

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**THAMIRIS DANIELLE CARVALHO GONÇALVES**

**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO OPERACIONAL DE UM SISTEMA  
DE SECAGEM A BAIXA TEMPERATURA**

**VIÇOSA – MG**

**2019**

**THAMIRIS DANIELLE CARVALHO GONÇALVES**

**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE SECAGEM A  
BAIXA TEMPERATURA**

**Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheira Agrícola e Ambiental.**

**Orientador: Prof. Luís César Silva**

**VIÇOSA – MG**

**2019**

**THAMIRIS DANIELLE CARVALHO GONÇALVES**

**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO OPERACIONAL DE UM SISTEMA DE  
SECAGEM A BAIXA TEMPERATURA**

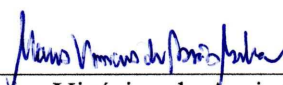
Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheira Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 04 de julho de 2019.



---

Profa.: Fernanda Campos de Sousa  
(Membro)  
(UFV)



---

Marcus Vinicius de Assis Silva  
(Membro)  
(UFV)



---

Prof.: Luis Cesar da Silva  
(Orientador)  
(UFV)

## RESUMO

A secagem de grãos visa à remoção de parte da água, o que propicia à armazenagem em condição ambiente e minimiza a ocorrência de fungos e consequentemente a metabolização de micotoxinas. Para arroz pode ser empregada à secagem a baixa temperatura. Nesse caso, o produto é acondicionado em silos, a temperatura do ar de secagem é no máximo 10 °C acima do ambiente e a intensidade do fluxo varia de 1,0 a 10 m<sup>3</sup> de ar. min<sup>-1</sup>.t<sup>-1</sup>. A secagem a baixa temperatura é recomendada para arroz devido às menores ocorrências de danos mecânicos e térmicos. O objetivo deste trabalho foi o dimensionamento e a avaliação por meio de simulação de um sistema de secagem para arroz. O sistema dimensionado teve por demanda o recebimento de 1.750 toneladas com teor de água de 20% b.u. E na avaliação foram comparados quatro cenários referentes ao enchimento dos silos em parcelas. De acordo com o dimensionamento, foi estimada a necessidade de quatro silos com diâmetro de 10,91 m, altura de cilindro 8,19 m e capacidade estática de 444 toneladas. Cada silo deverá dispor de dois ventiladores de 28,4 kW e dois queimadores de gás liquefeito de petróleo (GLP). Adotando como critérios de avaliação a máxima perda de matéria seca, tempo de secagem, tempo de uso do queimador de GLP, consumo de GLP, consumo de energia elétrica e consumo específico energia térmica, o melhor desempenho do sistema de secagem ocorreu para o cenário enchimento em duas parcelas.

**Palavras-chaves:** Modelagem e simulação. Modelo de Thompson. Perda de matéria seca.

## ABSTRACT

The drying of grains aims the removal of part of the water, allowing storage in the environment and minimizing the occurrence of fungi and consequently the metabolization of mycotoxins. Rice can be dried using low drying temperature. In this case the product is stored in silos, the drying air temperature varies up to 10 °C above the ambient air temperature, and the flow intensity from 1.0 to 10 m<sup>3</sup> of air. min<sup>-1</sup>.t<sup>-1</sup>. Low drying temperature is recommended for rice due to the lower occurrences of mechanical and thermal damages. Aiming to demonstrate the applicability of the low drying temperature, it was established as objective of this work the designing and evaluation, by means of simulation, a drying system for rice. The drying system was designed to receive 1,750 t with a moisture content of 20%. And in the evaluation four scenarios were compared concerning the filling of silos in parcels. According to the design, it was estimated the need of four silos with a diameter of 10.91 m, cylinder height of 8.19 m, and a static capacity of 444 t. Each silo should have two fans of 28.4 kW and two LPG burners. Considering as the evaluation criteria the maximum of dry matter loss, drying time, burner use time, LPG consumption, electric energy consumption and specific thermal energy consumption, the best performance of the drying system occurred for the scenario corresponding to the filling in two parcels.

**Keywords:** Dry matter loss. Modeling and simulation. Thompson model.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	3
2	OBJETIVO .....	5
2.1	Objetivo Geral.....	5
2.2	Objetivos Específicos.....	5
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	6
3.1	Dimensionamento do sistema .....	6
3.2	Capacidade estática.....	6
3.2.1	Cálculo da vazão de ar .....	7
3.2.2	Cálculo da perda de carga.....	7
3.2.3	Perda de carga real do sistema.....	7
3.2.4	Seleção do Ventilador.....	8
3.2.5	Dimensionamento dos dutos.....	8
3.3	Avaliação do sistema dimensionado.....	9
3.4	Definição dos cenários.....	13
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
4.1	Dimensionamento do sistema .....	15
4.2	Avaliação do sistema .....	15
5	CONCLUSÃO.....	18
	REFERÊNCIAS .....	20

