os teores de água pelo método da estufa para validação, a partir da pesagem de 10 g de amostra em duas repetições, colocadas em estufa a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 24 h, em seguida as amostras foram retiradas e colocadas em um dessecador para resfriamento e posterior pesagem, segundo as recomendações da Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). O teor de água foi determinado pela diferença de massa, entre a amostra inicial e a amostra final, os resultados foram expressos em percentagem da temperatura de bulbo úmido (b.u.).

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 com casca, colocados gradativamente na moega “cone” de entrada de alimentação do equipamento. A operação foi submetida 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.

Conforme as recomendações técnicas de beneficiamento de arroz (BRASIL, 2019) e da indústria fabricante de equipamento de beneficiamento, fizeram-se as regulagens necessárias. A altura do cone de alimentação do beneficiador de arroz foi regulada para 2,0 cm, enquanto que, o descascador foi regulado para a posição de 1,5 cm e a distância entre roletes foi regulada para a posição 6,5 cm. O polimento do arroz realizado pelas pedras abrasivas do brunidor que foi regulado para posição de 2,0 cm, a 16 pontos do anel graduado. Para remoção das cascas do arroz, a câmara de aspiração foi ajustada para uma pressão de aspiração constante. Para o beneficiamento do arroz integral, com exceção da etapa de brunimento (polimento), utilizaram-se as mesmas regulagens do arroz polido.

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.

### 3.6 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Para o dimensionamento do sistema silo-secadores foram realizadas determinações diretas da velocidade, temperatura e umidade relativa do ar de secagem nos diferentes pontos do silo-secador conforme descritos nos itens anteriores. Em seguida, mediram-se as dimensões dos silos-secadores e exaustores, bem como da coluna de grãos. A partir das medições diretas, realizaram-se os demais cálculos de projeto pelas equações apresentadas anteriormente.

No produto, obtiveram-se as médias da temperatura da massa de grãos monitoradas por sensores termopares no sistema instalado de termometria, ao longo de seis meses de secagem e armazenamento dos grãos. A qualidade dos grãos de arroz em casca foi mensurada através das determinações do teor de água e massa específica aparente, enquanto que, para a qualidade dos grãos beneficiados avaliou-se o rendimento de grãos inteiros e o percentual de grãos quebrados. Em todos os resultados qualitativos utilizou-se os valores médios.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 MOVIMENTAÇÃO DE AR NA COLUNA DE GRÃOS ARMAZENADOS NOS SILOS SECADORES

De acordo com os resultados obtidos nas Tabelas 9 e 10, observou-se que houve redução de vazão do ar e a vazão específica do ar, conforme é realizado o enchimento do silo, enquanto que a pressão estática é aumentada. A vazão do ar com o silo carregado corresponde a 43% da vazão inicial, enquanto na vazão específica a redução é ainda maior, chegando à 6,4% da inicial.

Tabela 9 - Valores calculados da simulação plena do sistema silos secadores – parte 1.

Área da base do silo (m <sup>2</sup> )	263,02
Altura do cone superior formado pelo produto (m)	6,65
Volume da parte cilíndrica do silo (m <sup>3</sup> )	3350,90
Volume do cone superior do silo (m <sup>3</sup> )	582,84
Volume total do silo (m <sup>3</sup> )	3933,74
Capacidade do silo (t)	2360,25
Vazão de ar para o silo cheio de produto (m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> )	708,07
Vazão por unidade de área da secção transversal do silo (m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	2,69
Pressão estática para o silo cheio de produto (mmca)	231,78
Potência do sistema de ventilação calculada para o silo cheio (c.v.)	48,63
Potência comercial do ventilador instalado (c.v.)	50,00

Tabela 10 - Valores calculados da simulação plena do sistema silos secadores – parte 2.

Porcentagem de enchimento do silo	Altura média da camada de grãos (m)	Vazão de ar ( $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$ )	Vazão específica de ar ( $\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{t}^{-1}$ )	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

Na Figura 7 pode ser observado os valores de vazão de ar, já na Figura 8 apresenta-se a pressão estática, no período de enchimento do silo. Estes dados permitem identificar a redução da vazão do ar com o enchimento, do qual, ao iniciar as análises com 20% de enchimento estes apresentaram uma vazão média de 1600  $\text{m}^3/\text{min}$  e ao atingir 100% de enchimento a vazão reduz para 708,40  $\text{m}^3/\text{min}$ . Já a pressão estática aumenta gradativamente com o enchimento do silo-secador, chegando a 231,9 mmca.

O fluxo de ar, ou vazão por unidade de área, entram nos parâmetros descritos por Sosbai (2018), onde o recomendado deve ser entre 1,5 e 4,5  $\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$ , garantindo a circulação adequada de ar no interior do silo-secador. Entretanto, a vazão específica está muito abaixo do recomendado, 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  $\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{t}^{-1}$  para realizar a secagem corretamente, como consta na Tabela 3. No simulador o valor da vazão específica baixou para 0,3  $\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{t}^{-1}$  com o silo cheio, 20% da necessidade mínima do processo. Através da simulação seria recomendado a secagem com 31,85% da capacidade de carregamento, para que o fluxo de ar flua corretamente sob as camadas de grãos.

Figura 7 - Vazão de ar do exaustor versus percentagem de enchimento do silo.

