

## Artigo Original

# UM MODELO EM DINÂMICA DE SISTEMAS PARA CONTROLE DE SISTEMAS DE AERAÇÃO DE GRÃOS EM SILOS

PURL: <https://purl.org/27363/v3n1a32>

Thamiris Diniz Veloso de Sá <sup>a\*</sup>, Rafael Pinheiro Amantéa <sup>a</sup>, Keller Sullivan Oliveira Rocha <sup>a</sup> e José Helvécio Martins <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Educação Tecnológica - IETEC, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

---

## Resumo

A qualidade do grão é decisiva na determinação do seu valor agregado, exigindo medidas adequadas nos processos de pós-colheita. A técnica de aeração tornou-se o principal processo para o gerenciamento de sistemas de armazenamento a granel, visando preservar a qualidade do produto por meio do controle que modifica o microclima intergranular dos produtos armazenados. Esse controle permite reduzir ou eliminar a proliferação de microrganismos e pragas prejudiciais à qualidade do produto armazenado. A aeração possibilita esse processo mantendo a temperatura e a umidade relativa do ar intergranular e, consequentemente, o teor de água dos grãos em níveis seguros para o armazenamento. Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema de controle para aeração de grãos armazenados, proporcionando partidas e paradas automáticas, que levou em consideração a técnica de dinâmica de sistemas, considerando um modelo de aeração e microbiologia preditiva. A estratégia de controle utilizada para o gerenciamento da aeração priorizou o resfriamento da massa de grãos, testado em quatro cenários baseados em diferentes parâmetros para ligar ou desligar o ventilador. Os três primeiros cenários mostraram-se indesejáveis, pois houve aumento da temperatura do produto e do seu teor de água nas primeiras camadas, além de condições que favoreceram o crescimento biológico. No último cenário, estabeleceu-se, como parâmetro, que a temperatura do ar externo fosse, no máximo, 3°C abaixo da temperatura média intergranular, e os resultados mostraram diminuição da temperatura do ambiente intergranular, ausência de umedecimento do produto e, portanto, um declínio contínuo nas condições impróprias para a reprodução biológica.

Palavras-chave: Agricultura; Armazenagem de grãos; Aeração (Técnica); Estratégia de controle; Microbiologia preditiva.

---

## A MODEL IN SYSTEM DYNAMICS FOR CONTROL OF GRAIN AERATION SYSTEMS IN SILOS

---

## Abstract

Grain quality is decisive in determining its added value, requiring adequate measures in post-harvest processes. The aeration technique has become the main process for managing bulk storage systems, aiming to preserve product quality through control that modifies the intergranular microclimate of stored products. This control makes it possible to reduce or eliminate the proliferation of microorganisms and pests that are harmful to the quality of the stored product. Aeration makes this process possible by maintaining the temperature and relative humidity of the intergranular air and, consequently, the moisture content of the grains at safe levels for storage. In this work, a control system for aeration of stored grains was developed, providing automatic starts and stops, which took into account the system dynamics technique, considering an aeration model and predictive microbiology. The control strategy used for aeration management prioritized the cooling of the grain mass, tested in four scenarios based on different parameters to turn the fan on or off. The first three scenarios proved to be undesirable, as there was an increase in the temperature of the product and its moisture content in the first layers, in addition to conditions that favored biological growth. In the last scenario, it was established, as a parameter, that the temperature of the external air was, at most, 3°C below the average intergranular temperature, and the results showed a decrease in the temperature of the intergranular environment, absence of product wetting and, therefore, a continuing decline in conditions unsuitable for biological reproduction.

Keywords: Agriculture; Grain storage; Aeration (Technique); Control strategy; Predictive microbiology.

---

\* Autor para correspondência: [thamirisveloso@hotmail.com](mailto:thamirisveloso@hotmail.com)

---

## UN MODELO EN DINÁMICA DE SISTEMAS PARA EL CONTROL DE SISTEMAS DE AIREACIÓN DE GRANOS EN SILOS

---

### Resumen

La calidad del grano es decisiva para determinar su valor agregado, requiriendo medidas adecuadas en los procesos de poscosecha. La técnica de aireación se ha convertido en el principal proceso de gestión de los sistemas de almacenamiento a granel, con el objetivo de preservar la calidad del producto a través de un control que modifica el microclima intergranular de los productos almacenados. Este control permite reducir o eliminar la proliferación de microorganismos y plagas perjudiciales para la calidad del producto almacenado. La aireación hace posible este proceso al mantener la temperatura y la humedad relativa del aire intergranular y, en consecuencia, el contenido de humedad de los granos en niveles seguros para el almacenamiento. En este trabajo se desarrolló un sistema de control para la aireación de granos almacenados, proporcionando arranques y paradas automáticas, que tuvo en cuenta la técnica de dinámica del sistema, considerando un modelo de aireación y microbiología predictiva. La estrategia de control utilizada para la gestión de la aireación priorizó el enfriamiento de la masa de grano, probada en cuatro escenarios basados en diferentes parámetros para encender o apagar el ventilador. Los tres primeros escenarios resultaron ser indeseables, ya que hubo un aumento en la temperatura del producto y su contenido de humedad en las primeras capas, además de condiciones que favorecieron el crecimiento biológico. En el último escenario, se estableció, como parámetro, que la temperatura del aire externo era, como máximo, 3°C por debajo de la temperatura intergranular promedio, y los resultados mostraron una disminución de la temperatura del ambiente intergranular, ausencia de humectación del producto y, por lo tanto, una disminución continua de las condiciones inadecuadas para la reproducción biológica.

Palabras clave: Agricultura; Almacenamiento de granos; Aireación (Técnica); Estrategia de control; Microbiología predictiva.

---

### 1. Introdução

Cada vez mais dinâmicos, os sistemas mercadológicos estão exigindo que os processos produtivos no setor agrícola apresentem preço comercial e qualidade nos produtos, para torná-los competitivos. Por outro lado, o avanço da ciência e tecnologia tem proporcionado melhores condições e conhecimento no plantio. Embora tenha havido um constante investimento no setor, pouco avanço e investimento tem sido feito na etapa de armazenagem, principalmente de grãos, culturas mais produzidas no Brasil (NUNES, 2019).

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2019), recomenda que a capacidade de armazenamento estática seja maior do que sua capacidade de produção, o que garante a segurança alimentar de uma nação, e o seu déficit pode levar a perdas qualitativas e quantitativas, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019) e a FAO (2019).

Atualmente, os grãos colhidos pelos agricultores brasileiros passam por um ajuste de suas características morfológicas em relação ao nível de qualidade exigido pela CONAB (DOMBROWSKI, 2019). Assim, etapas adequadas de pós-colheita são necessárias para manter a qualidade dos grãos e várias medidas devem ser adotadas nas unidades de armazenamento e processamento de grãos, antes do armazenamento (NEME; MOHAMMED, 2017).

O benefício econômico do armazenamento seguro de grãos para os agricultores é evitar a pressão pela necessidade de vender imediatamente seus produtos, permitindo que tenham a opção de adiar a venda enquanto negociam um preço mais adequado, obtendo um preço justo por seu produto e limitando o papel dos intermediários (STEIDLE NETO; LOPES, 2015). Além disso, esse processo auxilia na obtenção de crédito, haja vista que eles podem acumular grãos de diferentes safras, armazená-los por longos períodos, e depois vendê-los em grandes quantidades (TARUVINGA; MEJIA; ALVAREZ, 2014).

Diante deste cenário, a utilização da técnica de aeração vem se tornando principal ferramenta de gerenciamento de sistemas de armazenamento de grãos a granel, porque modifica o microclima intergranular da massa de grãos, reduzindo e/ou eliminando organismos prejudiciais e mantendo a temperatura e o teor de água dos grãos em níveis seguros (STEIDLE NETO; LOPES, 2015). Este método tem como característica o movimento forçado do ar ambiente através da massa de grãos e é realizada para preservar a qualidade e as condições físicas do produto (LOPES *et al.*, 2008).

As grandes dimensões dos sistemas de aeração e a complexidade física inerente aos fenômenos de transporte presentes exigem dos engenheiros e projetistas da área o desenvolvimento e uso de tecnologias para o projeto e melhoria das unidades armazenadoras.

Neste contexto, a modelagem matemática surge como uma ferramenta de baixo custo e alta eficácia, pois permite o projeto e a melhoria de unidades armazenadoras (PANIGRAHI; SINGH; FIELKE, 2021), projeto de sistemas de controle (LOPES *et al.*, 2008) e instrumentação (STEIDLE NETO; LOPES, 2015) com alta precisão e baixo custo.

Entretanto, os modelos matemáticos utilizados para modelar a secagem e aeração de grãos (THORPE, 1997) são descritos por meio de equações diferenciais parciais de alta complexidade de solução, exigindo métodos computacionais que permitam simular modelos em várias dimensões e condições de operação com qualidade numérica em sua solução.

Visando reduzir a complexidade na modelagem matemática de sistemas de aeração e viabilizar a solução com baixo custo computacional, (LOPES *et al.*, 2006) propuseram um modelo unidimensional com alta acurácia permitindo a simulação de sistemas de aeração em tempo real.

Modelos unidimensionais, apesar de eliminarem os problemas associados à complexidade das geometrias, ainda exigem qualidade na solução numérica, pois podem apresentar termos fonte, condições de contorno não triviais e termos predominantemente advectivos, exigindo qualidade dos métodos de integração espacial e temporal.

Usualmente, os métodos de diferenças finitas, elementos finitos, volumes finitos e métodos livres de malha têm sido utilizados para a solução de modelos em simulações de secagem e aeração com acurácia garantida. Entretanto, tais métodos podem exigir o conhecimento em linguagens de programação para a implementação dos modelos de simulação.

A modelagem dinâmica de sistemas surge como uma opção para a solução de modelos que apresentam equações diferenciais parciais unidimensionais. Conforme demonstrado por Pessoa e Amantéa (2021), este tipo de modelagem permite ao pesquisador representar equações diferenciais parciais por meio de representações simbólicas que se resumem a estoques (somatórios) e fluxos (taxas), simplificando o processo de discretização espacial/temporal, permitindo que profissionais com pouco ou nenhum conhecimento de algoritmos resolva modelos matemáticos envolvendo equações diferenciais parciais.

A solução dos modelos de secagem/aeração permite visualizar em perfis espaciais/temporais da unidade armazenadora as temperaturas do ar e produto, umidade relativa do ar intergranular, teor de água do produto e demais importantes indicadores da condição de armazenamento permitindo, inclusive, que as saídas mencionadas sejam utilizadas para o projeto de sistemas de controle das unidades armazenadoras.

O silo ideal possui a capacidade de monitorar todos os domínios de risco da massa de grãos, ter um sistema de aeração otimizado, adequado, eficiente e capaz de proporcionar um fluxo de ar uniforme em toda a massa de grãos (BINELO *et al.*, 2019).

Os controladores de aeração são projetados para fornecer partida e parada automática de ventiladores, com base em uma estratégia selecionada, geralmente baseada em temperatura e umidade relativa de equilíbrio do ar intergranular consideradas adequadas. Esses controladores devem ser desde equipamentos mecânicos simples até equipamentos

eletromecânicos complexos, incluindo microprocessador e sistemas de controle de aeração baseados em computador (NAVARRO *et al.*, 2012).

Os controladores automáticos são ideais para o gerenciamento de aeração de grãos, pois permitem estratégias mais complexas. Além disso, com este tipo de controlador é possível integrar o gerenciamento de sistemas de termometria e dispositivos eletrônicos capazes de operar os ventiladores (STEIDLE NETO; LOPES, 2015). Numerosos controladores automáticos foram desenvolvidos em todo o mundo para esta finalidade (AGRIDRY, 2014; FERRAZA; BIAGGIONI; DIAS, 2010; HUNG; NUNTAPHAN; KIATSIRIROAT, 2009; LOPES *et al.*, 2008).

Lopes *et al.* (2008) desenvolveram um método de controle, gerenciando os sistemas de aeração de grãos, baseado na simulação de processos e na aquisição de dados em tempo real, implementado em um programa computacional (software) denominado AERO e configurado para manter condições seguras de armazenamento com o máximo de economia de energia elétrica ou para priorizar um resfriamento da massa de grãos mais eficiente.

O teor de água e a temperatura são os principais fatores que alteram as propriedades dos grãos e tornam o ambiente favorável ao desenvolvimento de insetos e microrganismos (CORADI; LEMES, 2018; MOHAPATRA *et al.*, 2017; PARAGINSKI *et al.*, 2015).