## 1 INTRODUÇÃO

A base da alimentação da maioria dos brasileiros é composta por arroz e feijão, segundo Silveira (2019). De acordo com Walter (2008) e Barata (2005) o arroz é um dos cereais mais consumidos e produzidos no mundo. Walter (2008) ressalta que o cereal tem desempenhado em países em desenvolvimento um papel estratégico em nível social e econômico. Por consequência, a produção e o consumo de arroz devem ser avaliados em profundidade e monitorados para assegurar o suprimento e a segurança alimentar (BARATA, 2005).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) a safra de 2018/19 terá produção mundial de 501,39 milhões de toneladas de arroz beneficiado, o que corresponde a 5,9 milhões de toneladas a mais em relação à safra 2017/18. A produção de arroz nos países pertencentes ao Mercosul - Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai deve atingir 14,5 milhões toneladas de arroz em casca, e o Brasil é responsável por 75,71% dessa produção, onde a demanda anual é de aproximadamente 11 milhões de toneladas. Diferente do Brasil, a maior parte da produção dos demais países do bloco são para exportação e não o consumo. As exportações brasileiras, estimadas em 1,0 milhão de toneladas para a Safra 2018/19, os principais destinos países não pertencentes ao bloco, com destaque para nações africanas e latino-americanas (CONAB, 2019).

A secagem tem como objetivo remover parte da água contida no produto, possibilitando a antecipação da colheita, a redução da proliferação de microrganismos e insetos, redução da perda no campo e permitir o armazenamento por longo período em condições ambiente (SILVA et al, 2008). Existem várias classificações dos métodos de secagem, segundo Silva (2005), para grãos, os métodos de secagem são classificados em natural e artificial. A secagem natural ocorre no campo ou em terreiros empregando a radiação solar, enquanto a artificial consiste no emprego de artifícios para acelerar o processo, e é subdividida em secagem a baixa temperatura e alta temperatura. A secagem a alta temperatura pode ser realizada em secadores de leito fixo, de fluxos cruzados, de fluxos concorrentes, de fluxos contracorrentes e de fluxos misto. Em um sistema de secagem artificial a baixa temperatura o ar de secagem tem a temperatura no máximo 10 °C acima da temperatura ambiente. O tempo de secagem pode estender por dias em razão do fluxo de ar e da temperatura do ar de secagem. O enchimento do silo secador pode ser realizado em parcelas única ou fracionadas (SILVA et al., 2008). Quando

comparados, o enchimento por parcelas, normalmente, propicia menor tempo de secagem implicando em menor risco de deterioração do produto.

Para a proposição e avaliação de sistemas de secagem pode ser empregado a modelagem e simulação. De acordo com Silva et al. (2007), entre os modelos matemáticos aplicados a modelagem e simulação de sistemas de secagem de grãos, os modelos de Hukill e de Thompson são os mais utilizados.

O modelo de Thompson simula o processo de secagem baseado nas leis de transferência de energia e massa e equações empíricas de secagem em camadas. Na proposição do modelo usou-se, como artifício, a divisão do processo de secagem em vários subprocessos, considerando-se o leito de grãos formado por camadas de espessura reduzida, dispostas umas sobre as outras. Durante a simulação, as variações nas condições do ar e dos grãos são calculadas a cada incremento de tempo (SILVA et al 2007). Assim, quando o ar de secagem passa pela camada delgada de grãos, durante determinado intervalo de tempo. Nesse intervalo de tempo, a temperatura do ar diminui em consequência do aumento na temperatura dos grãos e do resfriamento evaporativo de vapor de água proveniente da massa de grãos (SILVA et al 2008).

A modelagem e simulação de sistemas de secagem possibilita a avaliação e a definição de estratégias na operação sem demandar a condução de experimentos em campo, que, normalmente, requerem o emprego de protótipos, quantitativos de produtos e recursos humanos e financeiros. No entanto, o emprego de modelos de simulação requer que os mesmos estejam verificados e validados para a condução de experimentos, como comparação de cenários, análise de sensibilidade, otimização e simulação de Monte Carlo (SILVA et al 2012).

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo Geral**

Dimensionar e avaliar o desempenho de um sistema de secagem a baixa temperatura para arroz com casca utilizando o modelo de Thompson.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Dimensionar um sistema de secagem a baixa temperatura para grãos de arroz em casca;
- Determinar estratégias de enchimento de um silo secador por meio de simulação.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O dimensionamento foi realizado para secagem a baixa temperatura de arroz no município de Santo Antônio da Patrulha, Rio Grande do Sul. Em que a temperatura ambiente média é de 18,9 °C e pressão atmosférica de 735 mmHg e altitude de 131 m. Para o produto foi considerado massa específica de 580 kg.m<sup>-3</sup> e teor de água de 20% b.u. O período de colheita e consequentemente a secagem do arroz, no estado, ocorre entre os meses de fevereiro a maio, segundo a Companhia Nacional de abastecimento – Conab (2017). Para o presente trabalho o período de secagem ocorreu entre 13 de março a 4 de abril de 2019. Para garantir que toda a massa de produto receba a mesma intensidade do fluxo do ar de secagem, a parte superior da camada de grão é aplainada.