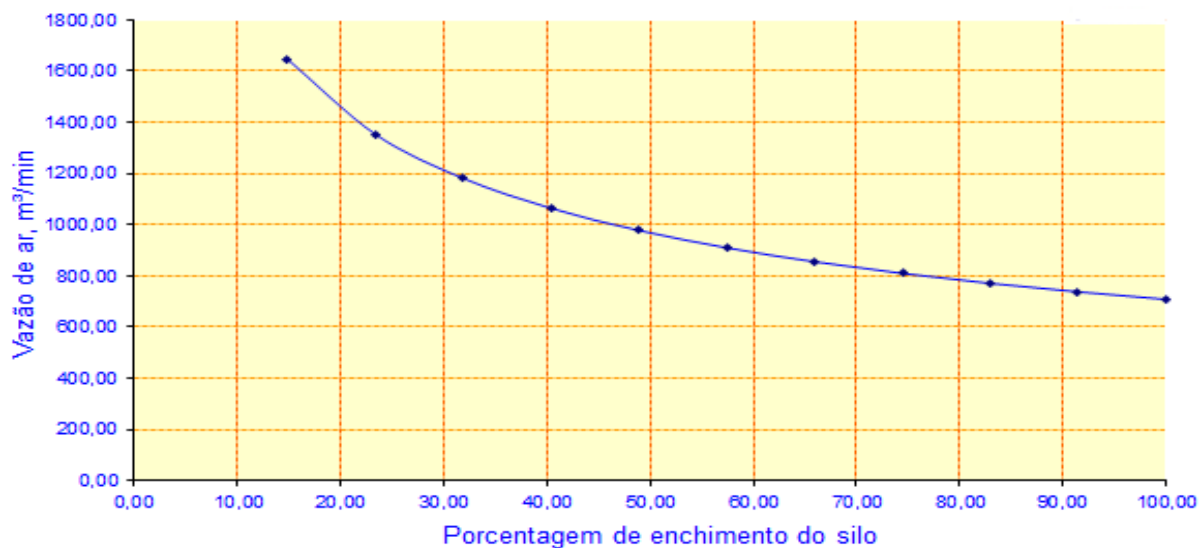
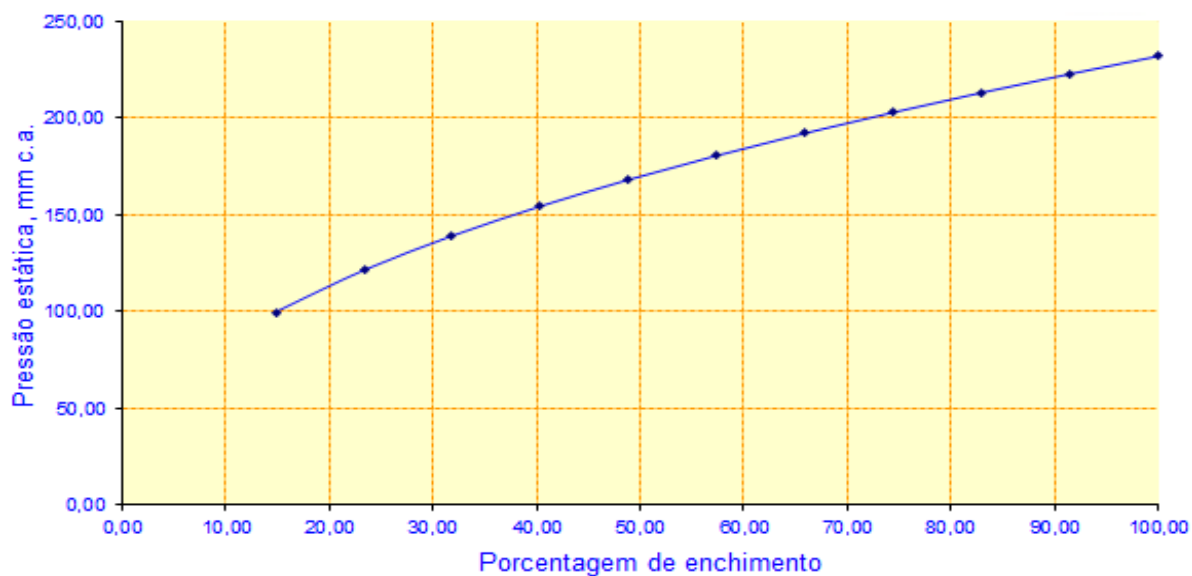


Figura 8 - Vazão específica do ar do exaustor versus percentagem de enchimento do silo.



Na Tabela 11 estão as informações referentes a movimentação de ar no interior do silo, na entrada, na saída, na base e no plenum. Foram analisadas a área, a velocidade do ar, as vazões de ar e o fluxo de ar.

Tabela 11 - Velocidades, vazões e fluxos de ar nos silos secadores – etapa 1.

Silo	E	A <sub>e</sub>	V <sub>e</sub>	Q <sub>e</sub>	F <sub>e</sub>	A <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>	Q <sub>s</sub>	F <sub>s</sub>	A <sub>b</sub>	F <sub>p</sub>	Q <sub>p</sub>
Secador												
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
	2	0,52	5,05	9.453	302,98	0,42	1,69	2.556	101,43	262,88	0,39	6.151

E – Exaustor; A<sub>e</sub> – área de entrada (m<sup>2</sup>); V<sub>e</sub> – velocidade do ar de entrada (m s<sup>-1</sup>); Q<sub>e</sub> – vazões de ar de entrada (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>); F<sub>e</sub> – fluxo de ar de entrada (m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>); A<sub>s</sub> – área de saída do exaustor (m<sup>2</sup>); V<sub>s</sub> – velocidade de saída do ar (m s<sup>-1</sup>); Q<sub>s</sub> – vazões de ar de saída (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>); F<sub>s</sub> – fluxo de ar de saída (m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>); A<sub>b</sub> – área da base do silo (m<sup>2</sup>); F<sub>p</sub> – fluxo de ar no plenum (m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>); Q<sub>p</sub> – vazões de ar no plenum (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>).

Conforme as características de projeto dos silos-secadores (Tabela 10) e as condições do produto armazenado, observou-se um baixo rendimento de secagem (Tabela 11). No sistema de aquecimento com queimadores a gás, verificou-se que os exaustores originalmente instalados na unidade de secagem e armazenamento demandaram uma potência de 60 CV, conforme apresentado na Tabela 5.

Os rotores dos exaustores foram substituídos ao longo do tempo para atingir uma potência de 40 a 43 CV, conforme a Tabela 5. Com a substituição dos rotores reduziu-se cerca de 30% da largura dos mesmos, no entanto, na carcaça dos rotores manteve-se os mesmos, provocando uma oscilação e variação do ar entre os rotores e a carcaça, de acordo com a Tabela 12.

De acordo com as medições da corrente dos motores observaram-se oscilações e ineficiência no sistema, devido à turbulência. O arroz seguiu em processo de secagem, mantendo-se os teores de água dos grãos praticamente em equilíbrio higroscópico, com um consumo de 8.040 kg de gás, acima do que concebia o projeto, com consumo médio de 130 gramas de gás / saca de arroz de 50 kg, para redução de umidade de 20 a 12% (b.u.) de teor de água. Segundo Moraes et al. (2006), a deficiência da secagem influencia no consumo de energia, o mal dimensionamento desse processo contribui com o gasto excessivo na operação.