A área da biologia que trata e analisa a descrição matemática do processo microbiológico se denomina microbiologia preditiva (BARANYI; ROBERTS, 1994). A sua modelagem é baseada, principalmente, na suposição de que cada microrganismo tem uma temperatura ótima individual (máximo crescimento microbiano), uma temperatura mínima (abaixo da qual não ocorre mais crescimento) e uma temperatura máxima (acima da qual qualquer desenvolvimento é suprimido) (RAHMAN, 2007).

Schemminger, Mbuge e Hofacker (2019) investigaram a combinação dos modelos da termodinâmica e da microbiologia preditiva, permitindo a descrição de processos de secagem de cereais usando ar frio, visando à preservação da qualidade do produto sem a necessidade de experimentos de longo prazo e alto custo. O acoplamento de modelos microbiológicos aos modelos de aeração constitui uma poderosa ferramenta para o projeto de unidades armazenadoras e a avaliação de estratégias de operação destas unidades.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo de simulação dinâmica para aeração de grãos, por meio da técnica de dinâmica de sistemas, a partir de um modelo de aeração e microbiologia preditiva. E os objetivos específicos são:

- a) Implementar um modelo de aeração a partir da construção de um modelo de dinâmica de sistemas utilizando a ferramenta de modelagem de simulação *Anylogic*;
- b) Apresentar estratégias de controle para aeração de grãos;
- c) Acrescentar ao modelo de aeração o modelo microbiológico proposto por Schemminger, Mbuge e Hofacker (2019);
- d) Avaliar a eficiência da estratégia de controle utilizando como referência o modelo microbiológico.

## 2. Metodologia

O propósito desta seção é apresentar o processo metodológico, contendo a definição do modelo matemático e as equações que o descrevem, implementação de métodos numéricos, utilização técnicas por meio de uma ferramenta de modelagem de simulação de interface amigável e baixa complexidade e o estabelecimento de cenários contendo estratégias de controle que visam elucidar o objetivo desta pesquisa.

### 2.1. O modelo matemático para simulação do processo de aeração de grãos

As equações diferenciais que descrevem a transferência de calor e massa em um volume de controle em uma massa de grão aerada são definidas como (THORPE, 1997):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \theta}{\partial t} \left\{ \rho_b [c_g + c_w^U] + \varepsilon \cdot \rho_a \left[ c_a + R \left( c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right] \right\} \\ = & \rho_b \cdot h_s \cdot \frac{\partial U}{\partial t} - u_a \cdot \rho_a \left[ c_a + R \left( c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right] \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} + \rho_b \cdot \frac{dm_s}{dt} (Q_r - 0,6 \cdot h_v) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\rho_b \cdot \frac{\partial U}{\partial t} = -\rho_a \cdot u_a \cdot \frac{\partial R}{\partial y} + (0,6 + U) \cdot \frac{dm_s}{dt} \quad (2)$$

em que

- $c_a$  = Calor específico do ar ( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ );
- $c_g$  = Calor específico do grão seco ( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ );
- $c_w$  = Calor específico de água ( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ );
- $h_v$  = Calor latente de vaporização da água ( $J \cdot kg^{-1}$ );
- $h_s$  = Calor diferencial de sorção ( $J \cdot kg^{-1}$ );
- $U$  = Teor de água do grão em base seca (%);
- $m_s$  = Perda de matéria seca do grão (%);
- $Q_r$  = Calor de oxidação do grão ( $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ );
- $T_a$  = Temperatura do ar em equilíbrio com o grão ( $^\circ C$ );
- $t$  = Hora (s), a uma velocidade do ar de aeração ( $m \cdot s^{-1}$ );
- $R$  = Razão de umidade do ar ( $kg \cdot kg^{-1}$ );
- $y$  = Coordenada vertical na camada de grãos (m);
- $\varepsilon$  = Porosidade do grão (*decimal*);
- $\rho_a$  = Massa específica do ar intergranular ( $kg \cdot m^{-3}$ );
- $\rho_b$  = Massa específica aparente do grão ( $kg \cdot m^{-3}$ );
- $\theta$  = Temperatura do grão ( $^\circ C$ ).

### 2.2. Discretização espacial e tradução para a simbologia de estoques e fluxos

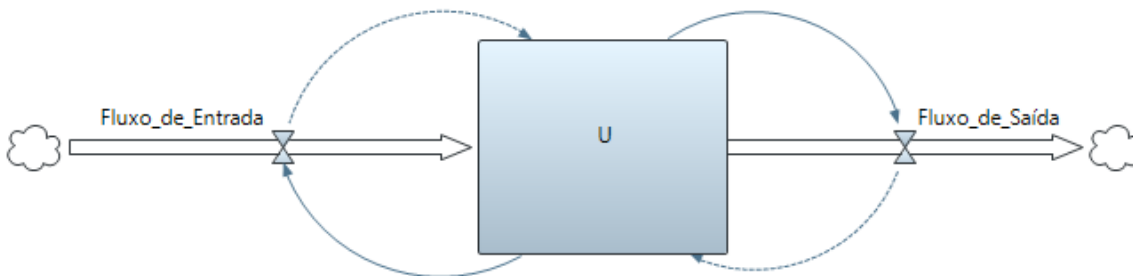
As equações (1) e (2) foram discretizadas por meio de equações de diferenças finitas regressivas, de maneira que o sistema composto pelas equações se reduza a um sistema de equações diferenciais ordinárias e possa ser integrado por uma técnica numérica pela ferramenta de modelagem de simulação utilizado pela simbologia de estoque e fluxos na dinâmica de sistemas:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} = & - \left\{ \frac{\rho_b \cdot h_s}{\rho_b (c_g + c_w^U) + \varepsilon \cdot \rho_a \left[ c_a + R \left( c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right]} \right\} \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \\ & + \left\{ \frac{u_a \cdot \rho_a}{\rho_b (c_g + c_w^U) + \varepsilon \cdot \rho_a \left[ c_a + R \left( c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right]} \right\} \\ & \cdot \left[ c_a + R \left( c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right] \cdot \left( \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{\Delta y} \right) \\ & + \left\{ \frac{\rho_b \cdot Q_r}{\rho_b (c_g + c_w^U) + \varepsilon \cdot \rho_a \left[ c_a + R \left( c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right]} \right\} \cdot \frac{dm_s}{dt} \\ & - \left\{ \frac{\rho_b (0,6 \cdot h_v)}{\rho_b (c_g + c_w^U) + \varepsilon \cdot \rho_a \left[ c_a + R \left( c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right]} \right\} \cdot \frac{dm_s}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = - \frac{\rho_a \cdot u_a \cdot R_i \cdot \rho_b}{\Delta y} + \frac{\rho_a \cdot u_a \cdot R_{i-1} \cdot \rho_b}{\Delta y} + \rho_b (0,6 + U) \cdot \frac{dm_s}{dt} \quad (4)$$

Para traçar o comportamento da dinâmica das equações de transferência de calor e massa descrita pelas equações (3) e (4), e a relação entre elas, a técnica de dinâmica de sistemas se faz necessária, pois seu objetivo é facilitar a compreensão do comportamento de sistemas complexos em função do tempo (MARTINS *et al.*, 2015).

Em suma, o diagrama representado na Figura 1 é constituído por uma variável do tipo estoque (U) que é composto por uma integral definida em relação ao tempo, cujos valores dependerão dos fluxos de entrada e de saída (taxas), formados por derivadas parciais. E as setas são os feedbacks representando as interferências entre as entidades.



**Figura 1** - Diagrama de fluxo. Fonte: próprio autor. (Figura gerada no Software Anylogic).

Na Tabela 1 são apresentadas as expressões para cálculo dos fluxos que entram e saem no estoque das equações (3) e (4).

**Tabela 1** - Expressões para os fluxos do estoque

Equação	Fluxo que entra	Fluxo que sai
(3)	$\frac{u_a \rho_a}{\left\{ \rho_b [c_g + c_w^u] + \varepsilon \rho_a \left[ c_a + R \left( c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right] \right\}} \left[ c_a + R \left( c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right] \left( \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{\Delta y} \right)$	$- \frac{\rho_b h_s}{\left\{ \rho_b [c_g + c_w^u] + \varepsilon \rho_a \left[ c_a + R \left( c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right] \right\}} \frac{\partial U}{\partial t}$
(4)	$+ \left( \frac{\rho_b Q_r}{\left\{ \rho_b [c_g + c_w^u] + \varepsilon \rho_a \left[ c_a + R \left( c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right] \right\}} \right) \frac{dI}{a}$	$- \left( \frac{\rho_b 0.6 h_v}{\left\{ \rho_b [c_g + c_w^u] + \varepsilon \rho_a \left[ c_a + R \left( c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right] \right\}} \right) \frac{dI}{c}$
	$(4) \quad \frac{\rho_a u_a R_{i-1} \rho_b}{\Delta y} + \rho_b \frac{dm_s}{dt} (0.6 + U)$	$- \frac{\rho_a u_a R_i \rho_b}{\Delta y}$

Fonte: próprio autor.

### 2.3. A estratégia de controle

A estratégia de controle proposta neste trabalho procurou priorizar um resfriamento da massa de grãos e tem como objetivo proporcionar temperaturas baixas e uniformes no interior do silo, mantendo o teor de água próximo ao valor adequado para manter com segurança a qualidade do produto.

Para isso, foram estabelecidos três cenários que levam em consideração a temperatura média da massa de grãos, e a temperatura e umidade relativa do ar externo. Os três parâmetros foram utilizados em diferentes critérios apresentados a seguir para ligar ou desligar o sistema de aeração.

#### 2.3.1. Cenário 1

O objetivo deste cenário é ilustrar os riscos de um sistema de aeração em pleno funcionamento, sem qualquer critério de acionamento ou desligamento do sistema. Portanto, neste cenário, o ventilador estará ligado ininterruptamente durante 90 horas.

#### 2.3.2. Cenário 2

A estratégia de controle implementada neste cenário envolve a escolha de um parâmetro limite de umidade relativa do ar externo. Desta forma, a partir de um valor de umidade relativa pré-estabelecido pelo operador, o sistema de aeração é acionado toda vez que a umidade relativa do ar externo for inferior ao parâmetro estabelecido.

#### 2.3.3. Cenário 3

A estratégia de controle implementada neste cenário envolve a escolha de um parâmetro limite de umidade relativa do ar externo, a temperatura média da massa de grãos e a temperatura do ar externo. Nesta estratégia, a partir de um valor de umidade relativa pré-estabelecido pelo operador, o sistema de aeração é acionado toda vez que a umidade relativa do ar externo for inferior ao parâmetro estabelecido e a temperatura do ar externo é inferior à temperatura média da massa de grãos.

#### 2.3.4. Cenário 4

A estratégia de controle implementada neste cenário envolve as condições estabelecidas no Cenário 3 e inclui o diferencial em relação à temperatura média. Nesta estratégia, a partir de um valor de umidade relativa pré-estabelecido pelo operador, o sistema de aeração é acionado toda vez que a umidade relativa do ar externo for inferior ao parâmetro estabelecido e a diferença de temperatura do ar externo for inferior a 3 graus em relação à temperatura média do ar intergranular.

Na Tabela 2 encontram-se compilados os cenários e suas respectivas estratégias de controle citados acima de forma resumida.

**Tabela 2** - Cenários versus estratégias de controle

Fonte: próprio autor.

Cenários \ Critérios	Limite de umidade relativa do ar externo	Temperatura do ar externo menor que a temperatura média da massa de grãos	Diferença de 3 graus da temperatura do ar externo em relação à temperatura média do ar intergranular
1	-	-	-
2	x	-	-
3	x	x	-
4	x	x	x

#### 2.4. O modelo microbiológico

O modelo microbiológico aplicado segue a metodologia proposta por Zwietering *et al.* (1992).

Para estimar a taxa de crescimento de organismos em condições subótimas para temperaturas ( $T$ ), atividade de água ( $a_w$ ) e  $pH$ , é necessário utilizar um modelo matemático. A taxa de crescimento pode ser estimada usando modelos que relacionam o crescimento real de uma variável com o valor ótimo e os limites. Cada variável que não está no valor ótimo pode reduzir a taxa de crescimento. Portanto, um método para combinar esses efeitos deve ser estabelecido. Isso é feito introduzindo um fator de crescimento:



$$\gamma = \frac{\mu}{\mu_{opt}} \quad (5)$$

em que

- $\mu$  = Taxa de crescimento real ( $h^{-1}$ );  
 $\mu_{opt}$  = Taxa de crescimento ( $h^{-1}$ );  
 $\gamma$  = Fator de crescimento real.