#### 3.1 Dimensionamento do sistema

#### 3.2 Capacidade estática

O dimensionamento do silo foi para receber 1750 toneladas de arroz com casca, considerando a massa específica do produto de 580 kg.m<sup>-3</sup> e sacas de 50 kg. O volume do silo foi calculado segundo a capacidade estática requerida e da massa específica do arroz e a partir do modelo escolhido e do seu diâmetro foi calculada a área da base. Por fim, mediante a razão entre os valores encontrados de volume e a área da base, calculou-se a altura total necessária.

Segundo informações do catálogo da Kepler Weber, cada anel tem 0,91 m de altura, sendo assim o número de anéis é dado pela razão entre a altura total encontrada e a altura de cada anel. Em sistema de secagem à baixa temperatura não se recomenda silos com grandes alturas, pois isto acarreta em alta perda de matéria seca, por isto, optou-se por utilizar vários silos ao invés de apenas um. Sendo assim, cada silo tem altura correspondente ao produto do número de anéis e da altura do anel.

### 3.2.1 Cálculo da vazão de ar

A vazão de ar é calculada a partir da vazão específica do ar ( $\text{m}^3$  de  $\text{ar} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ ) e a capacidade estática do silo, em toneladas. A vazão específica do ar recomendado por Silva (2007) está entre 1 a  $10 \text{ m}^3$  de  $\text{ar} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ . A vazão de ar foi calculada adotando a vazão específica de  $1,5 \text{ m}^3$  de  $\text{ar} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ .

### 3.2.2 Cálculo da perda de carga

Para o cálculo de perda de carga foi utilizado a equação de Hukill (1955), Equação 1, primeiro foi calculado o fluxo de ar por área ( $\text{m}^3$  de  $\text{ar} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ) que é dado pela razão entre a vazão de ar ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) e a área da base do silo ( $\text{m}^2$ ), os parâmetros “a” e “b” são relativos da cultura, para o arroz equivalem a 7,139 e 0,22, respectivamente.

$$P_{cg} = \left( \frac{a \times F^2}{\ln(1 + b \times F)} \right) \times H_g \quad (1)$$

em que:

Q= vazão,  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ;

$P_{cg}$  – perda de carga imposta pela coluna de grãos, Pa;

F – fluxo de ar,  $\text{m}^3$  de  $\text{ar} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ;

$H_g$  – altura da coluna de grãos, m;

a – constante definida em função do tipo de grão,  $\text{Pa} \cdot \text{min}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  ;

b – constante definida em função do tipo de grão,  $\text{m}^2 \cdot \text{min} \cdot \text{m}^{-3}$  .

### 3.2.3 Perda de carga real do sistema

A perda de carga do sistema é dada pelo produto da perda de carga e do fator de majoração, devido à perda de carga que ocorre nos dutos adotou-se perda de carga de 10%. Sendo assim, o fator de majoração foi de 1,1.

### 3.2.4 Seleção do Ventilador

Para escolher o modelo do ventilador foi utilizado o software Vortex 1.3 disponibilizado pela empresa Otam Ventiladores LTDA, o programa seleciona o modelo mais adequado após inserir a temperatura média e a pressão atmosférica do local, a vazão e a pressão estática, que corresponde a perda de carga calculada. Para o caso específico deste trabalho optou-se por utilizar dois ventiladores, sendo assim a vazão a ser inserida no software corresponde à metade do valor encontrada nos cálculos.

### 3.2.5 Dimensionamento dos dutos

A partir da vazão e da velocidade do ar pela chapa perfurada foi calculada a área de chapa. Para distribuição de ar nos dutos recomenda-se, para silos, velocidade entre 6,0 a 15,0 m/min. Adotou-se o valor de 13 m.min<sup>-1</sup>, sendo assim a área de chapa foi de 51,24 m<sup>2</sup>. O comprimento do duto de distribuição do ar foi obtido a partir da largura do duto de distribuição, adotou-se 0,5m, e pela área de chapa. Logo a extensão total do duto de alimentação foi de 102,48m. Optou-se pela alocação de 14 dutos de distribuição, as especificações dos mesmos estão explicitas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensões dos dutos de distribuição de ar

Comprimento (m)	Número de dutos
14,24	2
9,81	2
9,23	2
8,44	2
7,37	2
5,88	2
3,51	2

Fontes: Elaborada pelos autores.

No duto principal passa toda a vazão a ser distribuída aos 14 dutos de distribuição, em silos, a velocidade do ar recomendada é 610 m/min. A área de duto foi obtida pela razão entre a vazão e a velocidade de ar. Sendo assim, a seção do duto principal é de 1,092 m<sup>2</sup>. Para o duto

principal, adotou-se largura de 1,5 m. Desse modo, tem-se que a altura do duto principal foi de 0,728m.