Observaram-se baixas vazões de ar na entrada da massa de grãos, indicando pela termometria um aquecimento da massa de grãos com temperaturas em torno de 27 °C (Tabela 12). Isso ocorreu pelo mal dimensionamento do sistema de secagem dos silos, a falta de circulação de ar dificultou o resfriamento dos grãos, aumentando a temperatura da massa, e provocando uma baixa eficiência no processo de secagem.

De acordo com Sosbai (2018), nesse caso, seria necessário o aumento da vazão específica de ar no sistema para no mínimo 1,5 m<sup>3</sup> / min m<sup>2</sup>, 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.

Tabela 12 - Termometria da massa de grãos de arroz armazenados nos silos secadores – etapa 1.

Silo	Leitura	Pêndulo/Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8
1	18:18:33	1	23	23	24	24	23	24	23	
		2	24	25	25	24	24	23	23	
		3	24	23	24	24	24	24	24	
1	18:24:55	1	24	23	24	23	23	24	23	
		2	25	25	25	23	23	23	24	
		3	25	24	23	24	24	23	24	
		4	26	24	24	24	24	23	24	
		5	23	24	24	23	24	23	24	
		6	27	25	24	24	24	24	24	23
2	18:27:06	1	29	28	26	22	22	22	22	
		2	29	28	23	21	22	22	22	
		3	30	29	23	21	23	23	23	
		4	29	27	21	21	22	22	23	
		5	29	28	24	20	21	22	22	
		6	30	25	23	23	22	23	23	23
3	18:29:41	1	29	27	27	22	21	22	22	
		2	27	27	21	20	20	21	22	
		3	27	26	26	24	20	21	22	
		4	32	30	30	27	23	24	24	
		5	29	28	28	23	21	22	22	
		6	21	22	21	22	21	21	22	22
4	18:32:08	1	29	27	22	21	20	21	22	
		2	29	28	24	22	21	21	22	
		3	29	28	21	20	20	20	22	
		4	29	27	22	21	21	19	22	
		5	29	27	22	21	21	20	22	
		6	28	24	21	20	19	20	22	22
5	18:34:42	1	24	22	22	22	22	22	23	
		2	24	22	23	23	23	23	23	
		3	23	22	19	23	23	23	23	
		4	28	22	22	20	23	23	23	
		5	23	22	21	22	21	21	22	
		6	23	21	22	21	23	22	22	22

#### 4.2 MOVIMENTAÇÃO DE AR NA MASSA DE GRÃOS REPEINERADA

Na segunda etapa de avaliação, analisaram-se os efeitos de repeneiramento dos lotes de grãos de arroz sobre a movimentação de ar nos silos-secadores. Observou-se nas Figuras 9, 10, 11 e 12 os resultados de teores de água e impurezas

dos lotes de grãos de arroz recebidos e armazenados nos silos-secadores 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Entre os resultados obtidos, observou-se que o processo de reneiramento feito no silo 2 (Figura 9) contribuiu com menores índices de impurezas nos lotes, contribuindo com a homogeneidade dos lotes submetidos a secagem, quanto aos teores de água. A homogeneização dos lotes contribui para uma secagem mais eficiente, garantindo a qualidades 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 12). Entretanto, 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 9 - Resultados do percentual de teores de água e impurezas dos lotes reneirados e submetidos à secagem e armazenagem no silo-secador 2.

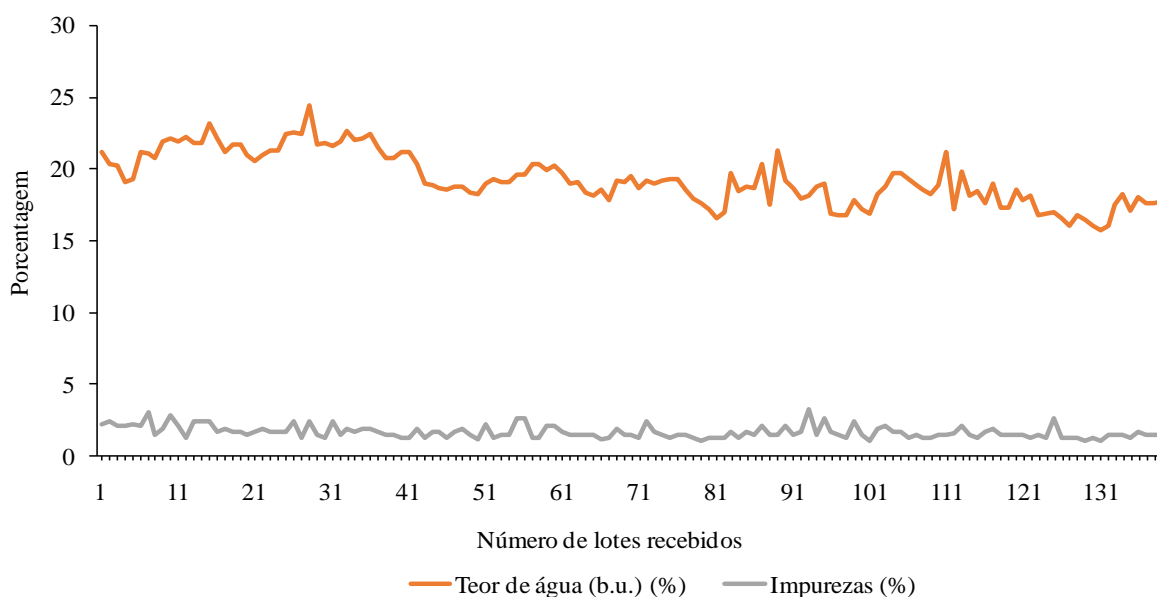


Figura 10 - Resultados do percentual de teores de água e impurezas dos lotes em processo de reneiramento submetidos a secagem e armazenagem no silo-secador 3.