Este fator de crescimento é igual a 1 em condições ideais e no intervalo entre 0 e 1 para todas as outras condições. Presume-se que o fator de crescimento pode ser calculado multiplicando todos os valores  $\gamma(X)$ , definidos para cada uma das variáveis separadamente, independentemente do valor das outras variáveis:

$$\gamma = \gamma(T) \cdot \gamma(a_w) \cdot \gamma(O_2) \quad (6)$$

Se todas as variáveis estiverem em condições ideais, a taxa de crescimento é igual a  $\mu_{opt}$ . Se uma das variáveis estiver abaixo do mínimo ou acima do valor máximo, isso resulta em um dos  $\gamma$ 's sendo zero, resultando em um dos valores de gama sendo zero.

Cada fator  $\gamma(X)$  pode ser determinado a partir de um banco de dados, em combinação com um modelo para essa variável. Em um banco de dados de microrganismos podem ser encontradas as temperaturas mínimas, ótimas e máximas para o crescimento de diferentes organismos. Se esses dados forem conhecidos, os parâmetros da equação (7), a seguir, podem ser calculados (ZWIETERING *et al.*, 1992):

$$\mu = (b(T - T_{min})\{1 - \exp[c(T - T_{max})]\})^2; \quad (7)$$

$$T_{min} \leq T \leq T_{max}$$

Em que  $b$ ,  $c$ ,  $T_{min}$  e  $T_{max}$  são parâmetros e  $T$  é temperatura real ( $^{\circ}C$ ).

Se  $c$  for conhecido, o fator de crescimento  $\gamma(T)$  para cada temperatura pode ser avaliado como:

$$\gamma(T) = \frac{\mu}{\mu_{opt}} = \left( \frac{(T - T_{min})\{1 - \exp[c(T - T_{max})]\}}{(T_{opt} - T_{min})\{1 - \exp[c(T_{opt} - T_{max})]\}} \right)^2 \quad (8)$$

O valor de  $c$  pode ser calculado a partir dos valores conhecidos de  $T_{min}$ ,  $T_{max}$  e  $T_{opt}$ . A primeira derivada da Equação (8) deve ser zero em  $T = T_{opt}$ , o que resulta em:

$$\frac{d\gamma}{dT} = 1 - (c \cdot T_{opt} - c \cdot T_{min} + 1) \cdot \exp[c \cdot (T_{opt} - T_{max})] = 0 \quad (9)$$

Então,  $c$  pode ser calculado iterativamente a partir desta equação e substituído na equação (8), para obter  $\gamma(T)$ , para um valor específico de  $T$ .

### 3. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta a análise dos resultados da pesquisa, na qual está descrito o comportamento da temperatura e do teor de água dos grãos referente às estratégias de controle utilizadas e simuladas utilizando um algoritmo de dinâmica de sistema implementado na ferramenta de modelagem de simulação *Anylogic*. Essa seção apresenta os principais dados analisados na pesquisa.

#### 3.1.1. Dados e parâmetros utilizados na simulação

Na simulação, considerou-se que a massa de grãos foi dividida igualmente em várias camadas, com o intuito de analisar seus comportamentos de forma individual. Durante o processo de simulação da aeração, o sistema de equações resultante dos balanços de massa e de energia (equações 3 e 4) foram resolvidos em relação ao tempo de maneira iterativa. Especificamente, o processo de solução do sistema de equações no tempo foi realizado pelo método de Euler na sua forma explícita.

Foram considerados constantes o calor específico da água e o calor específico do ar,  $c_w = 4186 J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$  e  $c_a = 1000 J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ , respectivamente. Os Gráficos 1 e 2 mostram o comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar referente à cidade de Viçosa, Minas Gerais, observados no mês de agosto de 2021.

É possível observar, nos Gráficos 1 e 2, que as condições climáticas na cidade de Viçosa, Minas Gerais, apresentam um ciclo diário de temperaturas com as máximas com valores próximos a  $28^\circ C$  e mínimos próximos a  $10^\circ C$ . Comportamento similar acontece com a umidade relativa com valores máximos próximos a 90% durante a noite e mínimos próximos a 40% durante o dia.

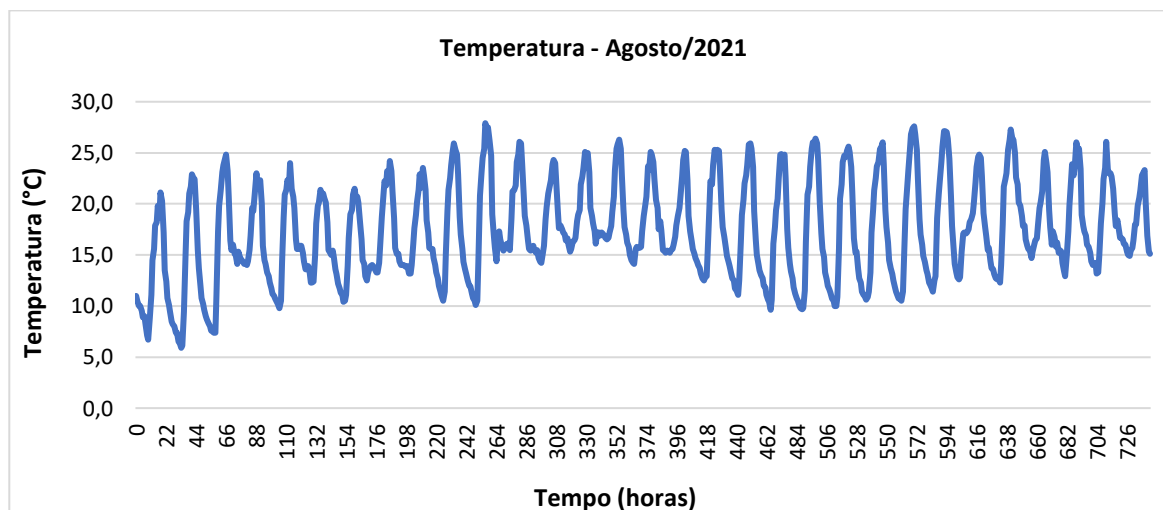
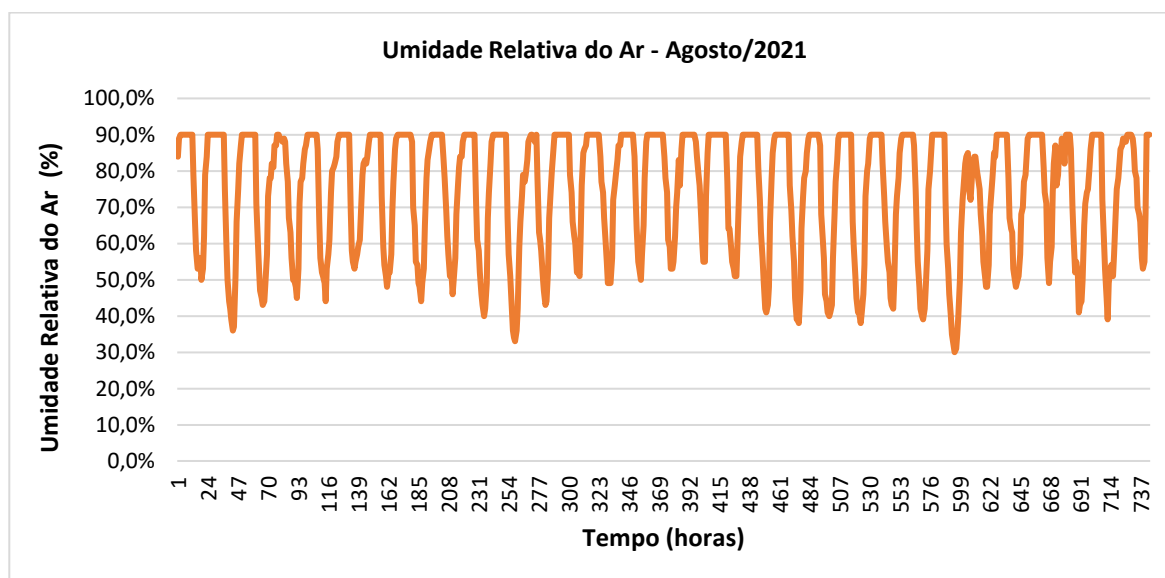


Gráfico 1 - Temperatura observada na cidade de Viçosa no mês de agosto de 2021. Fonte: próprio autor.



**Gráfico 1** - Umidade relativa do ar observados na cidade de Viçosa no mês de agosto de 2021. Fonte: próprio autor.

É possível verificar que as condições climáticas apresentadas apresentam um ciclo de temperaturas com as máximas próximas a 28 °C e mínimas próximas a 10 °C. Comportamento similar acontece com a umidade relativa com máximas em 90% durante a noite e mínimas próximas a 40% durante o dia.

### 3.1.2. Cenário 1: Simulação do processo de aeração de grãos com ausência de sistema de controle

O modelo de estoque e de fluxo constituído pelas equações (3) e (4) foram implementadas no algoritmo programado *Anylogic*, e o diagrama desenvolvido teve por objetivo simular e estabelecer o saldo em relação ao balanço de energia e de massa entre as variáveis, identificando os comportamentos implícitos ao longo do tempo, que envolvem o processo de aeração.

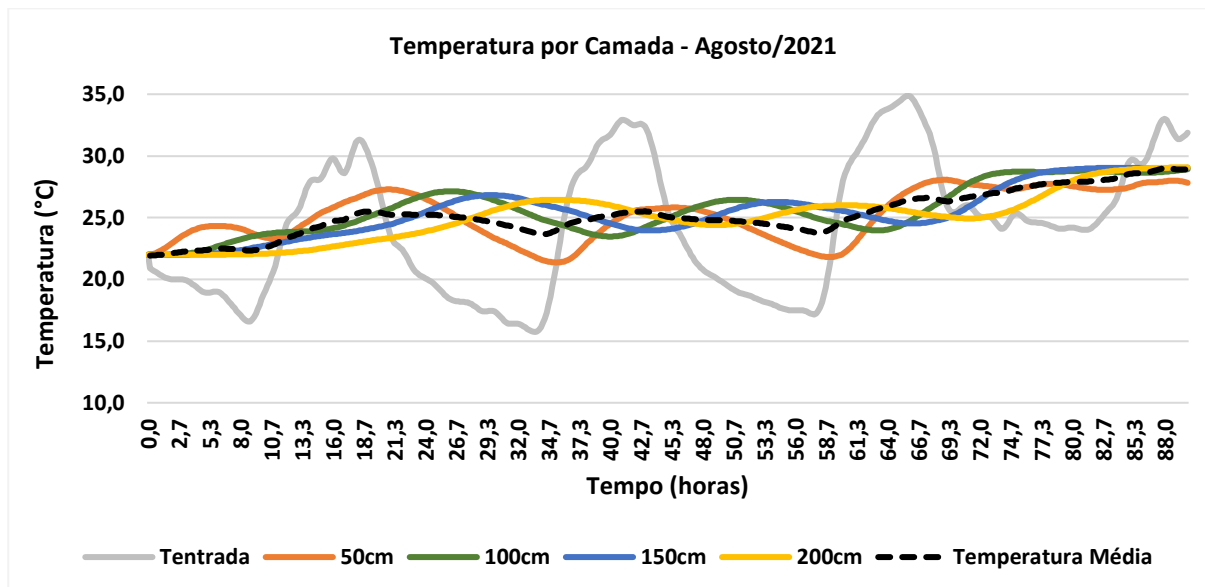
Em todos os cenários apresentados a seguir utilizaram-se, como dados de entrada, a temperatura e a umidade relativa do ar já apresentados, e na simulação do primeiro cenário, considerou-se o ventilador ligado continuamente.

O Gráfico 3 mostra a dinâmica da temperatura do produto armazenado considerando cinco camadas de grãos monitoradas durante a simulação e o cálculo da temperatura média do produto. A condição de contorno na entrada da unidade armazenadora é do tipo constante (*Dirichlet*), portanto, considerou-se a temperatura do produto em equilíbrio com a do ar externo.

As rápidas variações da temperatura do produto na entrada da unidade armazenadora sugerem que este tipo de condição de contorno não é a mais realística. Esse fenômeno também pode ser observado quando é feito o cálculo do teor de água do produto, como ilustrado no Gráfico 3. As altas taxas de reumedecimento apresentadas sugerem a necessidade de uma exatidão maior nas condições de contorno do modelo. A modelagem da dinâmica de reumedecimento em diferentes condições ainda é um desafio nas áreas de modelagem e simulação de secagem.