### 3.3 Avaliação do sistema dimensionado

Para a simulação dos cenários foi utilizado o programa “SecaBaixaTemperatura”, desenvolvido por Venturin (2019). O programa possui cinco janelas de diálogo: “Ar Secagem”, “Configuração do Silo Secador”, “Programação do Enchimento”, “Simulação” e “Resultados”. Na primeira janela foram inseridos os dados referentes as características do local em que os silos estão (Figura 2).

Figura 2 - Janela de diálogo "Ar de secagem"

Simulador de secagem a baixa temperatura.

**SecaBaixaTemperatura Arroz com casca** [Ajuda] [Créditos] [Fechar]

Ar de Secagem | Configuração do Silo Secador | Programação do Enchimento | Simulação | Resultados | Monitor

**Condições Ambiente**

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

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

**Uso de Energia**

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

Poder calorífico do GLP (kcal/kg): 11000

[Pré-definido] [Limpar] [Calcular]

Ar ambiente / Ar aquecido

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

Fonte: Autores, vista do programa.

Foram necessários inserir:

- (i) temperatura e umidade relativa do ar ambiente, podendo adicionar até cinco períodos com diferentes médias;
- (ii) altitude da localização do sistema de secagem;

- (iii) umidade de equilíbrio desejada, que corresponde ao teor de água final;
- (iv) informações do horário de ponta do uso de energia elétrica; e
- (v) o poder calorífico do gás.

O usuário deve inserir os dados solicitados pelo programa e selecionar “Calcular”, o programa gera um relatório com alguns parâmetros (Figura 2), entre eles, o aquecimento necessário, a umidade de aquecimento e a temperatura de bulbo úmido.

Na próxima janela, intitulada “Configuração do Silo Secador” (Figura 3) primeiramente escolhe-se o produto a ser seco (milho, arroz com casca, soja ou trigo) e o programa preenche automaticamente os valores de massa específica e teor de água final ideal. Posteriormente deve-se informar as características referentes ao silo secador, ao ventilador e ao queimador de gás. Como resultados são apresentados: a capacidade estática do silo, a vazão do ar de secagem, a perda de carga, área da base e o volume total do silo.

Figura 3 - Janela de diálogo "Configuração do silo secador"

Fonte: Autores, vista do programa.

Na janela seguinte, nomeada “Programação do Enchimento” (Figura 4) deve-se informar o cenário em que se pretende encher o silo sendo possível dividir em até sete parcelas. Para cada uma delas devem ser inseridas as datas e horários do depósito do grão no silo, os teores de água iniciais do produto ( $U_i$ ) e as quantidades em sacas.

Figura 4 - Janela de diálogo "Programação do enchimento"

Simulador de secagem a baixa temperatura.

**SecaBaixaTemperatura Arroz com casca** Ajuda Créditos Fechar

Ar de Secagem | Configuração do Silo Secador | **Programação do Enchimento** | Simulação | Resultados | Monitor

**Limpar**

Parcelas	Dia / Mês	HH:MM	U <sub>i</sub> (%)	Sacas
<input checked="" type="checkbox"/> 1	13 / 3	8 : 0	20.0	8882
<input type="checkbox"/> 2	/	:		
<input type="checkbox"/> 3	/	:		
<input type="checkbox"/> 4	/	:		
<input type="checkbox"/> 5	/	:		
<input type="checkbox"/> 6	/	:		
<input type="checkbox"/> 7	/	:		

Sacas 50 kg  Fixar aquecimento pelos ventiladores em + (°C)  
 Sacas 60 kg

Cenário I Cenário II Limpar  
Cenário III Cenário IV Calcular

**Vazões / Pressão estática / Aquecimento ventilador**

Camada	m	m <sup>3</sup> /min	mm ca	t	Sacas	+°C	Horas	U <sub>i</sub> (%)	T <sub>qi</sub> (°C)
14	8,19	713,93	388,12	444,10	8882,00	2,06	1736,00	20,00	18,63
13	7,61	736,64	376,15	412,38	8247,57	2,00	1736,00	20,00	18,63
12	7,02	761,92	363,67	380,66	7613,14	1,93	1736,00	20,00	18,63
11	6,44	790,32	350,60	348,94	6978,71	1,86	1736,00	20,00	18,63
10	5,85	822,55	336,87	317,21	6344,29	1,79	1736,00	20,00	18,63
9	5,27	859,60	322,35	285,49	5709,86	1,71	1736,00	20,00	18,63
8	4,68	902,85	306,90	253,77	5075,43	1,63	1736,00	20,00	18,63
7	4,10	954,34	290,35	222,05	4441,00	1,54	1736,00	20,00	18,63
6	3,51	1017,17	272,41	190,33	3806,57	1,45	1736,00	20,00	18,63
5	2,93	1096,46	252,71	158,61	3172,14	1,34	1736,00	20,00	18,63
4	2,34	1201,36	230,65	126,89	2537,71	1,22	1736,00	20,00	18,63
3	1,76	1350,47	205,18	95,16	1903,29	1,09	1736,00	20,00	18,63
2	1,17	1590,28	174,24	63,44	1268,86	0,92	1736,00	20,00	18,63
1	0,59	2095,32	132,24	31,72	634,43	0,70	1736,00	20,00	18,63