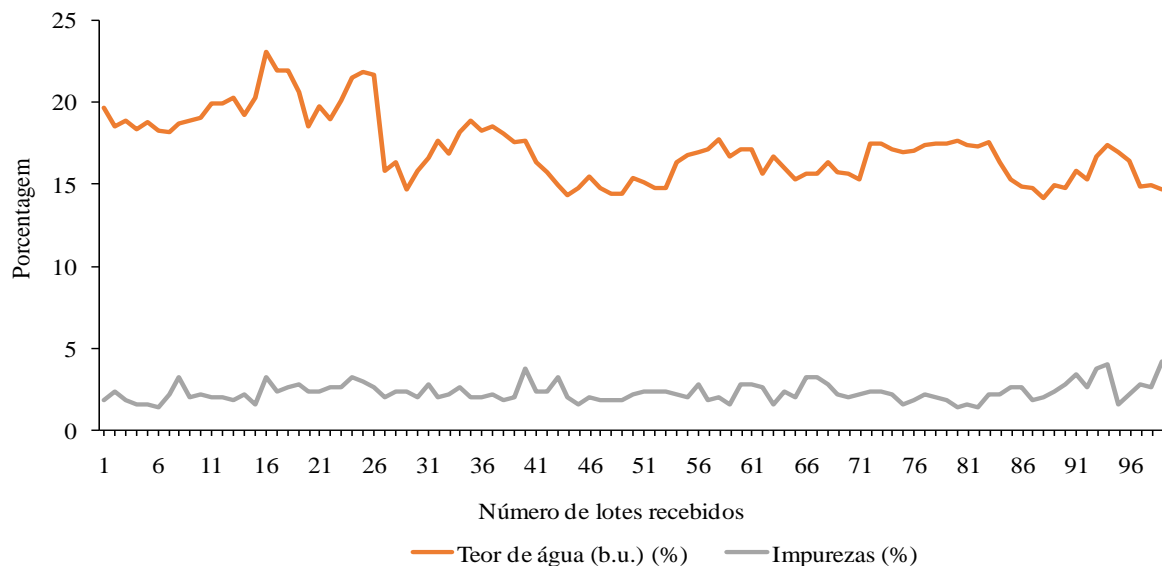


Figura 11 - Resultados do percentual de teores de água e impurezas dos lotes não reneirado submetidos à secagem e armazenagem no silo-secador 4.

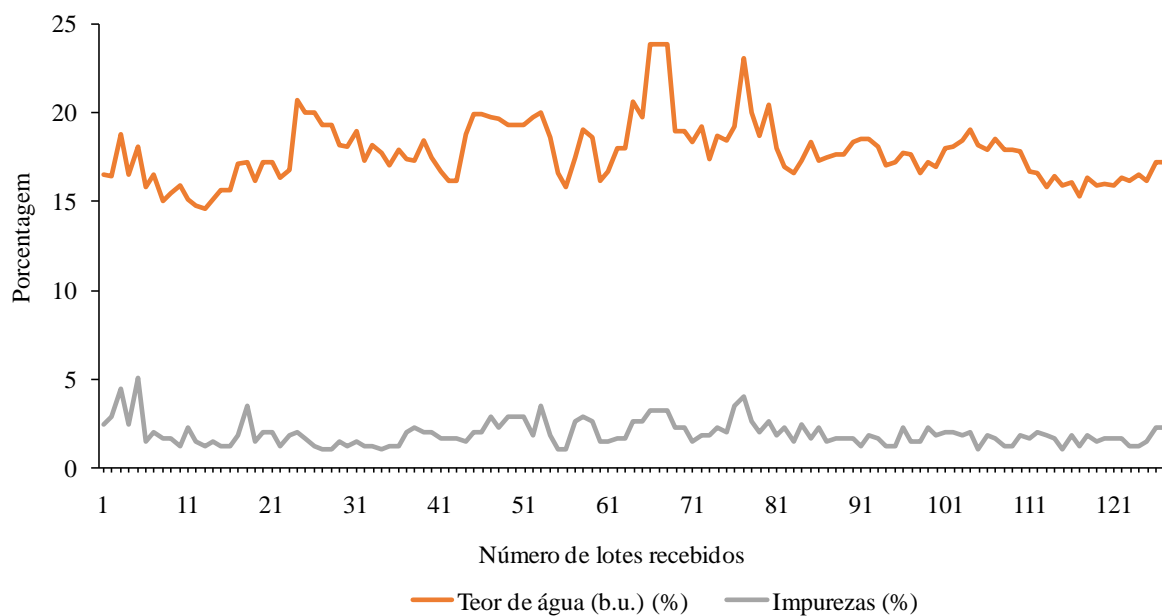
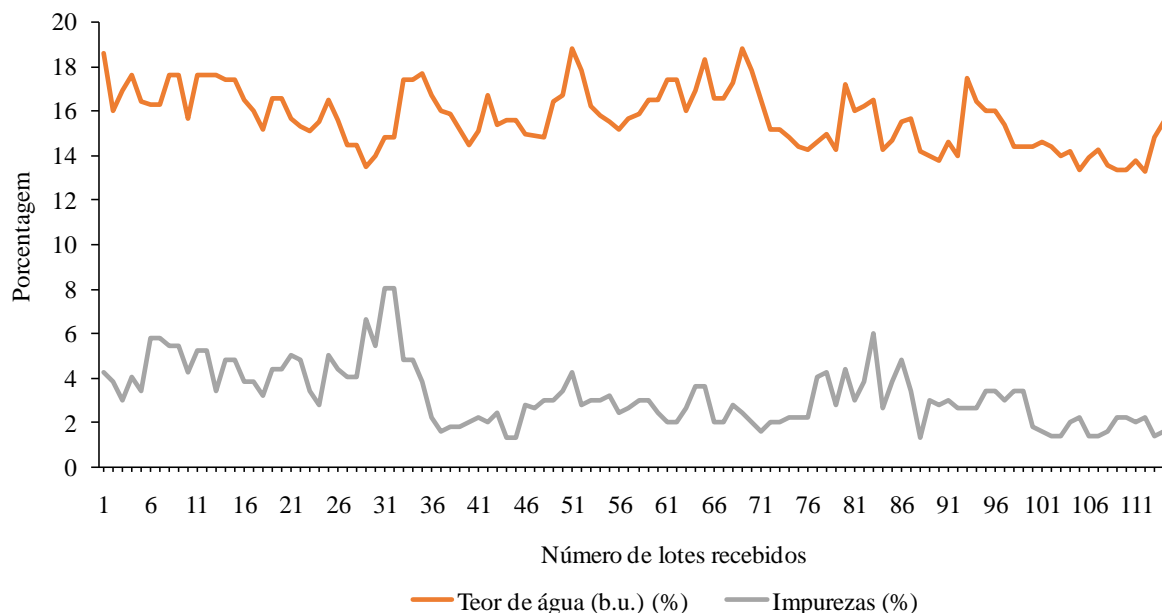




Figura 12 - Resultados do percentual de teores de água e impurezas dos lotes parcialmente repeneirado submetidos à secagem e armazenagem no silo-secador 5.