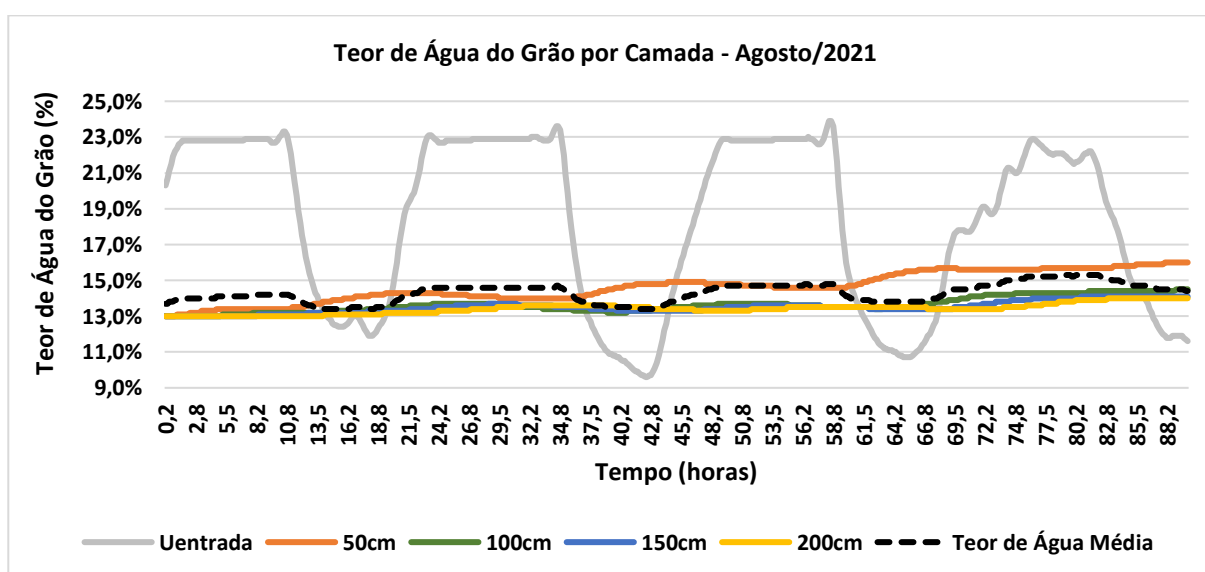
A partir da segunda camada de produto, observa-se que o produto em condições de aeração contínua apresenta um aumento da temperatura ao longo do tempo. Isso pode ser explicado pelo balanço de energia positivo ao longo dos dias de aeração contínua. Apesar das temperaturas noturnas serem baixas, não foi possível resfriar toda a massa de produto até atingir a temperatura adequada, no tempo em que o sistema de aeração permaneceu em operação.

A temperatura média calculada foi de 25,2°C. A temperatura inicial de toda a massa de grãos foi de 22,0°C e a máxima alcançada foi de 28,0°C (50 cm), 28,8°C (100 cm), 29,0°C (150 cm) e 29,6°C (200 cm), respectivamente. Portanto, observa-se um aumento considerável da temperatura do produto ao longo do tempo.



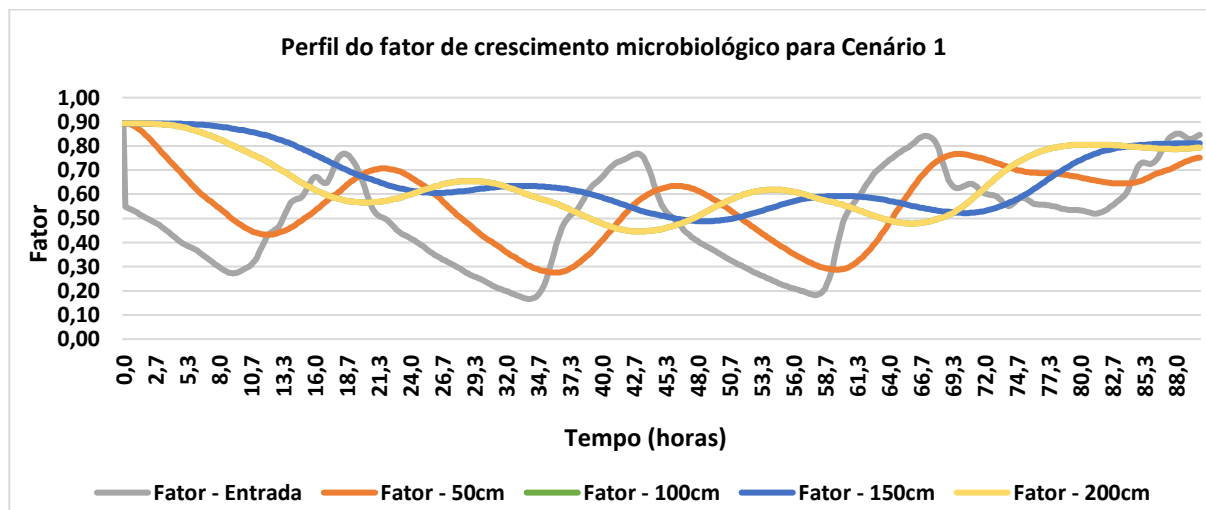
**Gráfico 2** - Perfil de temperatura do produto sem estratégia de controle. Fonte: próprio autor.

O Gráfico 4 contém a representação da dinâmica do teor de água do grão. Observa-se um crescente processo de reumedecimento do produto nos primeiros 50 cm de camada de grãos. As camadas superiores (acima de 50 cm) pouco foram afetadas pelas condições de aeração no que se diz respeito ao reumedecimento. Entretanto, esse comportamento é indesejado, assim como o aumento da temperatura do produto. O aumento do teor de água nas primeiras camadas é explicado pela injeção de fluxo de ar externo insuficiente em condições de alta umidade relativa.



**Gráfico 3** - Perfil do teor de água do produto sem estratégia de controle. Fonte: próprio autor.

O Gráfico 5 ilustra a dinâmica do fator de crescimento biológico para as condições de simulação apresentadas neste cenário. Observa-se que o indicador corrobora os riscos apontados nas discussões já apresentadas, considerando condições de aeração envolvendo altas temperaturas e umidades relativas. Observa-se que nas primeiras camadas, durante diversos momentos, a umidade relativa intergranular se aproxima dos valores nas faixas consideradas ótimas para o crescimento biológico (80% a 100%).



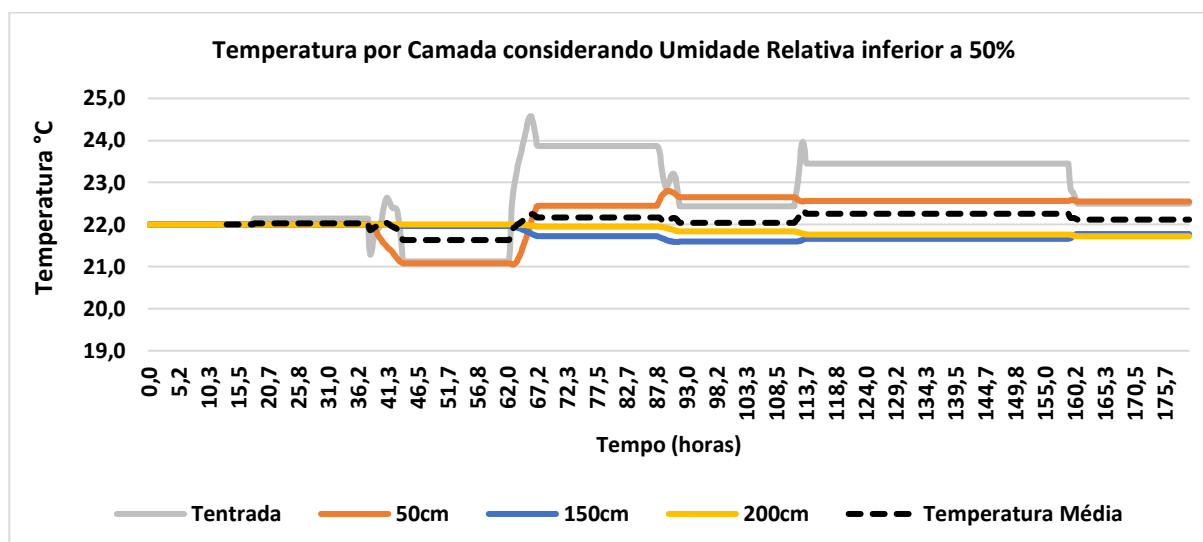
**Gráfico 5** - Perfil de fator de crescimento microbiológico para Cenário 1. Sem estratégia de controle. Fonte: próprio autor.

### 3.1.3. Cenário 2: Ligar o ventilador quando a umidade relativa for inferior a 50% -60% - 70%

Neste cenário, três testes foram realizados avaliando a estratégia do manejo da aeração. Como critério de acionamento do ventilador, foi imposto o acionamento do sistema quando a umidade relativa do ar fosse inferior a 50%, 60% e 70%, respectivamente.

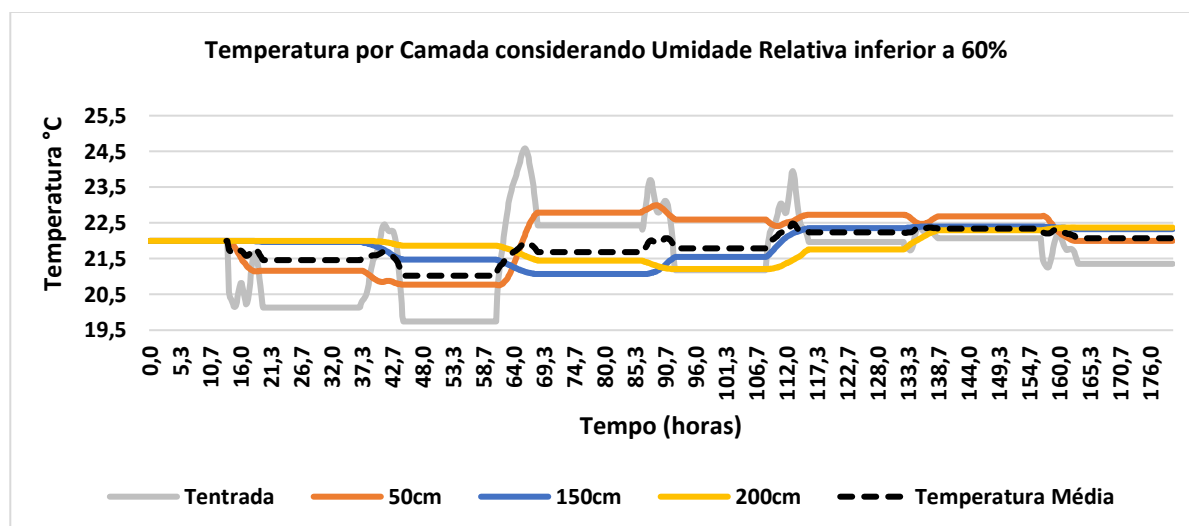
O Gráfico 6 ilustra uma mudança considerável no perfil de temperatura depois de a primeira estratégia de controle ser implementada. Observa-se que não há mais injeção de ar externo em baixas temperaturas. Isto pode ser explicado pela condição imposta no cenário, haja vista que as condições de umidade relativa acima de 50% acontecem no período noturno, quando a temperatura diminui drasticamente.

Observa-se também um aumento de 2°C nas primeiras camadas de produto, como consequência da injeção de ar quente e seco, característico das condições externas durante o dia.

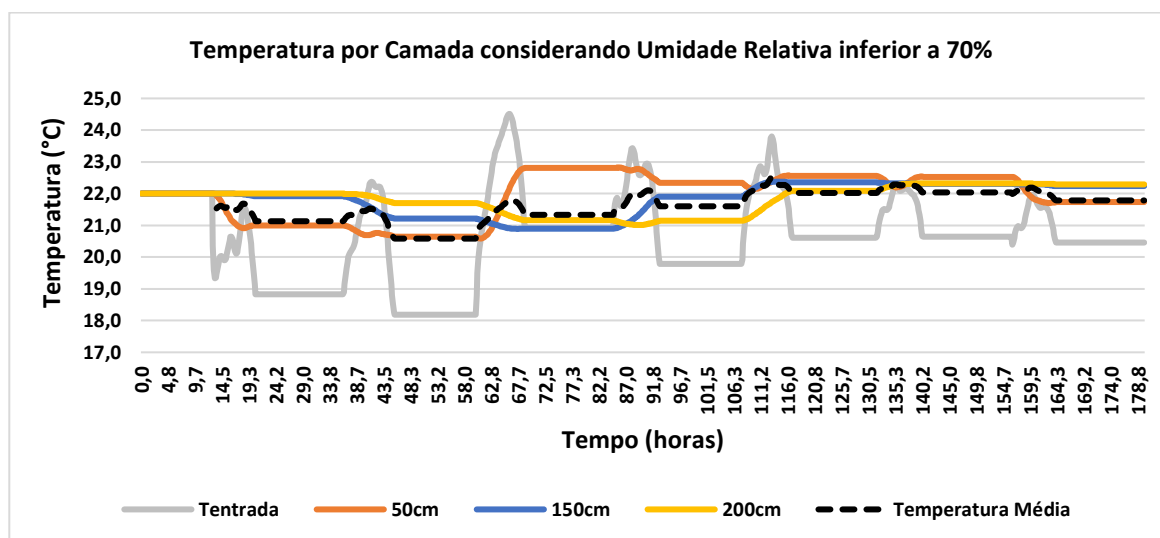


**Gráfico 4** - Perfil de temperatura da massa de grãos acionando o sistema de aeração apenas em umidades relativas inferiores a 50%. Fonte: próprio autor.

