

**Evento:** XXX Jornada de Pesquisa ▾

APLICAÇÃO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA NO CONTROLE DE AERAÇÃO DE SILOS UTILIZANDO O MODELO REATOR HOMOGÊNEO ¹

Jeancarlo Fiorentini², Marcia de Fatima Brondani Binelo³, Manuel Osorio Binelo⁴

¹ Pesquisa de mestrado desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da UNIJUÍ, no Grupo de Pesquisa em Matemática Aplicada e Computacional - GMAC.

² Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da UNIJUÍ

³ Docente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da UNIJUÍ.

⁴ Docente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da UNIJUÍ.

INTRODUÇÃO

A produção de grãos está em constante crescimento no Brasil, exigindo maior capacidade de armazenamento. O armazenamento de grãos é um processo complexo, visto que os grãos estão suscetíveis à deterioração causada pela atividade biológica, pela ação de fungos, ácaros e insetos, além da possibilidade de oxidação (NAVARRO, 2012).

Dessa forma, objetivando evitar a deterioração dos grãos e manter uma temperatura adequada e homogênea, é necessária a realização do processo de aeração, que ocorre por meio do acionamento de ventiladores acoplados na base do silo, que forçam a passagem de ar ambiente pela massa de grãos (FAORO, 2018). Devido à localização da entrada de ar ventilado e ao aquecimento das paredes do silo pela radiação solar, o resfriamento dos grãos ocorre de forma desigual, tanto vertical quanto horizontalmente (KHATCHATOURIAN, 2017). A complexidade da aeração exige o uso de um sistema de termometria, que realiza medições periódicas da temperatura por meio de sensores distribuídos em diversos pontos da massa de grãos (FAORO, 2018).

Apesar de os processos supracitados serem eficientes, são necessárias modernizações, a fim de corrigir problemas no controle térmico e de reduzir o consumo de energia elétrica. Nesse sentido, uma tecnologia promissora é o machine learning (aprendizado de máquina), onde sistemas computacionais são programados para aprender com experiências passadas, empregando um processo de indução, que permite extrair conclusões genéricas a partir de um conjunto de exemplos. Uma das formas de aprendizado de máquina é o aprendizado por reforço, que ocorre por meio de um *feedback*, que recompensa uma ação considerada positiva e pune uma ação considerada negativa. O desenvolvimento de



algoritmos de aprendizagem geralmente utiliza redes neurais artificiais (RNA), algoritmos inspirados nas redes neurais do sistema nervoso humano (FACELI et al., 2024).

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa é desenvolver algoritmos de aprendizado de máquina, utilizando aprendizado por reforço e RNA, para o controle de temperatura em armazéns de grãos de soja. Para isso, serão obtidos dados sintéticos gerados por simulações de transferência de calor em silos com o modelo reator homogêneo (RH) e dados observacionais coletados de estações meteorológicas em diferentes épocas do ano.

METODOLOGIA

Este estudo iniciou com a obtenção de dados sintéticos sobre as alterações de temperatura em silos, por meio de simulações com o modelo reator homogêneo (RH). O modelo RH, que é descrito por Neutzling (2016), é um modelo de transferência de calor, onde a temperatura dos grãos submetidos à aeração é calculada com base na conservação de energia do sistema composto por grãos e ar quente.

No modelo RH, a função contínua $T = T(y, t)$ é substituída por um conjunto de valores $T_i^{(n)}$ em pontos isolados $(y_i, t^{(n)}) \in \Omega$; $i = 1, 2, \dots, M$; $n = 0, 1, \dots, N$ onde $\Omega = \{(y, t) | y \in [0, H]; t \in [0, t_{max}]\}$ é o domínio de integração e os números M e N apresentam os números de divisão espacial e temporal, respectivamente. A ventilação ocorre em baixas velocidades e, assim, assume-se um equilíbrio térmico instantâneo entre o ar e os grãos. Dessa forma, a energia cedida pela massa de grãos em uma camada Δy_i por um tempo Δt é igual à energia recebida pelo ar, o que é mostrado na relação abaixo:

$$c_g \cdot p_g \cdot A(1 - \epsilon)(Tg_i^{(n)} - Tg_i^{(n+1)}) = c_{pa} \cdot \rho_{pa} \cdot v \cdot A\epsilon \cdot A\epsilon(Tg_i^{(n+1)} - \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} Ta_{i-1}(\tau)dt) \quad (1)$$

Para o cálculo da integral, aplica-se a regra dos trapézios, obtendo-se uma fórmula de recorrência para o cálculo da temperatura das camadas de grãos nos pontos de tempo correspondentes, onde a variável ϵ representa o espaço intergranular, de modo que o termo $(1 - \epsilon)$ representa o espaço ocupado pelos grãos.