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

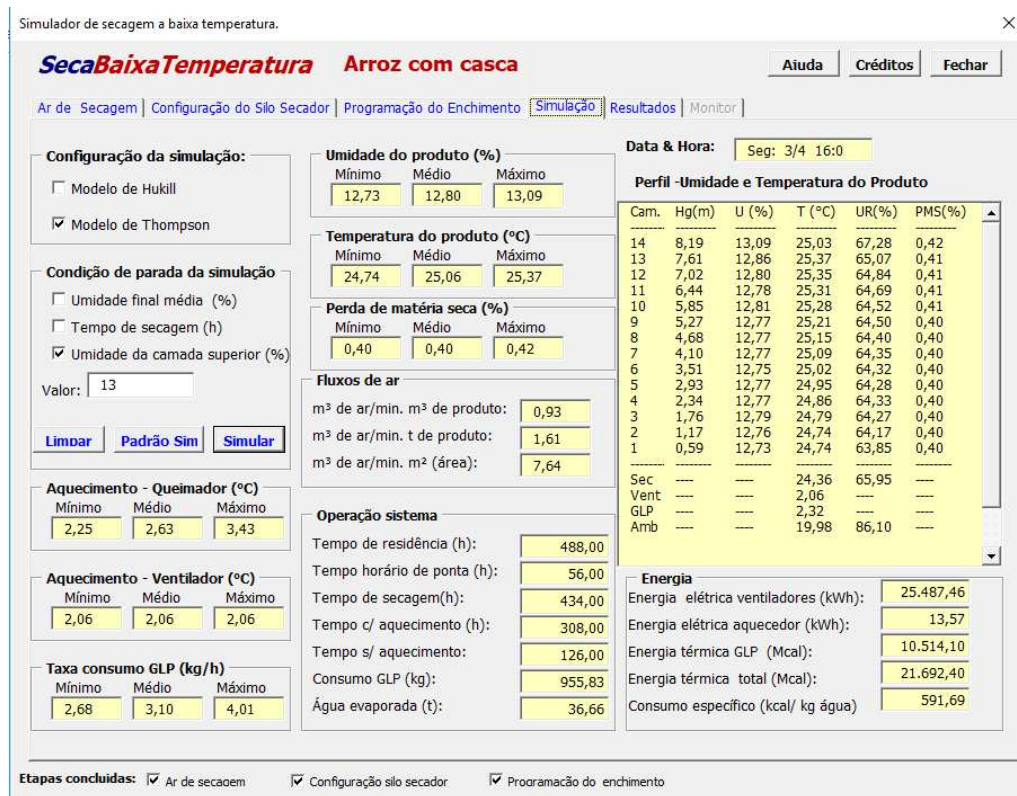
Fonte: Autores, vista do programa.

A partir dos dados inseridos, o programa divide as parcelas em 14 camadas para a aplicação do Modelo de Thompson. Em relação a cada coluna são apresentados os resultados, respectivamente:

- (i) altura do posicionamento da camada no silo;
- (ii) vazão do ar de secagem;
- (iii) pressão estática;
- (iv) quantidade de produto em toneladas;
- (v) quantidade de produto em sacas;
- (vi) aquecimento do ar promovido pelos ventiladores;
- (vii) o horário do evento de adição da camada em relação ao ano (total de 8760 horas);
- (viii) teor de água inicial; e
- (ix) temperatura inicial da camada.

A janela de diálogo “Simulação” (Figura 5) é empregada para condução da simulação segundo o Modelo de Thompson para a secagem em baixas temperaturas. Nessa janela foi selecionado o critério de parada da simulação, optou-se pela “Umidade da camada superior”, que encerra a simulação quando a última camada atingiu o valor de umidade especificado.

Figura 5 - Janela “Simulação” do programa “SecaBaixaTemperatura”



Fonte: Autores, vista do programa.

Na figura 5, o programa apresentou o resultado do processo de secagem, tais como a temperatura de aquecimento do queimador e do ventilador, a taxa de consumo de gás GLP e a perda de matéria seca. Na Figura 5, é apresentada a aba “Perfil - Umidade e Temperatura do Produto” apresenta a altura de grãos (Hg), o teor de água (U), a temperatura dos grãos (T), a umidade relativa do ar de exaustão (UR) e a perda de matéria seca (PMS) correspondente a cada camada do silo.

Na última janela do programa (Figura 6) encontram-se os resultados finais para cada parcela pela qual foi dividido o enchimento do silo.