O perfil de temperatura da massa de grãos, quando o sistema de aeração era acionado para valores de umidade relativa inferiores a 60% e 70%, está ilustrado nas Figuras 7 e 8 e mostraram temperaturas mais amenas, pois permitiu a injeção de ar externo em temperaturas mais baixas ao longo do dia.



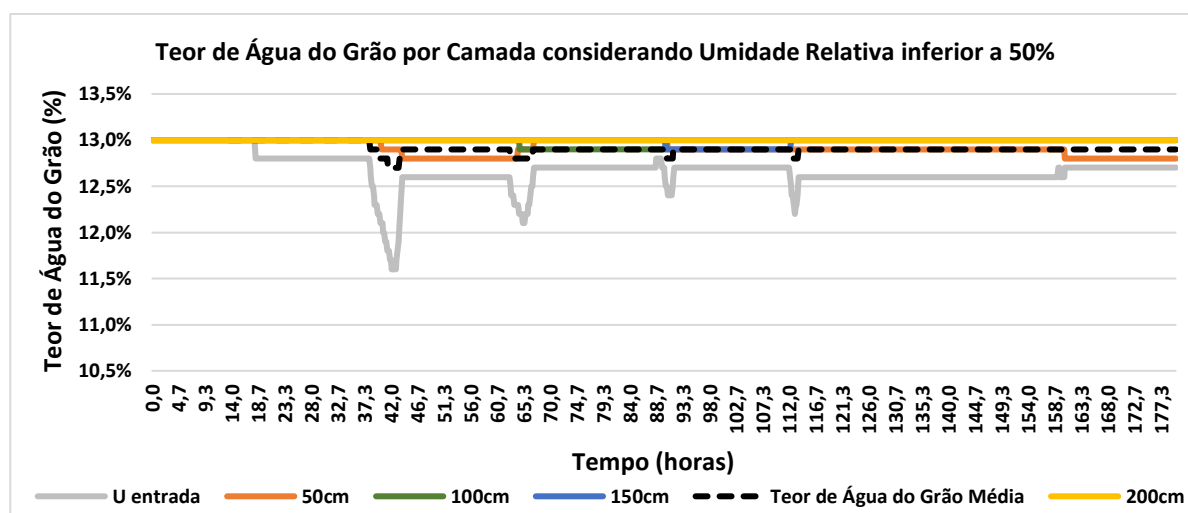
**Gráfico 5** - Perfil de temperatura da massa de grãos acionando o sistema de aeração apenas em umidades relativas inferiores a 60%. Fonte: próprio autor.



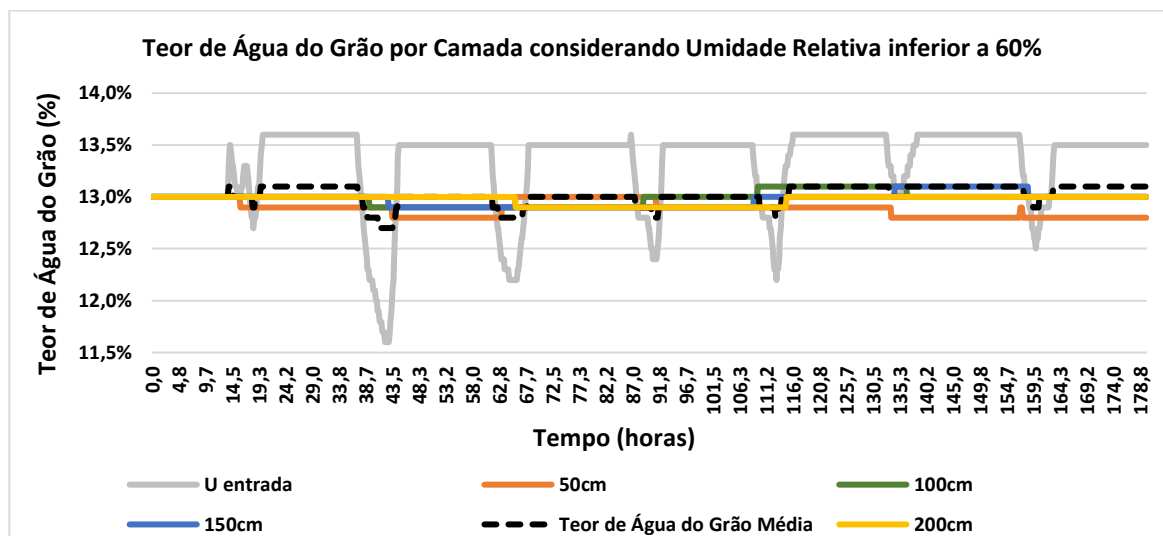
**Gráfico 6** - Perfil de temperatura da massa de grãos acionando o sistema de aeração apenas em umidades relativas inferiores a 70%. Fonte: próprio autor.

Nos Gráficos 9, 10 e 11 apresentam-se os perfis de teor de água do produto. Quando a umidade relativa simulada foi inferior a 50%, o teor de água dos grãos apresentou oscilações de 11,5% para 13%, mas quando a condição de aeração determinou que o ventilador só pudesse ser ligado quando a umidade relativa do ar fosse inferior a 60 e 70%, foi possível observar que a variação do teor de água do grão entre as camadas foi de 11,5% a, aproximadamente, 15%.

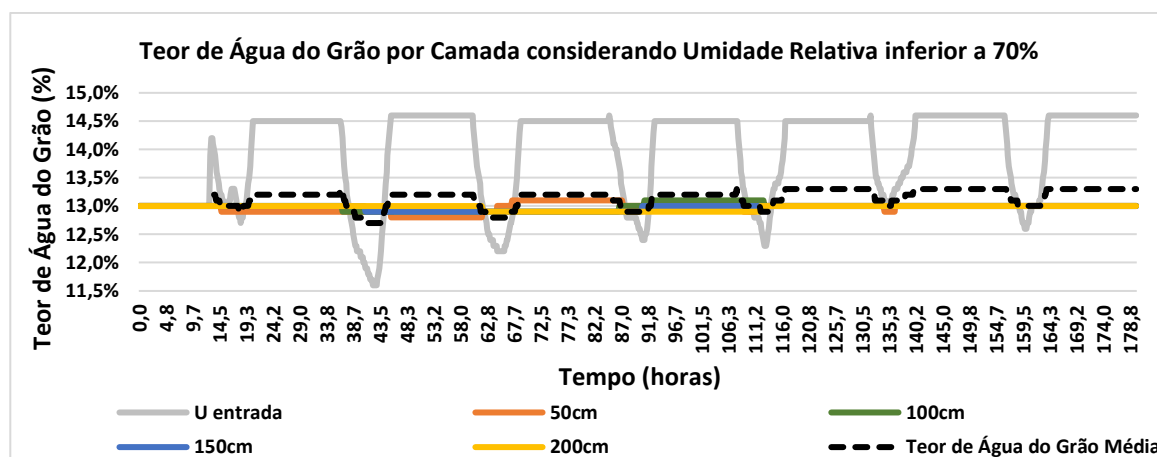
Vale ressaltar que grãos com teor de água superior a 14% devem ser mantidos em temperatura baixa ou ser realizado o processo de resfriamento artificial do ar intergranular, e evitar focos aquecimento na massa dos grãos.



**Gráfico 7** - Perfil do teor de água do produto acionando o sistema de aeração apenas em umidades relativas inferiores a 50%. Fonte: próprio autor.



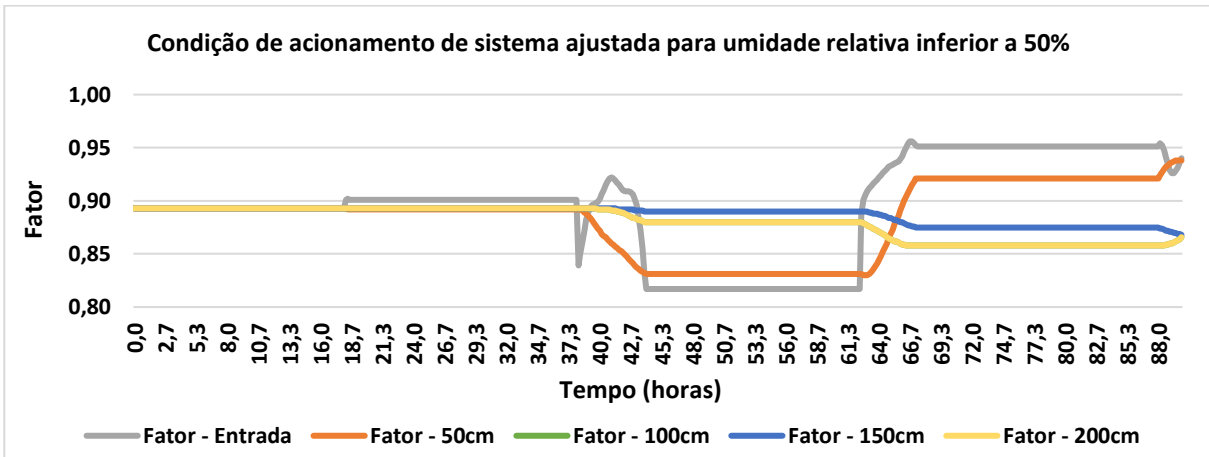
**Gráfico 8** - Perfil do teor de água do produto acionando o sistema de aeração apenas em umidades relativas inferiores a 60%. Fonte: próprio autor.



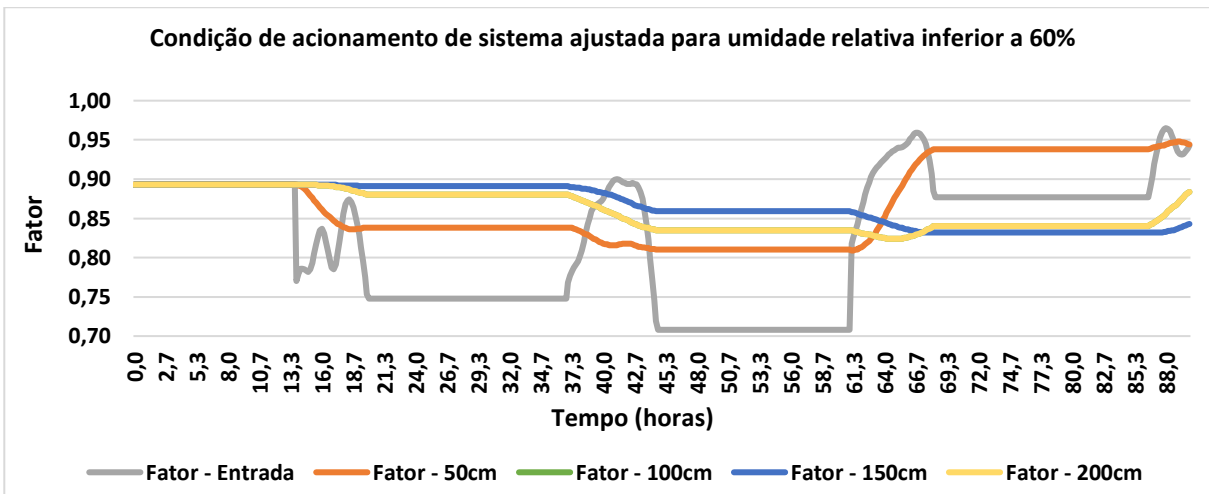
**Gráfico 9** - Perfil do teor de água do produto acionando o sistema de aeração apenas em umidades relativas inferiores a 70%. Fonte: próprio autor.

Os Gráficos 12, 13 e 14 contêm a dinâmica do fator de crescimento biológico para os experimentos realizados nas condições estipuladas no Cenário 2. Observa-se que, apesar dos perfis de temperatura e do teor de água do grão apresentarem resultados mais uniformes, quando comparados aos resultados apresentados no cenário sem controle do sistema de aeração, os Gráficos 12, 13 e 14 mostram que a estratégia de controle apresentada no presente cenário é inviável, pois, em todas as condições apresentadas, o produto foi colocado em condições próximas àquelas propícias para o crescimento biológico.