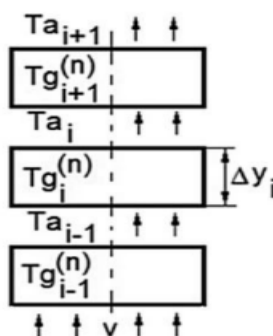
$$Tg_i^{(n+1)} = \frac{c_g \cdot p_g \cdot \Delta y_i \cdot (1-\epsilon) Tg_i^{(n)} + c_{pa} \cdot \rho_{pa} \cdot v \cdot \epsilon \cdot \Delta t (Tg_{i-1}^{(n)} + Tg_{i-1}^{(n+1)}) / 2}{c_g \cdot p_g \cdot \Delta y_i \cdot (1-\epsilon) + c_{pa} \cdot \rho_{pa} \cdot v \cdot \epsilon \cdot \Delta t} \quad (2)$$

A Figura 1 esquematiza o funcionamento do modelo RH, onde o ar que chega em uma camada de grãos entra em equilíbrio térmico com a temperatura do grão. Esse ar segue



então para a camada seguinte, onde o processo se repete. Assim, a variação da temperatura depende da condição térmica da camada anterior, da velocidade do ar e da porosidade.

Figura 1 - Esquema de resfriamento simplificado no modelo RH



Fonte: Adaptado de Neutzling (2016)

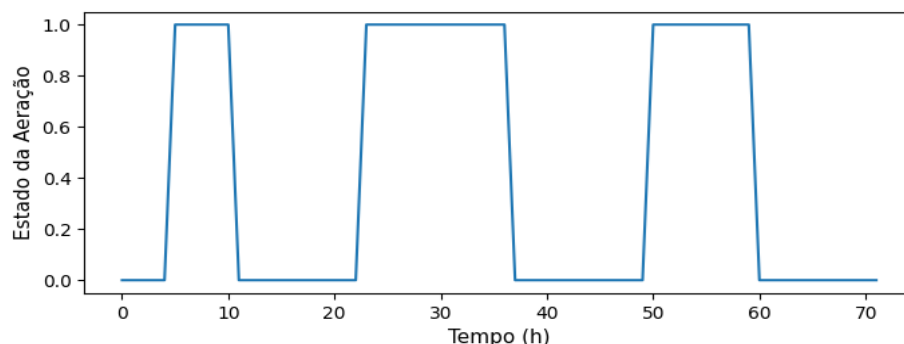
O modelo RH foi implementado em linguagem Python, onde foi incorporado um controlador simples, que atua como um sistema de decisão, onde a escolha pelo acionamento da aeração ocorre apenas quando o ar ambiente está mais frio que os grãos e quando a temperatura máxima supera o valor estabelecido como objetivo, neste caso, 15°C. Para a realização das simulações, também foram coletados dados de temperatura ambiente de uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, localizada no município de Santa Rosa - RS. Esses dados referem-se a temperaturas horárias de três dias consecutivos do mês de janeiro de 2025, totalizando 72 horas.

Os dados sintéticos gerados por meio do modelo RH servirão como base para a criação de um modelo de aprendizado de máquina, utilizando aprendizado por reforço e RNA. O aprendizado de máquina ainda está em desenvolvimento e, assim, os resultados que serão apresentados à frente são parciais e referem-se às simulações com o modelo RH.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as simulações com modelo RH, utilizando um controlador simples, o algoritmo analisou dados de temperatura ambiente de 72 horas, referentes aos dias 10, 11 e 12 de janeiro de 2025. Os resultados das simulações indicam que o controlador escolheu pelo acionamento da aeração 30 vezes, ou seja, foram 30 horas de aeração nos três dias analisados. O gráfico da Figura 2, demonstra em quais horários, o sistema decidiu pelo acionamento da ventilação ($y = 1$) e em quais momentos isso não aconteceu ($y = 0$).