Os resultados de velocidades, vazões e fluxos de ar, temperaturas e umidade relativa do ar na entrada e na saída dos exaustores e acima da coluna de grãos armazenados estão apresentados nas Tabelas 13, 14, 15, 16 e 17. Nota-se que os silos-secadores com maiores porcentagens de impurezas na massa de grãos tiveram uma redução na pressão estática, possibilitando maior saída do ar em alguns pontos específicos, interferindo na distribuição do ar e na secagem. Franco et al. (2013) afirma que para a ocorrência de uma secagem correta, necessita-se que os grãos sejam devidamente limpos e distribuídos corretamente na armazenagem. A partir de estudos realizados em seu trabalho, Rocha (2020) explica que mudanças na resistência do fluxo de ar em determinadas regiões da massa armazenada pode causar redução na eficiência da operação.

É notável, também, que não se obteve uma padronização do processo de secagem, cada silo-secador teve seus valores independentes, mesmo o processo de simulação sendo igual para todos. O aquecimento do ar na saída dos exaustores não alterou a eficiência de secagem, com exceção do silo-secador 1 que teve maior velocidade e vazão do ar de secagem. Hoeltz (2005) afirma que o aquecimento do ar poderá contribuir com a velocidade e 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 seria necessário no processo.

Nos resultados obtidos, observou-se uma redução significativa do ar de entrada e saída do exaustor, chegando a 45%. Nos pontos superiores da massa de grãos, observou-se que 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 para operar o sistema de aeração, por ter influência direta no aumento significativo da pressão estática ao longo do tempo de armazenamento nos silos-secadores.

Tabela 13 - Velocidades, vazões e fluxos do ar antes e após exaustores e acima da coluna de grãos armazenados, no silo secador 1.

Variáveis	E	S - SA	S - CA	Cabos de termometria					
				Cabo 1	Cabo 2	Cabo 3	Cabo 4	Cabo 5	Cabo 6
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	-	-	-	-	-	-	-

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; SA – sem aquecimento do ar; CA – com aquecimento do ar.

Tabela 14 - Velocidades, vazões e fluxos do ar antes e após exaustores e acima da coluna de grãos armazenados, no silo secador 2.

Variáveis	E	S - SA	S - CA	Cabos de termometria					
				Cabo 1	Cabo 2	Cabo 3	Cabo 4	Cabo 5	Cabo 6
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	-	-	-	-	-	-	-

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; SA – sem aquecimento do ar; CA – com aquecimento do ar.

Tabela 15 - Velocidades, vazões e fluxos do ar antes e após exaustores e acima da coluna de grãos armazenados, no silo secador 3.

Variáveis	E	S - SA	S - CA	Cabos de termometria					
				Cabo 1	Cabo 2	Cabo 3	Cabo 4	Cabo 5	Cabo 6
V (m s <sup>-1</sup> )	20,60	12,22	12,22	0,00	0,01	0,0	0,00	0,00	0,00
Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	10,74	6,35	6,35	0,00	0,0007	0,0	0,00	0,00	0,00
F (m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> t <sup>-1</sup> )	0,45	0,26	0,26	0,00	0,00002	0,0	0,00	0,00	0,00
T (°C)	25,00	27,4	22,3	31,5	30,90	29,6	27,60	30,00	29,60
UR (%)	-	60,0	-	-	-	-	-	-	-

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; SA – sem aquecimento do ar; CA – com aquecimento do ar.

Tabela 16 - Velocidades, vazões e fluxos do ar antes e após exaustores e acima da coluna de grãos armazenados, no silo secador 4.

Variáveis	E	S - SA	S - CA	Cabos de termometria					
				Cabo 1	Cabo 2	Cabo 3	Cabo 4	Cabo 5	Cabo 6
V (m s <sup>-1</sup> )	21,20	16,20	16,20	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	11,02	8,42	8,42	0,002	0,0002	0,00	0,00	0,0002	0,0002
F (m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> t <sup>-1</sup> )	0,36	0,27	0,27	0,00007	0,00002	0,00	0,00	0,00002	0,00002
T (°C)	25,00	22,30	19,30	27,80	29,30	28,20	29,30	29,30	32,50
UR (%)	-	45,00	-	-	-	-	-	-	-

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; SA – sem aquecimento do ar; CA – com aquecimento do ar.

Tabela 17 - Velocidades, vazões e fluxos do ar antes e após exaustores e acima da coluna de grãos armazenados, no silo secador 5.