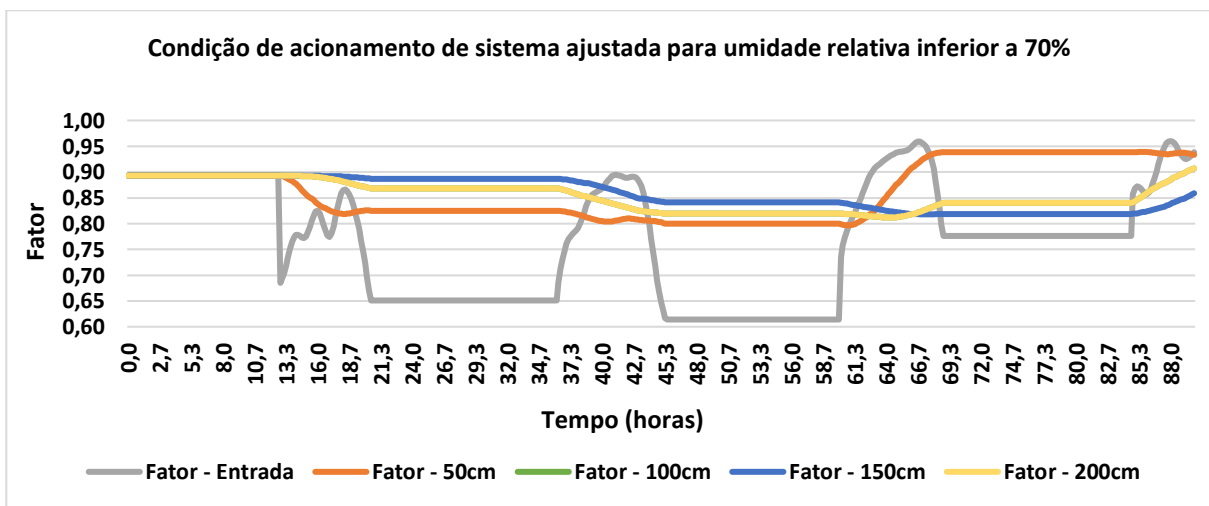




**Gráfico 10** - Perfil de fator de crescimento microbiológico para Cenário 2. Condição de acionamento de sistema ajustada para umidade relativa inferior a 50%. Fonte: próprio autor.



**Gráfico 11** - Perfil de fator de crescimento microbiológico para Cenário 2. Condição de acionamento de sistema ajustada para umidade relativa inferior a 60%. Fonte: próprio autor.

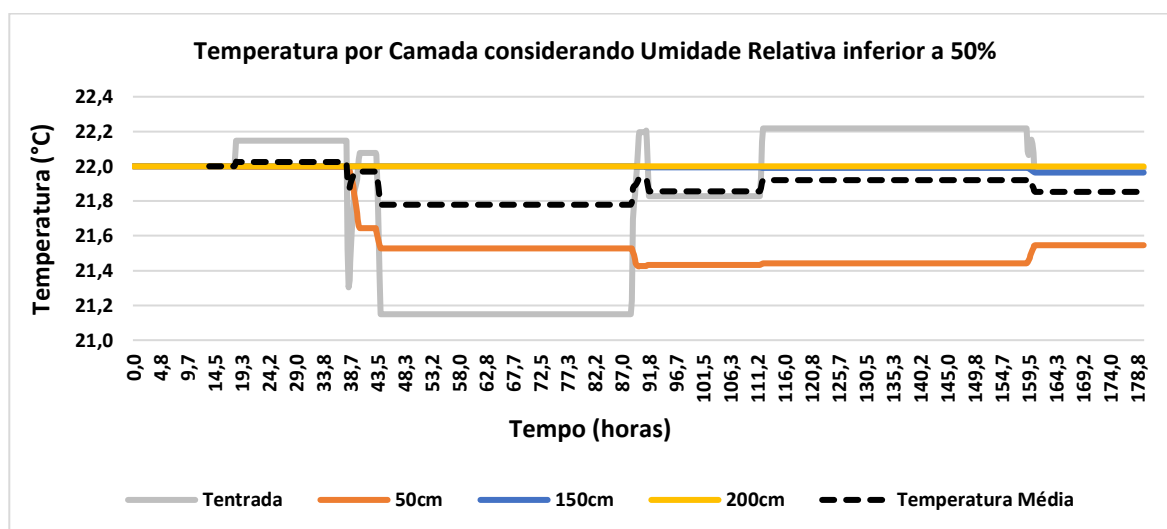


**Gráfico 12** - Perfil de fator de crescimento microbiológico para Cenário 2. Condição de acionamento de sistema ajustada para umidade relativa inferior a 70%. Fonte: próprio autor.

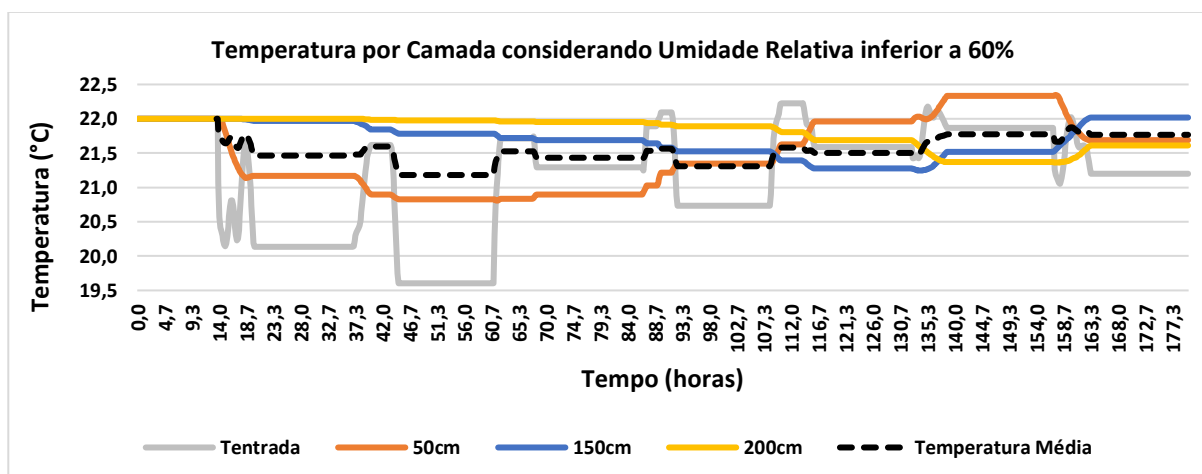
3.1.4. *Cenário 3: Ligar o ventilador quando a umidade relativa for inferior a 50% - 60% - 70% e temperatura externa inferior à temperatura média*

Neste item, a estratégia do manejo da aeração na simulação foi condicionada ao critério do ventilador ser ligado quando a umidade relativa do ar fosse inferior a 50%, 60% e 70% e a temperatura externa fosse inferior à temperatura média da massa de grãos.

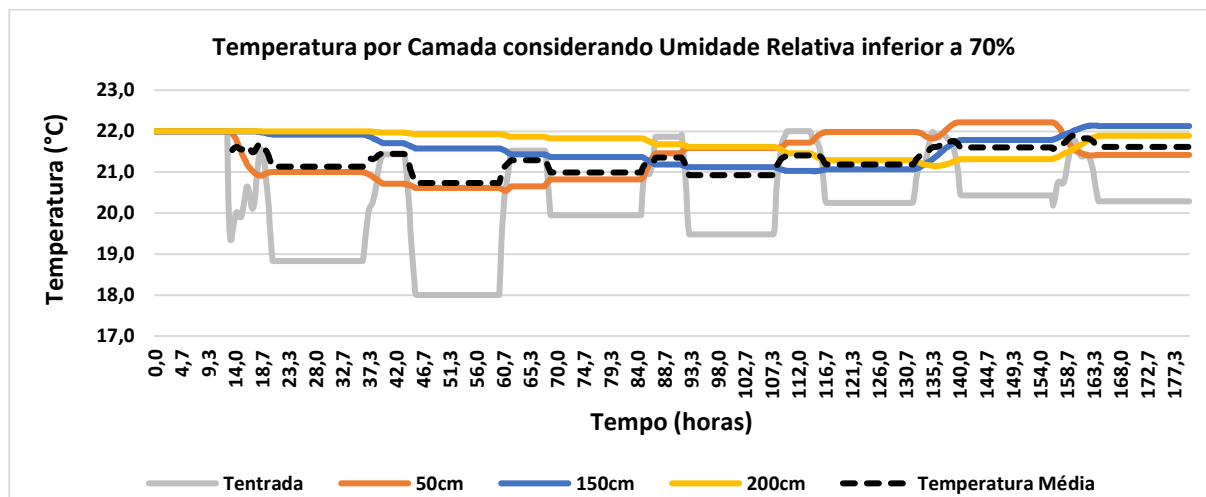
Os Gráficos 15, 16 e 17 mostram a dinâmica dos perfis de temperatura da massa de grãos. Observa-se que, para o experimento em que se considerava o acionamento do sistema em condições de umidade relativa inferior a 50%, pouco se alteraram as temperaturas em todas as camadas. Para os cenários em que se considerou a injeção de ar com valores de umidade relativa maiores (60% e 70%), observa-se maior resfriamento nas camadas iniciais e subsequentes.



**Gráfico 13** - Perfil de temperatura da massa de grãos acionando o sistema de aeração apenas em umidades relativas inferiores a 50% e temperatura externa inferior à temperatura média. Fonte: próprio autor.



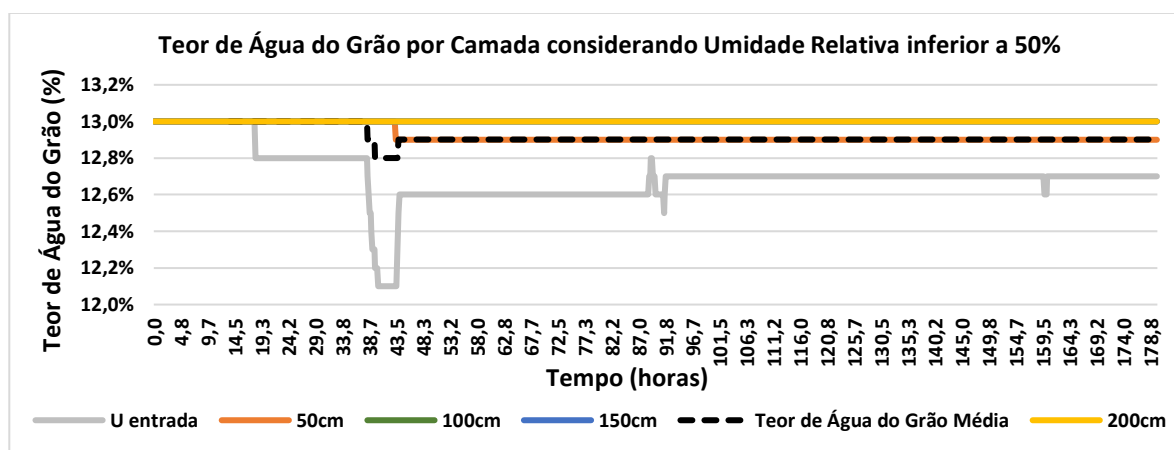
**Gráfico 14** - Perfil de temperatura da massa de grãos acionando o sistema de aeração apenas em umidades relativas inferiores a 60% e temperatura externa inferior à temperatura média. Fonte: próprio autor.