Figura 6 - Janela “Resultado” do programa “SecaBaixaTemperatura”

Propriedades	Parcela #1	Parcela #2	Parcela #3	Parcela #4	Parcela #5	Parcela #6	Parcela #7	Total/Médias
Nº de camadas	14,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,00
Altura da Parcela (m)	8,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,19
Quantidade úmida (t)	444,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	444,10
Quantidade seca (t)	407,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	407,44
Água evaporada (t)	36,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36,66
Perda matéria seca (%)	0,40 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,40 <sup>1</sup>
Perda supersecagem(t)	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,96
Tempo de residência (h)	488,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Exposição ao fluxo de ar(h)	352,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tempo horário de Ponta (h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	56,00
Tempo c/ aquecimento (h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	308,00
Tempo s/ aquecimento (h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	126,00
Umidade máxima (%)	13,09 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	13,09 <sup>1</sup>
Umidade média (%)	12,80 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	12,80 <sup>1</sup>
Umidade mínima(%)	12,73 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	12,73 <sup>1</sup>
Temperatura máxima (°C)	25,37 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	25,37 <sup>1</sup>
Temperatura média (°C)	25,06 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	25,06 <sup>1</sup>
Temperatura mínima(°C)	24,74 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	0,00 <sup>1</sup>	24,74 <sup>1</sup>
Consumo GLP(kg)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	955,83
Energia elétrica-tota(kWh)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25501,03

<sup>1</sup>: Valores médios

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

Fonte: Autores, vista do programa.

### 3.4 Definição dos cenários

Em muitos casos parcelar o enchimento do silo gera economia de energia e consequentemente menor custo no processo de secagem. Sendo assim, utilizando o programa “SecaBaixaTemperatura”, foram definidos os seguintes cenários: I – etapa única, correspondendo a 100% da capacidade estática do silo; II – duas parcelas, cada uma correspondendo a 50%; III – três parcelas, cada uma correspondendo a 33% e IV – quatro parcelas, cada uma correspondendo a 25%.

O programa SecaBaixaTemperatura informa diversos parâmetros do sistema de secagem que podem ser considerada em estudos de avaliação, para o presente trabalho foram selecionados os seguintes parâmetros: (i) máxima perda de matéria seca; (ii) tempo de secagem; (iii) tempo com aquecimento; (iv) consumo de GLP; (v) consumo de energia elétrica dos ventiladores e queimadores de GLP e (vi) consumo específico de energia térmica. A escolha desses parâmetros se deve à relação com os custos de secagem.

Os valores dos parâmetros foram avaliados para cada cenário. Para otimização foi elaborada uma matriz de ponderação considerando notas de 0 a 100. Para cada parâmetro a nota 100 correspondeu ao menor valor, que foi utilizado para o cálculo das notas ponderadas ( $N_p$ ). A partir da matriz de ponderação foram calculadas e comparadas as médias aritméticas para cada cenário.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Dimensionamento do sistema

Sendo assim, foram necessário quatro silos, Modelo 36 da marca Kepler Weber com as seguintes características: 10,91m de diâmetro, nove anéis, altura total de 8,19 m, volume de 3017,24 m<sup>3</sup> e área da base de 93,48 m<sup>2</sup>.

A vazão de ar, em cada silo, foi calculada para a vazão específica de 1,5 m<sup>3</sup> de ar. min<sup>-1</sup>.t<sup>-1</sup> de produto e a capacidade estática de 444,07 t. Desse modo, foi obtida a vazão de 666,10 m<sup>3</sup> de ar. min<sup>-1</sup> e utilizando a equação 1 foi calculada a perda de carga, 3148 Pa (353,35 mmca). Considerando as curvas características de ventiladores da marca Otam, a vazão e perda de carga calculada foram selecionados dois ventiladores modelo FMD630 classe III, diâmetro de rotor de 630 mm, rotação de 2951 rpm, potência de 39,94 cv e rendimento de 77,48% (Figura 7).

Figura 7 - Dados do ventilador escolhido

VORTEX 1.3 - OTAM Ventiladores Industriais LTDA

Condições de Operação: Temperatura (°C): 18,90; Pressão Atmosférica (mmHg): 735; Tipo de Fluido:  Ar  Outros

Condições de Seleção: Vazão (m³/h): 19.984; Pressão Estática (mmca): 453,4; Linha do Ventilador: FMD

	DIAM	VEL_DESC.(m/s)	REND.(%)	RPM	VEL_PERIF.(m/s)	POT_ABS.(cv)
1)	710	13,14	81,17	2553	94,91	42,28
2)	630	16,69	87,11	2951	97,36	39,94

Ventilador: FMD 630 CLASSE III

Temperatura de Operação:	19 °C	Velocidade de Descarga:	16,69 m/s
Pressão Barométrica:	735 mmHg	Rendimento:	87,11 %
Densidade do Fluido:	1,170 kg/m³	Rotação:	2951 rpm
Vazão:	19.984 m³/h	Potência Absorvida (ST):	41,13 cv
Pressão Estática (SE):	453,4 mmca	Potência Absorvida (SE):	39,94 cv
Pressão Total (SE):	470,0 mmca	Velocidade Periférica:	97,36 m/s
Pressão Total (ST):	484,0 mmca	Pressão Sonora (1m) C.L.:	99 dBA
Pressão Estática (ST):	466,9 mmca		

Fonte: Vista do programa Vortex 1.3.