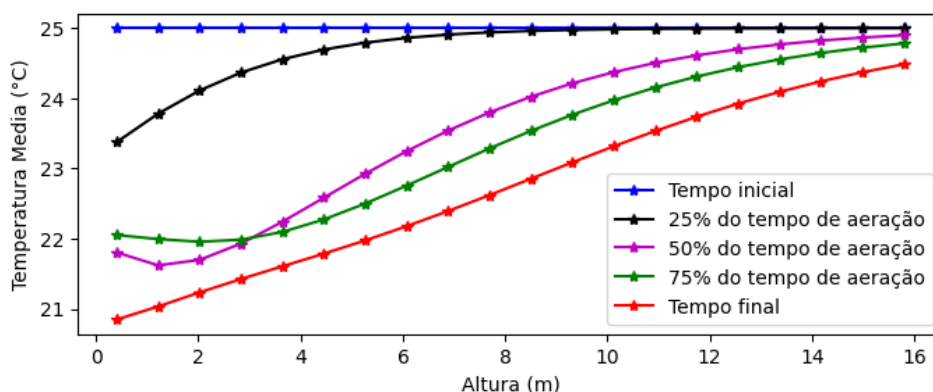
Figura 2 - Gráfico do funcionamento da aeração em função do tempo (0 = desligado, 1 = ligado)



Fonte: Autoria própria

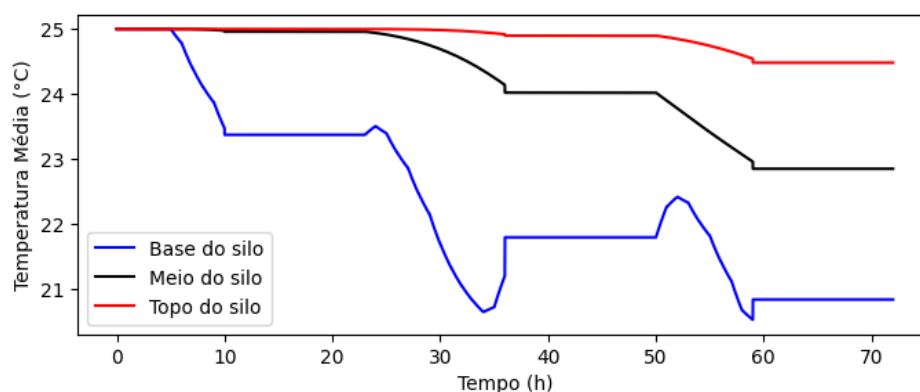
Quanto à distribuição do resfriamento, os resultados indicam uma certa desigualdade, o que é constatado na Figura 3, que apresenta a variação da temperatura dos grãos em função da altura, ao longo de diferentes instantes do tempo e pela Figura 4, que apresenta a variação térmica do grão em função do tempo de aeração para três camadas da massa de grãos.

Figura 3 - Gráfico da variação da temperatura em função da altura para diferentes instantes de tempo



Fonte: Autoria própria

Figura 4 - Gráfico da variação térmica em função do tempo para três camadas da massa de grãos



Fonte: Autoria própria



Em ambos os gráficos, observa-se que o resfriamento inicia-se na base do silo, próxima à entrada de ar, e avança gradualmente para as camadas superiores. Ao final do período, a base atinge temperaturas próximas de 21 °C, enquanto o topo permanece mais aquecido, evidenciando o resfriamento desigual.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos por meio de simulações com o modelo RH indicaram que o resfriamento no silo ocorreu de forma desigual, iniciando pela base e avançando gradualmente para as camadas superiores, que permaneceram mais aquecidas no final do processo. O controlador simples analisou dados de 72 horas e resultou em 30 acionamentos de aeração ao longo do período. Essas conclusões correspondem à etapa inicial da pesquisa e servirão de subsídio para a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina, utilizando aprendizado por reforço e RNA. Na sequência, o objetivo é modelar e implementar um modelo de controle baseado em redes neurais, e comparar sua eficácia e eficiência em relação ao controlador simples.

Palavras-chave: Aeração de Grão. Controle de Temperatura. Aprendizado de Máquina.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa conta com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FAORO, V. **Modelagem Matemática e Otimização do Fluxo de Ar em Armazéns Graneleiros**. Tese de Doutorado. Ijuí, RS: Unijuí, 2018.
- FACELI, K. et al. **Inteligência Artificial - Uma Abordagem de Aprendizado de Máquina**. Rio de Janeiro: LTC, 2024.
- KHATCHATOURIAN, O. *et al.* Models to predict the thermal state of rice stored in aerated vertical silos. **Biosystems Engineering**. v. 161, p. 14-23, 2017.
- NAVARRO, S. Advanced grain storage methods for quality preservation and insect control base don aerated or hermetic storage and IPM. **J.Agric. Eng.** v. 49, p. 13–20, 2012.
- NEUTZLING, R. **Modelagem matemática e simulação do escoamento de ar e estado térmico em silos armazenadores de grãos**. Dissertação de Mestrado. Ijuí, RS: Unijuí, 2016.