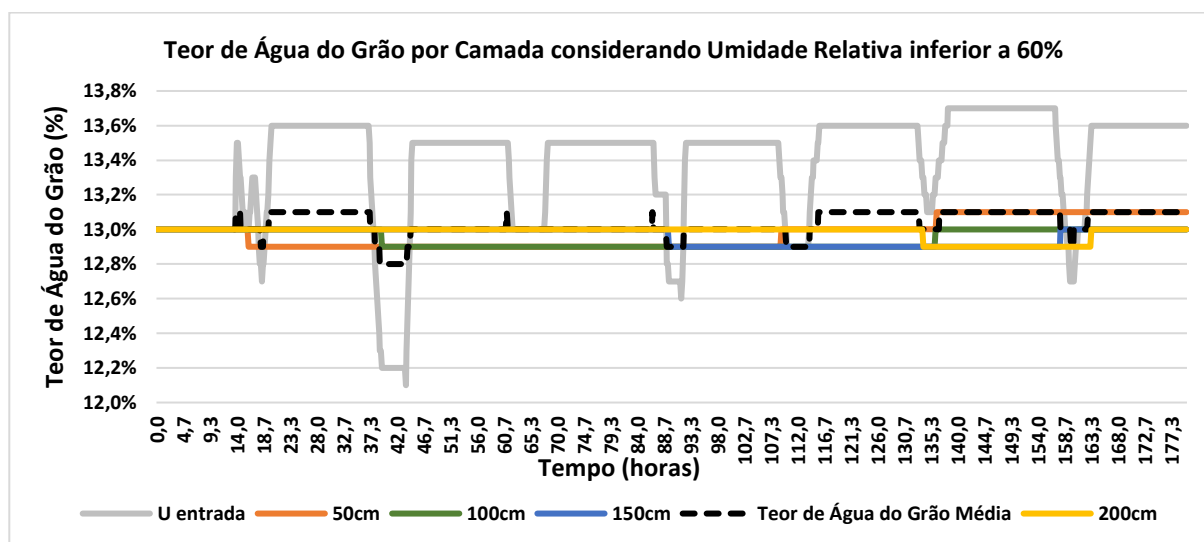
**Gráfico 15** - Perfil de temperatura da massa de grãos acionando o sistema de aeração apenas em umidades relativas inferiores a 70% e temperatura externa inferior à temperatura média. Fonte: próprio autor.

Nos Gráficos 18, 19 e 20 é possível visualizar a dinâmica dos perfis de teor de água do produto. Os resultados apresentados mostram baixa oscilação do teor de água do produto em todos os experimentos. A exceção fica por conta da camada que representa a entrada da unidade armazenadora.

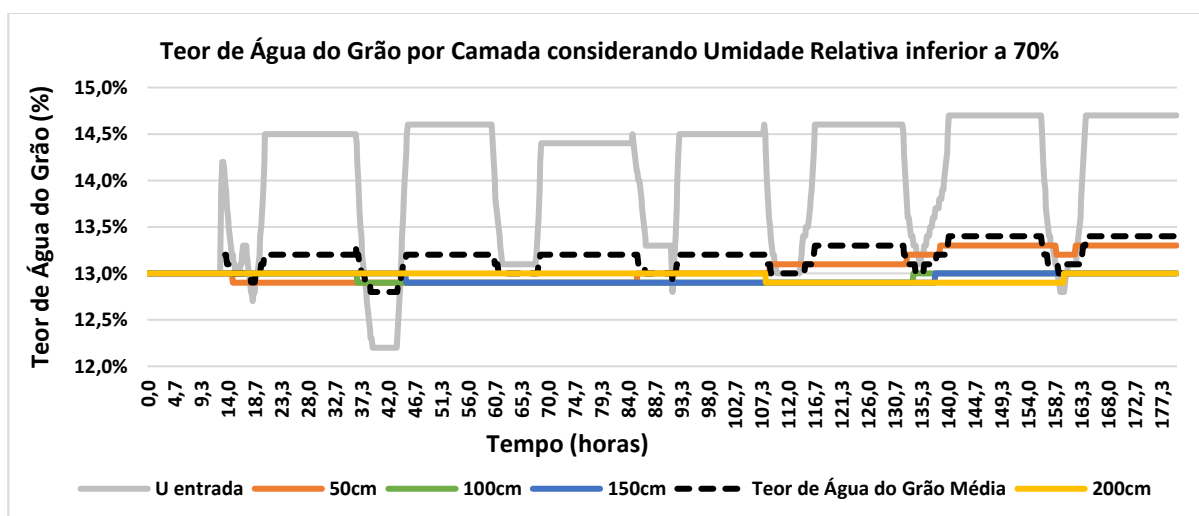
Nas camadas iniciais constatou-se uma variação do teor de água do produto de até 1,5% pontos percentuais. Entretanto, tal variação pode ser questionada pelo rápido umedecimento/reumedecimento apresentado, fruto de uma condição de contorno não realística, apresentando assim taxas de secagem e reumedecimento questionáveis.



**Gráfico 16** - Perfil de teor de água do produto acionando o sistema de aeração apenas em umidades relativas inferiores a 50% e temperatura externa inferior à temperatura média. Fonte: próprio autor.



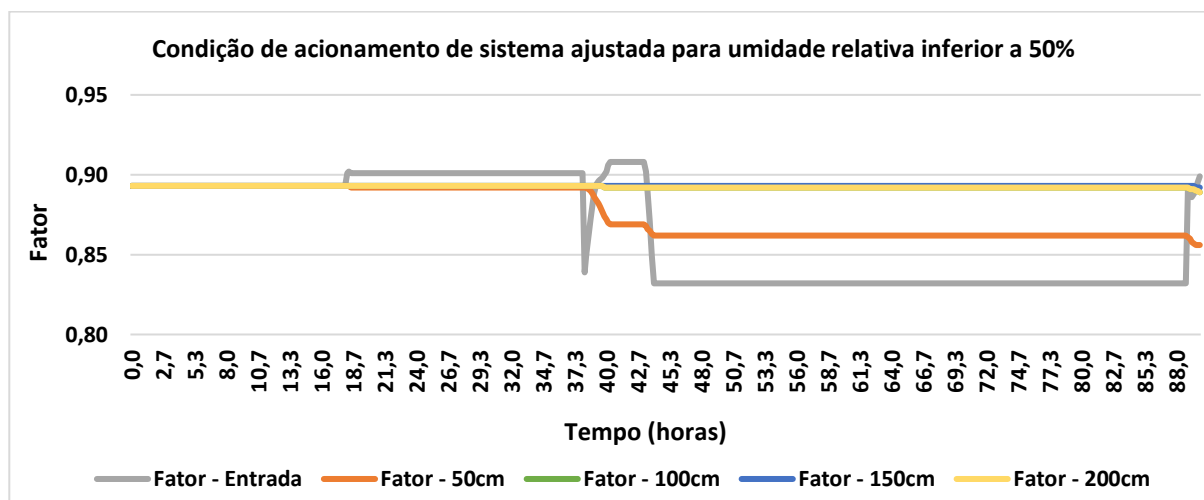
**Gráfico 17** - Perfil de teor de água do produto acionando o sistema de aeração apenas em umidades relativas inferiores a 60% e temperatura externa inferior à temperatura média. Fonte: próprio autor.



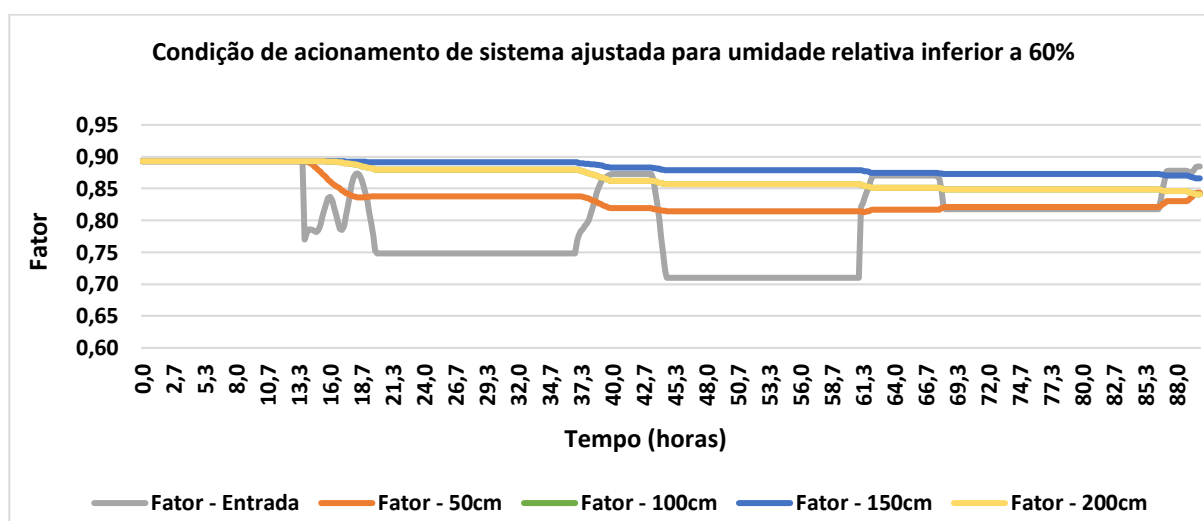
**Gráfico 18** - Perfil de teor de água do produto acionando o sistema de aeração apenas em umidades relativas inferiores a 70% e temperatura externa inferior à temperatura média. Fonte: próprio autor.

Os Gráficos 21, 22 e 23 ilustram a dinâmica do fator de crescimento microbológico nas condições de aeração impostas no Cenário 3. Observa-se, em comparação aos cenários anteriores, que o experimento em que se aciona o sistema de aeração quando a umidade relativa externa é inferior a 70% e a temperatura é inferior à temperatura média (Gráfico 23), apresenta uma melhoria contínua em relação aos riscos associados às condições de crescimento biológico (diminuição dos riscos).

De acordo com os resultados desse experimento, fica evidente que todas as camadas de produto sofreram considerável redução de risco de proliferação biológica. Esse fato pode ser explicado pelas baixas temperaturas estarem presentes nos períodos noturnos que também apresentam maiores valores de umidade relativa. E por consequência, quando o critério de acionamento considerou a umidade relativa inferior à 70% houve maiores injeções de ar em baixas temperaturas.



**Gráfico 19** - Perfil de fator de crescimento microbiológico para Cenário 3. Condição de acionamento de sistema ajustada para umidade relativa inferior a 50% e temperatura externa inferior à temperatura média do produto. Fonte: próprio autor.



**Gráfico 20** - Perfil de fator de crescimento microbiológico para Cenário 3. Condição de acionamento de sistema ajustada para umidade relativa inferior a 60% e temperatura externa inferior à temperatura média do produto. Fonte: próprio autor.

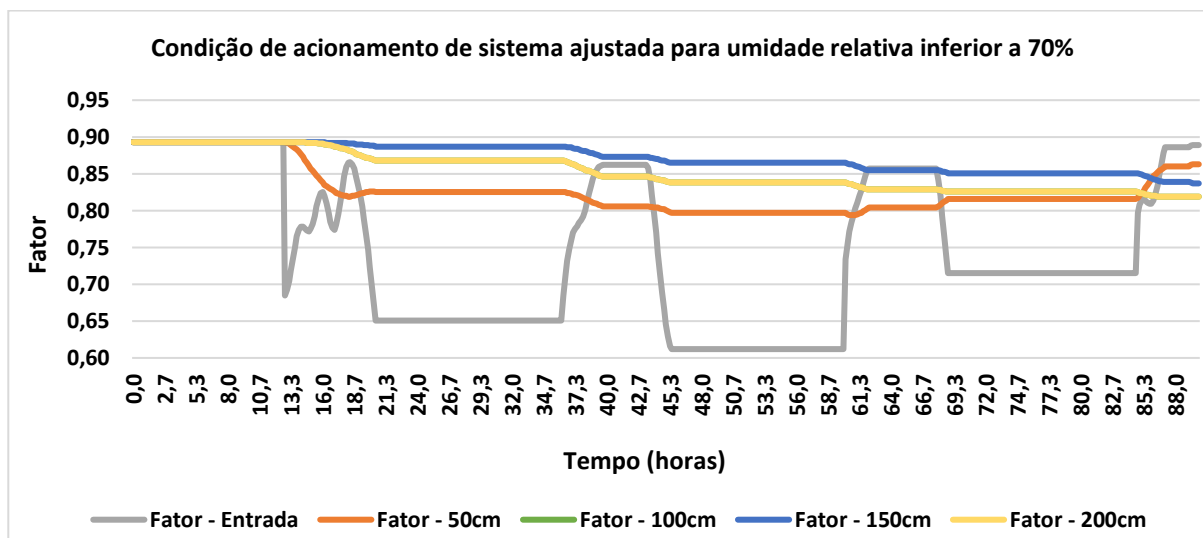


Gráfico 21 - Perfil de fator de crescimento microbiológico para Cenário 3. Condição de acionamento de sistema ajustada para umidade relativa inferior a 70% e temperatura externa inferior à temperatura média do produto. Fonte: próprio autor.

### 3.1.5. Cenário 4: Ligar o ventilador quando a umidade relativa for inferior a 70% e temperatura externa inferior a 3 graus da temperatura média

Neste item, a estratégia do manejo da aeração na simulação foi condicionada ao critério do ventilador ser ligado quando a umidade relativa for inferior a 70% e temperatura externa for inferior a 3°C em relação à temperatura média. O Gráfico 24 ilustra a dinâmica do fator de crescimento microbiológico nessas condições de aeração impostas.