### 4.2 Avaliação do sistema

Foram considerados quatro cenários para a análise de perda de carga e consumo de energia, representados na Tabela 2, nela também se encontra o valor mínimo de cada item, os

quais foram utilizados para gerar a matriz de ponderação. Na Tabela 3 estão apresentados os indicadores em base 100 e a média de cada cenário.

Tabela 2 - Valores dos indicadores de comparação obtidos por meio da simulação

Indicadores de comparação	Cenários				Mínimo
	I	II	III	IV	
Máxima perda de matéria seca (%)	0,42	0,38	0,39	0,46	0,38
Tempo de secagem (h)	434	396	410	536	396
Tempo com aquecimento (h)	308	282	290	380	282
Consumo de GLP (kg)	955,83	1028,9	1180,88	1758,32	955,83
Consumo de energia elétrica (kWh) <sup>(1)</sup>	25501,03	23268,27	24090,79	31494,35	23268,27
Consumo específico energia térmica (kcal/kg água)	591,6	585,26	643,57	905,36	585,26

<sup>(1)</sup> Consumo de energia elétrica dos ventiladores e queimadores de GLP.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 3 - Matriz de ponderação para os Cenários I, II, III e IV

Parâmetros	Cenários			
	I	II	III	IV
Máxima perda de matéria seca	90,48	100,00	97,44	82,61
Tempo de secagem	91,24	100,00	96,59	73,88
Tempo com aquecimento	91,56	100,00	97,24	74,21
Consumo de GLP	100,00	92,90	80,94	54,36
Consumo de energia elétrica <sup>(1)</sup>	91,24	100,00	96,59	73,88
Consumo específico energia térmica	98,93	100,00	90,94	64,64
Média	93,91	98,82	93,29	70,60
Classificação	2°	1°	3°	4°

<sup>(1)</sup> Consumo de energia elétrica dos ventiladores e queimadores de GLP.

Fonte: Elaborada pelos autores.

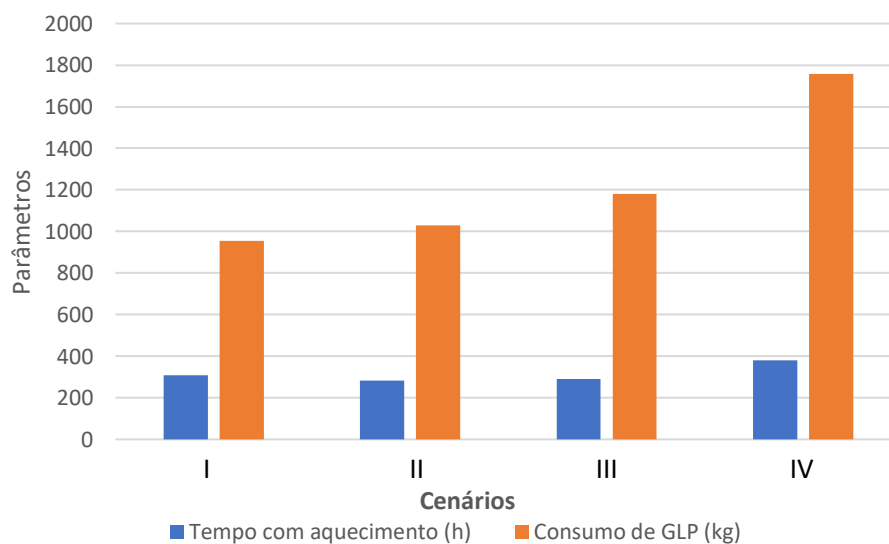
Ao utilizar a matriz de ponderação, observou-se que o cenário II apresentou média de 98,82%, o que corresponde à maior média dos parâmetros. Isso implica que para as características do silo e do produto a ser seco é a melhor estratégia de enchimento entre as quatro propostas. E o cenário IV é o pior dentre eles, por apresentar a menor média. Era

esperado que o enchimento em parcelas apresentasse menores perdas de matéria seca quando comparado ao enchimento em única parcela, uma vez que ao inserir uma nova parcela de grãos, a umidade do produto já se encontra em equilíbrio com o ar de secagem.

Porém o cenário III e IV apresentaram comportamento diferente ao esperado, em razão das características do silo, afinal o alto fluxo de ar ( $7,13 \text{ m}^3 \text{ de ar m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ) para uma camada espessa tem como consequência a supersecagem do grão e maior perda matéria seca. O custo elevado de energia nos cenários III e IV deve-se ao fato que o ar de secagem após passar pela altura de grão depositada no silo ainda possuía potencial de secagem. Venturin (2019) observou que existia uma correlação entre o tempo de secagem e o consumo de energia elétrica, ou seja, à medida que o primeiro aumenta o segundo também cresce. Observou-se que estes parâmetros amplificaram à medida que o número de parcelas crescia, ao comparar os cenários II, III e IV.