Variáveis	E	S - SA	S - CA	Cabos de termometria					
				Cabo 1	Cabo 2	Cabo 3	Cabo 4	Cabo 5	Cabo 6
V (m s <sup>-1</sup> )	23,40	15,5	15,1	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	12,17	8,06	8,06	0,00	0,00	0,002	0,00	0,00	0,00
F (m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> t <sup>-1</sup> )	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	-	-	-	-	-	-	-

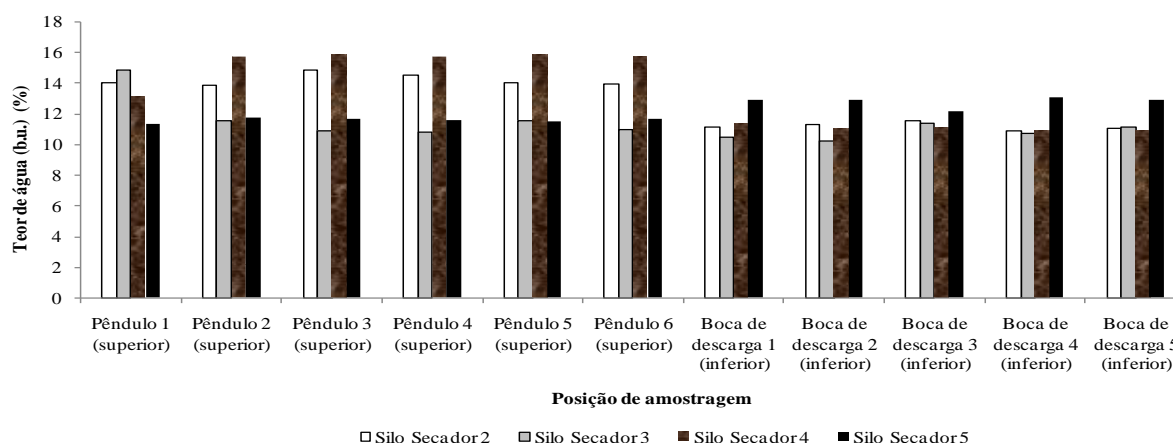
V – Velocidade do ar; Q - vazão de ar; F - fluxo de ar; T – temperatura do ar; UR – umidade relativa do ar; E – entrada do ar no exaustor; S – saída do ar do exaustor; SA – sem aquecimento do ar; CA – com aquecimento do ar.

Nas Figuras 13, 14, 15, e 16, 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.

Verificou-se que os teores de água dos grãos variaram conforme a posição de amostragem (Figura 13). Nas proximidades das bocas de descarga houve secagem dos grãos até alcançar a umidade de equilíbrio higroscópica de 12% (b.u.). Enquanto que, nas camadas superiores os grãos permaneceram com teores de água elevados chegando a 16% (b.u.), em função do baixo fluxo de ar. Os silos 3 e 5 apresentaram melhores resultados por de possuir as menores camadas de grãos, conseqüentemente menor pressão estática e facilitando a movimentação de ar. O silo 4 teve a maior diferença entre as camadas inferiores e superiores, por conta da maior camada de grãos e o não repeneiramento.

Sosbai (2018) alerta sobre o cuidado quanto a camada de grãos, visto que quanto maior ela for, necessita-se elevar a vazão de ar do sistema, para suprir a necessidade do fluxo de ar ideal por todo o silo. Visto que a vazão foi projetada de forma igual para todos os silos-secadores, é notável a redução de eficiência na secagem dos silos com maior camada de grãos. Lukaszuk et al. (2008) complementa que a altura da camada de grãos influencia no peso específico da massa de grãos, onde em alturas de 0, 0,95 e 1,9 metros obtiveram massas específicas aparentes diferentes, de 773, 790 e 810 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente.

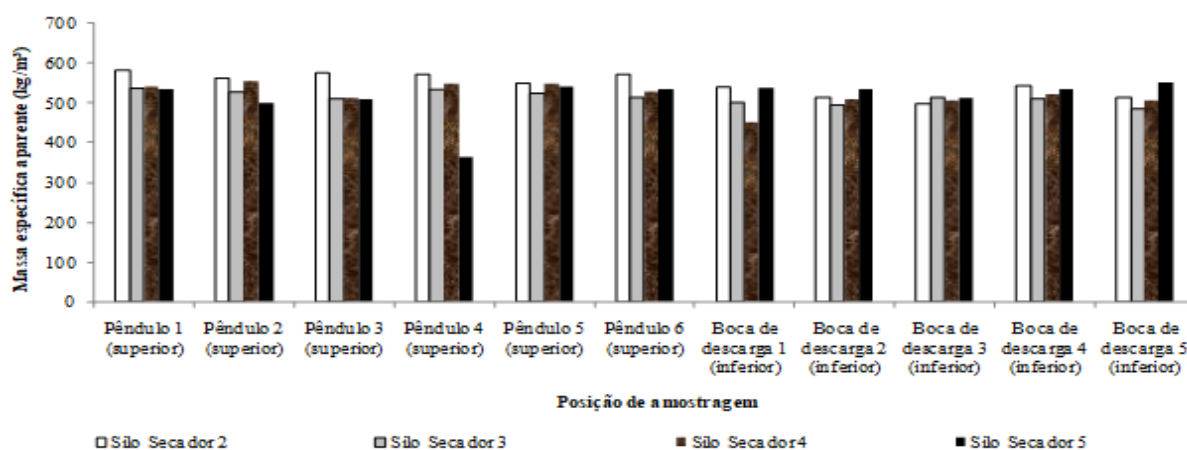
Figura 13 - Resultados dos teores de água dos grãos de arroz em casca amostrados nos cabos de termometria superiores e nas bocas de descargas inferiores dos silos secadores.



A massa específica aparente dos grãos variou de 500 a 550 kg m<sup>3</sup>, como apresentado na Figura 14. O aumento da massa específica é decorrente da segunda limpeza dos grãos (repeneiramento), reduzindo os índices de impurezas. Outro fator que influenciou nos resultados das amostras inferiores (boca de descarga) e das amostras superiores (pêndulo) foram os teores de água dos grãos.

As camadas superiores de grãos obtiveram teores de água mais elevados e maiores massas específicas, decorrentes da baixa eficiência do processo de secagem influenciadas pelas impurezas. 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. Comparando as amostras dos pêndulos, o silo-secador 2 teve maiores massas específicas por ter realizado o processo de repeneiração, reduzindo os percentuais de impurezas. Nas bocas de descarga os resultados foram similares aos pêndulos por serem as primeiras camadas a serem secas, diferente das camadas superiores onde o teor de água interferiu na massa específica dos grãos.