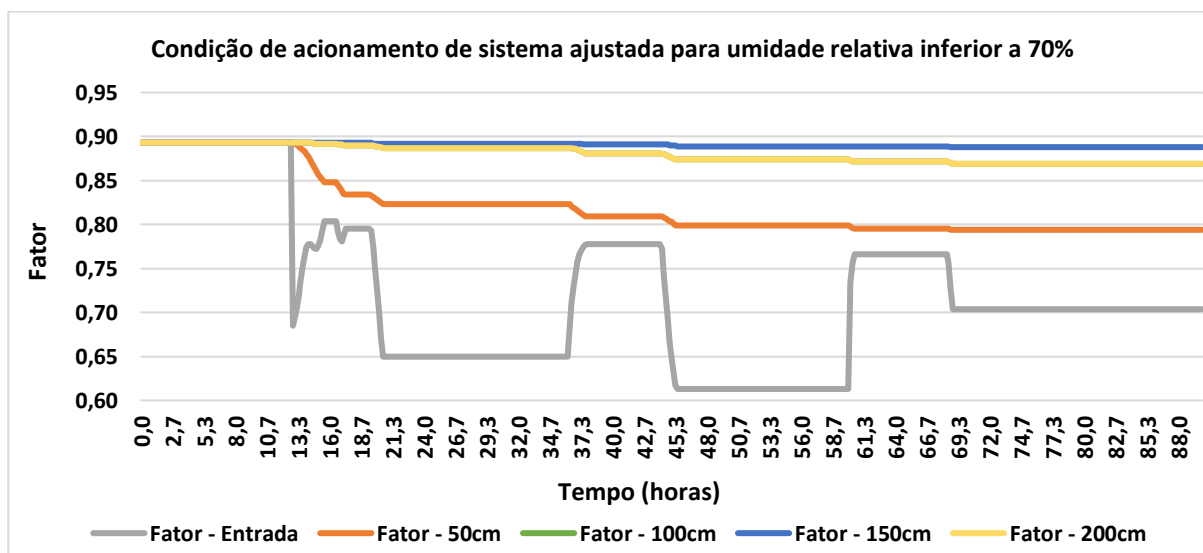


Gráfico 22 - Perfil de fator de crescimento microbiológico para Cenário 4. Condição de acionamento de sistema ajustada para umidade relativa inferior a 70% e temperatura externa inferior a 3 graus da temperatura média do produto. Fonte: próprio autor.

Nesse cenário, destaca-se a utilização de uma estratégia que inclui a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura média da massa de grãos, conforme pode ser observado no Gráfico 24. Implementou-se, na condição de acionamento, uma diferença de 3°C entre a temperatura do ar e a temperatura média dos grãos, impedindo que, depois do resfriamento do produto, ocorra um reaquecimento da massa, como ocorreu nos cenários anteriores. Desta forma, ciclos contínuos de operação podem conduzir o sistema, com um resfriamento constante, a uma condição de equilíbrio com o ar externo em baixas temperaturas.

Destaca-se que o modelo matemático utilizado desprezou os termos difusivos. Essa simplificação destaca forte influência do efeito convectivo no sistema de aeração e desconsidera o resfriamento por condução nas camadas de produto, evidenciando o perfil não uniforme de temperatura, teor de água do produto e, conseqüentemente, o fator de crescimento biológico.

#### 4. Conclusão

O objetivo neste trabalho foi o desenvolvimento de um modelo de simulação dinâmica para aeração de grãos por meio da técnica de dinâmica de sistemas, a partir de um modelo de aeração e microbiologia preditiva. As equações diferenciais que descreveram a transferência de calor e massa em um volume de controle aerado de grãos utilizada na metodologia foram discretizadas e integradas por uma técnica numérica utilizando a ferramenta de modelagem de simulação Anylogic, por meio da simbologia de estoque e fluxos na dinâmica de sistemas.

A estratégia de controle utilizada para o manejo da aeração procurou priorizar um resfriamento massa de grãos, estabelecendo-se três cenários e baseando-se em três parâmetros com diferentes critérios para ligar ou desligar o ventilador. As variáveis analisadas foram o teor de água dos grãos, a temperatura uniforme no interior do silo e a umidade do ar intergranular.

O primeiro critério teve por objetivo ilustrar os riscos de um sistema de aeração em pleno funcionamento, sem qualquer critério para acionamento ou desligamento do sistema, ou seja, ventilador ficou ligado ininterruptamente durante 90 horas. Os resultados deste critério se mostraram indesejados, pois, foi observado o aumento da temperatura do produto, do teor de água dos grãos nas primeiras camadas e condições que propiciam o crescimento biológico.

No segundo critério, três testes foram realizados avaliando-se a estratégia do manejo da aeração e parâmetro de acionamento do sistema quando a umidade relativa do ar fosse inferior a 50%, 60% e 70%, respectivamente. Os resultados mostraram que a temperatura e o teor de água do grão apresentaram maior uniformidade comparada ao primeiro cenário, mas a estratégia de controle apresentada é inviável, pois em todas as condições apresentadas o produto foi colocado em condições próximas àquelas propícias para o crescimento biológico, devido ao funcionamento do ventilador durante o dia (temperaturas elevadas), aumentando a temperatura no interior do silo.

No terceiro cenário, a estratégia foi condicionada ao critério do ventilador ser ligado quando a umidade relativa do ar fosse inferior a 50%, 60% e 70% e a temperatura externa ser menor que à temperatura média da massa de grãos. Neste cenário, a temperatura da massa de grãos foi uniforme e o teor de água dos grãos se manteve dentro da faixa segura para manutenção da qualidade do produto armazenado, pois, mesmo com 70% de umidade relativa do ar, o reumedecimento apresentado não foi elevado, mas, em termos de crescimento biológico, foi ineficaz, igualando-se ao cenário anterior, que, inicialmente, se afasta do ponto ótimo de reprodução biológica, mas com o passar do tempo retorna a crescer. Isso ocorre porque a temperatura

média se encontra alta e ela serve como critério utilizado para ligar o ventilador (temperatura externa menor que à temperatura média da massa de grãos), por isso o crescimento biológico volta a apresentar um crescimento considerável.

Para atingir temperatura uniforme e prevenção do aquecimento e umedecimento de origens biológicas, foi simulado o quarto cenário, no qual o critério estabelecido propôs que só seria permitido o processo de insuflação de ar dentro do silo quando a temperatura externa fosse inferior à temperatura média da massa de grãos menos 3°C. os resultados apresentaram um decréscimo nos valores da temperatura, ausência de umedecimento no produto e por, consequência, um declínio contínuo da reprodução biológica.

Como sugestões de trabalhos futuros, pode-se citar a utilização de inteligência artificial para controle referente ao funcionamento do ventilador (liga e desliga), bem como a implementação de técnicas de otimização do ponto de vista de energia e de qualidade.

### Referências

AGRIDRY. **Keep your cool... automatically**: aeration controllers. Australia: Agridry, 2014. Disponível em: [http://www.rimik.com/file/a4\\_aeration\\_flyer2.pdf](http://www.rimik.com/file/a4_aeration_flyer2.pdf). Acesso em: 9 out. 2021.

BARANYI, J.; ROBERTS, T. A. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food. **International Journal of Food Microbiology**, [S.L], v. 23, n. 3-4, p. 277-294, Nov. 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(94\)90157-0](https://doi.org/10.1016/0168-1605(94)90157-0).

BINELOA, M. O. *et al.* Airflow simulation and inlet pressure profile optimization of a grain storage bin aeration system. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.L], v. 164, Sep. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104923>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica da capacidade estática**. Brasília, DF: CONAB, 11 jan. 2019. (Série histórica da armazenagem). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/armazenagem/serie-historica-da-armazenagem>. Acesso em: 20 nov. 2021.

CORADI, P. C.; LEMES, A. F. C. Validation of an experimental prototype of thicklayer fixed bed dryer and determination of the quality of the dried soybean grains. **Acta Scientiarum. Agronomy [online]**, [S.L], v. 40, 2018. ISSN 1807-8621. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.35285>.

DOMBROWSKI, A. T. **Modelagem matemática e simulação 3D da distribuição do ar em secadores de fluxo misto**. 2019. 77 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS, 2019. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/handle/123456789/5946?show=full>. Acesso em: 20 nov. 2021.

FERRAZA, M.; BIAGGIONI, M. A. M.; DIAS, A. H. Sistema de monitoramento da temperatura e umidade em silos graneleiros via radiofrequência. **Energia na Agricultura**, [S.L], v. 25, n. 2, p. 139-156, 2010. ISSN 1808-8759. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2010v25n2p139-156>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Countries by commodity**. Rome, Italy: FAO, 2019. Disponível em: [https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commodity/](https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity/). Acesso em: 20 nov. 2021.

HUNG, B. N.; NUNTAPHAN, A.; KIATSIRIROAT, T. Integration of desiccant tray unit with internal cooling for aeration of paddy silo in humid tropical climate. **Biosystems Engineering**, [S.L], v. 102, n. 1, p. 75-82, Jan. 2009. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2008.09.029.

LOPES, D. C. *et al.* Aeration strategy for controlling grain storage based on simulation and on real data acquisition. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.L], v. 63, n. 2, p. 140-146, Oct. 2008. ISSN 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.02.002>.

LOPES, D. C. *et al.* Aeration simulation of stored grain under variable air ambient conditions. **Postharvest Biology and Technology**, [S.L], v. 42, n. 1, p. 115-120, 2006. ISSN 0925-5214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.05.007>.

MARTINS, J. H. *et al.* A system dynamics model to support the management of artisanal dredge fisheries in the south coast of Portugal. **International Transactions in Operational Research**, [S.L], v. 22, n. 4, p. 611-634, July 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/itor.12090>.

MOHAPATRA, D. *et al.* Critical factors responsible for fungi growth in stored food grains and non-Chemical approaches for their control. **Industrial Crops and Products**, [S.L], v. 108, p. 162-182, Dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.039>.



- NAVARRO, S. *et al.* Grain aeration. *In*: HAGSTRUM, D. W.; PHILLIPS, T. W.; CUPERUS, G. (ed.). **Stored product protection**. Kansas: Kansas State University, 2012. Chap. 11. p.121-134.
- NEME, K.; MOHAMMEDB, A. Mycotoxin occurrence in grains and the role of postharvest management as a mitigation strategies. **Food Control**, [S.L], v. 78, p. 412-425, Aug. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.03.012>.
- NUNES, M. G. P. **Determinação de micotoxinas por UPL-MS/MS em grãos armazenados sob condições de temperatura e atmosfera controlada**. 2019. 174 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Santa Maria, RS, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/17190>. Acesso em: 20 nov. 2021.
- PANIGRAHI, S. S.; SINGH, C. B.; FIELKE, J. Strategies to mitigate dead-zones in on-farm stored grain silos fitted with aeration ducting modelled using computational fluid dynamics. **Biosystems Engineering**, [S.L], v. 205, p. 93-104, May 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.02.013>.
- PARAGINSKI, R. T. *et al.* Quality of maize grains stored at different temperatures. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L], v. 19, n. 4, p. 358-363, Mar. 2015. DOI 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p358-363.
- PESSOA, A. R. M.; AMANTÉA, R. P. A system dynamics model for the study of fixed bed grain dryers. **International Journal of Applied Engineering Research**, [S.L], v. 16, n. 8, p. 696-708, Nov. 2021. ISSN 0973-4562.
- RAHMAN, S. **Handbook of food preservation**. 2. ed. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2007.
- SCHEMMINGER, J.; MBUGE, D.; HOFACKER, W. Ambient air cereal grain drying: simulation of the thermodynamic and microbial behavior. **Thermal Science and Engineering Progress**, [S.L], v. 13, Oct. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100382>.
- STEIDLE NETO, A. J.; LOPES, D. C. Thermistor based system for grain aeration monitoring and control. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.L], v. 116, p. 45-54, Aug. 2015. ISSN 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.06.004>.
- TARUVINGA, C.; MEJIA, D.; ALVAREZ, J. S. **Appropriate seed and grain storage systems for small-scale farmers**: key practices for DRR implements. Rome, Italy: FAO, 2014. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/2b5a0206-00d0-42fd-ac71-2a674d639969/>. Acesso em: 20 nov. 2021.
- THORPE, G. R. Modelling ecosystems in ventilated conical bottomed farm grain silos. **Ecological Modelling**, [S.L], v. 94, n. 2-3, p. 255-286, Jan. 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(96\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(96)00022-1).
- ZWIETERING, M. H., WIJZES, T., DE WIT, J. C., RIET, K. V. A Decision Support System for Prediction of the Microbial Spoilage in Foods. **J Food Prot.** [S.L], v..55, n. 12, p.973-979, 1992. DOI: 10.4315/0362-028X-55.12.973.