O consumo de GLP aumentou à medida que ampliava o número de parcelas, Figura 8. Venturin (2019) obteve resultado semelhante ao encontrado no presente estudo, entretanto o tempo com aquecimento não diminuiu à medida que aumentava o número de parcelas, ao comparar os Cenários II, III e IV.

Figura 8 - Gráfico de consumo de GLP e tempo de aquecimento em função aos cenários



Fonte: Elaborada pelos autores.

Venturin (2019) justifica que o crescimento do consumo de gás GLP e decréscimo do tempo de aquecimento deve-se de que o ar de exaustão ainda possuía potencial de secagem ao passar pela camada de grãos.

Considerando o preço de energia elétrica de R\$ 0,50162.kWh<sup>-1</sup> e o consumo do Cenário I de 3268,27 kWh, tem-se que o custo de energia elétrica para cada silo foi de R\$11.671,83 quando comparado como o cenário IV, que consumiu 31494,35 kWh, o valor seria de R\$15.798,19. Ou seja, uma diferença de R\$ 4.126,36 em cada silo, quando se opta pelo Cenário I ao invés do IV. Considerando o valor do gás GLP é de R\$ 4,20.kg<sup>-1</sup>, no cenário I foi de 1028,9 kg sendo assim o custo com gás GLP foi de R\$4.321,38. E no cenário IV o custo foi de R\$7.455,28.

Como pode-se perceber na Tabela 3 o valor de consumo de gás GLP no cenário I apresentou valor menor quando comparado ao cenário II, entretanto o custo total em II foi menor dentre todos os cenários. Ao comparar os custos totais de cada cenário a economia ao escolher o cenário II pode ser de até 45%.

Tabela 4 - Custo com energia e gás GLP

Parâmetros	Cenários			
	I	II	II	IV
Custo com GLP (R\$)	4014,49	4321,38	4959,70	7384,94
Custo com energia elétrica (R\$)	12791,83	11671,83	12084,42	15798,2
Custo total (R\$)	16806,31	15993,21	17044,12	23183,14
Custo total (4 silos) (R\$)	67225,25	63972,84	68176,47	92732,56

Fonte: Elaborada pelos autores.

## 5 CONCLUSÃO

Para atender a demanda de secagem de 35 mil sacas de arroz com casca foram necessários quatro silos com diâmetro de 10,91 m, altura do cilindro do silo de 8,19 m e dois ventiladores com 29,42 kW de potência para cada silo da fabricante Otam modelo FMD630 classe III e rotação de 2951 rpm, totalizando oito silos.

Análises realizadas por meio de simulação considerando a perda de matéria seca, tempo de secagem, tempo de aquecimento, custos com energia térmica e elétrica, apontaram que a melhor estratégia operacional correspondeu ao enchimento do silo secador em duas parcelas com 50% da capacidade estática.

## REFERÊNCIAS

BARATA, T. S. **Caracterização do consumo de arroz no Brasil: um estudo na região metropolitana de porto alegre dissertação**. 2005. 91f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) – Programa de Pós-graduação em Agronegócio, Centro de Estudo e Pesquisas em Agronegócios, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2005.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil**. 2017. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/outras-publicacoes/item/7694-calendario-agricola-plantio-e-colheita>>. Acesso em: 23 de junho de 2019

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Safra de grãos mantém aumento de área e produção está em 234 milhões de t**. 2019. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/2694-safra-de-graos-mantem-aumento-de-area-e-producao-esta-em-234-milhoes-de-t>>. Acesso em: 16 de abril de 2019.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Análise mensal – Março/Abril 2019**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-arroz>>. Acesso em: 23 de junho de 2019.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). **Participa de painel sobre a agricultura brasileira durante conferência internacional sobre fertilizantes**. 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/1098805/>>. Acesso em: 16 de abril de 2019.

HUKILL, W. V.; SHEDD, C. K. **Non-linear air flow in grain drying**. Agricultural Engineering, v.36, n. 7, p. 462-466, 1995.

SILVA, J. S.; QUEIROZ, D. M.; LOPES, D. C.; SOUSA, F. F. **Estudo da secagem em camada espessa**. Viçosa, MG, cap. 6, p. 147-178. 2007.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S.M.L.; NOGUEIRA, R. M. **Secagem e secadores**. In: SILVA, J.S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa: Aprenda Fácil, cap. 5, p. 109-146. 2008.

SILVA, L. C.; QUEIROZ, D. M.; FLORES, R. A.; MELO, E. C. **A simulation toolset for modeling grain storage facilities**. Journal of Stored Products Research, v.48, p. 30-36, 2012.

SILVEIRA, D. **IBGE prevê aumento de 1,9% da safra de grãos em 2019**. G1 Agro, 12 de fevereiro de 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2019/02/12/ibge-preve-aumento-de-19-da-safra-de-graos-em-2019.ghtml>>. Acesso em: 19 de abril de 2019.

VENTURIN, A.C.Z. **Modelagem e simulação de secagem em baixa temperatura para arroz com casca**. 2019. 101f., Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) -

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2019.

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