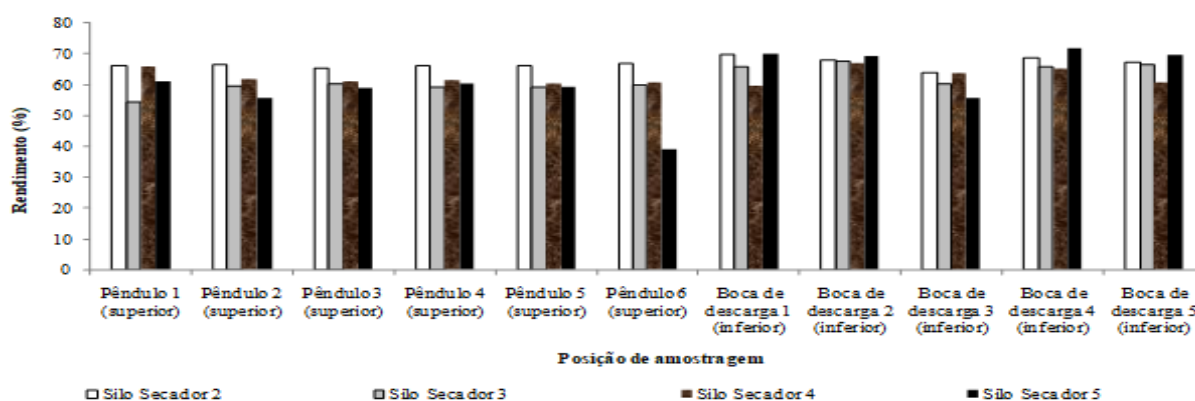
Figura 14 - Resultados da massa específica aparente dos grãos de arroz em casca amostrados nos cabos de termometria superiores e nas bocas de descargas inferiores dos silos secadores.



O arroz apresentou um bom rendimento de grãos inteiros, nos grãos com teores de água de 12% (b.u.), variando de 55% a 70% (Figura 15). De 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) fez estudos do rendimento de várias cultivares e obteve valores de rendimento de grãos inteiros próximos a 65%. Nos pêndulos, o silo-secador 4 obteve o melhor resultado,

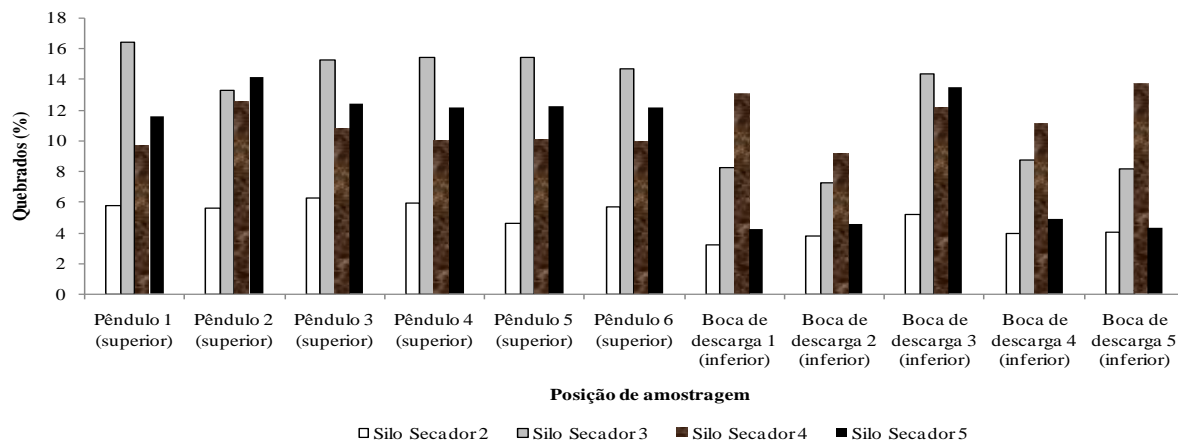
enquanto nas bocas de descarga os silos-secadores 2 e 5 os melhores. Essa variação ocorreu na diversificação da massa de grãos armazenados, resultando nas correntes de ar nos pontos com massa específica menor, ocasionando uma secagem ineficiente. Navarro et al. (2002), discute a ideia que a eficiência do desempenho da secagem aumenta com a uniformidade do fluxo de ar por todo o silo, garantindo a homogeneidade das amostras.

Figura 15 - Resultados 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.



No entanto, a Figura 16 caracterizou que os percentuais de grãos quebrados foram maiores nos pontos superiores da massa de grãos, onde os teores de água dos grãos foram mais elevados, contribuindo para a desestruturação dos grãos no processo de secagem. 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.

Figura 16 - Resultados de grãos quebrados de arroz após beneficiamento, amostrados nos cabos de termometria superiores e nas bocas de descargas inferiores dos silos secadores.



## **5 CONCLUSÕES**

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, chegando aos níveis de 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 postos específicos da massa de grãos, prejudicando a secagem e a qualidade dos grãos.

Portanto, os resultados obtidos no estudo concluem que para este caso específico o sistema silo-secador deve ter seu projeto revisto, já que apresenta baixa eficiência de secagem e qualidade dos grãos de arroz foi prejudicada, bem como, a manutenção de uma rotina de peneiramento, já que se mostrou eficaz no favorecimento da movimentação de ar ao longo da massa de grãos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimento a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Laboratório de Pós-Colheita (LAPOS) pelo apoio nas análises de qualidade realizadas no trabalho. Agradecimento aos produtores rurais de arroz pelo apoio e suporte estrutural para a realização das avaliações técnicas deste trabalho.



## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R. W. S. et al. Efeito do dióxido do carbono, temperatura e armazenamento sobre sementes de soja e microflora associada. **Revista Ciência Agronômica**. Fortaleza, CE, v. 43, n. 3, p. 554-560, 2012.
- ANTUNES, B. S. **Estudo do rendimento de engenharia das cultivares 409, puita e guri de arroz de arroz em secador piloto a 40°C**. 2017. 41 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, 2017.
- BORTOLOTTO, R. P. et al. **Tecnologia de sementes e fibras**: Teor de proteína e qualidade fisiológica de sementes de arroz. Campinas, SP, v. 67, n. 2, p. 513-520, 2008.
- BRAGANTINI, C.; EIFERT, E. C. Secagem e Beneficiamento. **Embrapa Arroz e Feijão**. 2. ed. Brasília, DF, cap. 15, p. 227-236, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa N° 6 de 18 de fevereiro de 2009, regulamenta a Lei nº 9.972, de 25 de maio de 2000. Regulamento Técnico do Arroz. Disponível em: <<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=visualizarAtoPortalMapa&chave=1687046295>>. Acesso em 5 de maio de 2020.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Sumário Executivo – Arroz em Casca**. Abril 2020. 9 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. 2. Ed. Brasília, DF, 398 p. 2009.
- CANABARRO, R. et al. Avaliação da temperatura da massa de grãos em cargas de arroz. In: 10° SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO PESQUISA E EXTENSÃO – SIEPE. Santana do Livramento/RS. **Anais...** Santana do Livramento/RS: Universidade Federal do Pampa, nov. 2018. 5 p.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Arroz: Mercado internacional**. Brasília, DF, 9 p, mar-abr. 2020.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **A cultura do arroz**. Brasil: Sumac/Gepin, 182 p, 2015.
- DA ROCHA, J. C. **Parâmetros industriais e tecnológicos do arroz na seca-aeração e no armazenamento**. 2010. 82 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Industrial) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2010.
- DE CASTRO, E. M. et al. **Qualidade de grãos em arroz**. Embrapa Arroz e Feijão. Circular Técnica, 34. Santo Antônio de Goiás, GO, 30 p, 1999.

EIFERT, E. C. Secagem, Armazenagem e Beneficiamento. **Recomendações Técnicas para a Cultura do Arroz irrigado no Mato Grosso do Sul**. Santo Antônio de Goiás, GO, p. 129-134, 2009.

ELIAS, M. C. et al. **Tecnologias de pré-armazenamento, armazenamento e conservação de grãos**. Polo de Inovação Tecnológica em Alimentos de Alimentos da Região Sul. Corede-Sul, 100 p., 2018.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Arroz: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. 2. ed., Brasília, DF, 252 p., 2013.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World Food Situation**. 02 abr. 2020. Disponível em: <<http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/>>. Acesso em: 02 abr. 2020.

FRANCO, D. F.; PETRINI, J. A. **Secagem do arroz**. Comunicado Técnico 145. Pelotas, RS, 2006. 4 p.

FRANCO, D. F. **Colheita, Secagem, Beneficiamento e Tratamento de Sementes de Arroz Irrigado**. Pelotas, RS, 33 p. dez. 2013.

HOELTZ, M. **Estudo da influência de manejos pós-colheita na incidência de fungos e micotoxinas no arroz (*Oryza sativa* L.)**. 2005. 88 p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola e do Ambiente) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – Tabelas 2019**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/lspa/tabelas>>. Acesso em 02 abr. 2020.

LOPES, M. F. L.; LOPES, A. M. **Aspectos qualitativos e nutricionais do arroz**. Belém, PA, p. 105-120, 2008.

LOURENSI, J. L. A. **Inovação tecnológica no processo de secagem de arroz em casca com baixas temperaturas**. 2014. 45 p. Trabalho de conclusão de Curso (Tecnólogo em Agronegócio) – Universidade Federal do Pampa, Dom Pedrito, RS, 2014.

LUKASZUK, P. et al. **Airflow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method**. J. Agric. Eng. Res. v. 54, n. 2, p. 50-57, 2008.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa MAPA nº 2 de 6 de fevereiro de 2012. **Normas Brasil**. Disponível em: <[https://www.normasbrasil.com.br/norma/instrucao-normativa-2-2012\\_236589.html](https://www.normasbrasil.com.br/norma/instrucao-normativa-2-2012_236589.html)>. Acesso em: 5 de maio de 2020.

MASSONI, P. F. S. et al. Influência de manejos pós-colheita do arroz irrigado sobre o banco de sementes de arroz-vermelho. **Planta Daninha**. Viçosa, MG, v. 31, n. 1, p.89-98, 2013.

MENEZES, N. L. et al. Temperaturas de secagem na integridade física, qualidade fisiológica e composição química de sementes de arroz. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. Goiânia, GO, v. 42, n. 4, p. 430-436, out/dez. 2012.

MINGOTTE, F. L. C. et al. Características físico-químicas do grão de cultivares de arroz em função da adubação nitrogenada. **Semina: Ciências Agrárias**. Londrina, v. 33, suplemento 1, p. 2605-2618, 2012.

MORAES, S. O.; RODRIGUES, V. C. **Secagem de alimentos**. Piracicaba, 5 p. 2006.

MULLER, A. **Influência das cultivares e níveis de adubação na qualidade física de grãos de arroz após beneficiamento**. 49 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, 2019.

NAVARRO, S.; NOYES, R. **The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management**. Boca Raton, 2002, 647p.

PEREIRA, C. E. et al. Qualidade física e fisiológica de sementes de arroz ao longo da linha de beneficiamento. **Semina: Ciência Agrárias**. Londrina, SP, v. 33, p. 2995-3002, 2012.

PRIETTO, L. **Operações de pós-colheita do arroz e seus impactos nos níveis de aflotoxinas B1, B2, G1, G2**. 2014. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, 2014.

ROCHA, J. C. **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**. 2020. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2020.

SANTOS, A. B. et al. **Arroz irrigado: Recomendações Técnicas para o Estado do Tocantins**. Circular Técnica 57. Santo Antônio de Goiás, 12 p. 2002.

SILVA, J. S. et al. Secagem e Secadores. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa, MG, cap. 5, p. 109-146, 2008.

SOARES, G. C.; PERES, L. A. **Secagem de arroz (*Oryza Sativa L.*) em escala piloto: avaliação de parâmetros do processo**. 2012. 71 f. Tese (Engenharia de Alimentos). Bagé, RS, 2012.

SOSBAI. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil**. In: XXXII REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, Farroupilha, RS, 2018. 205 p.

STORCK, C. R. **Variação na composição química em grãos de arroz submetidos a diferentes beneficiamentos**. 2004. 121 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004.

TUNER, A. P. et al. **Modeling the compressibility behavior of hard red wheat varieties Transactions of the ASABE**. v. 53, n. 3, p. 1029-1038, 2016.

VIEIRA, N. R. A. Qualidade de grãos e padrões de classificação. **Informe Agropecuário**. Santo Antônio de Goiás, GO. v. 25, n. 222, p. 94-100, 2004.

WALTER, M. et al. Arroz: Composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 38, n. 4, p. 1184-1192, jul. 2008.