

Modelagem Matemática e Computacional de um Medidor de Umidade de Grãos

Marcelo C. Antunes¹, Manuel O. Binelo², Márcia B. Binelo³
PPGMMC/UNIJUÍ, Ijuí, RS.

Resumo. A verificação dos níveis de umidade em grãos desempenha um papel crucial na atividade agrícola, pois falhas nos sistemas de aferição podem impactar diretamente a cadeia produtiva e o valor econômico dos grãos. Este trabalho tem como objetivo desenvolver e modelar matematicamente um medidor de umidade de grãos, considerando a influência da variação da porosidade sobre os parâmetros elétricos de tensão e frequência. Para isso, foram conduzidos experimentos com grãos de soja e milho utilizando um protótipo capaz de registrar variações em medidas elétricas em função do teor de umidade. As análises foram realizadas por meio da Regressão Linear Múltipla (RLM) e das Redes Neurais Artificiais (RNA). Em uma segunda etapa, realizou-se uma simulação para avaliar a acomodação dos grãos em um recipiente e calcular a porosidade, utilizando o Método dos Elementos Discretos (MED), que permitiu modelar a geometria das partículas. Os resultados indicaram que o método baseado em RNA apresentou maior precisão na predição da umidade. Além disso, a análise da acomodação dos grãos revelou variações nos índices de porosidade, que se mostraram correlacionadas com as medições elétricas, sugerindo uma relação entre esses fenômenos.

Palavras-chave. Umidade, Medidas Elétricas, Modelagem, Porosidade.

1 Introdução

A umidade dos grãos é um fator crucial para sua qualidade, armazenamento e comercialização, impactando diretamente seu valor econômico e a viabilidade da produção agrícola [1]. Métodos tradicionais de medição, como as técnicas termogravimétricas, são amplamente utilizados, porém apresentam desvantagens, como o tempo prolongado de análise e a suscetibilidade a variações ambientais. Os métodos diretos de aferição baseiam-se na comparação entre a massa de água removida e a massa inicial dos grãos [2].

Por outro lado, os métodos indiretos oferecem vantagens, como menor tempo de medição e maior praticidade, utilizando propriedades dos grãos, especialmente as elétricas. Dispositivos no mercado correlacionam a variação dessas medidas com a variação da quantidade de água presente nos grãos, assumindo que estes apresentem um comportamento dielétrico.

Além disso, no que se refere ao estudo da variação de medidas elétricas em função da variação do teor de água presente nas amostras de grãos, é possível considerar a hipótese - associada a estudos anteriores [4, 6, 12, 13] - de que a leitura dos teores de umidade pode estar sendo influenciada por aspectos morfológicos das amostras. Este trabalho está organizado em cinco seções: Introdução, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões, Considerações Finais e Referências Bibliográficas.

¹marcelo.antunes@sou.unijui.edu.br

²manuel.binelo@unijui.edu.br

³marcia.binelo@unijui.edu.br

2 Materiais e Métodos

A investigação foi realizada em duas etapas. Em um primeiro momento, foram realizados ensaios de verificação de umidade com grãos de soja e milho através do método de estufa ($105 \pm 3^\circ\text{C}$). Após atingirem a temperatura ambiente, os grãos foram depositados em um equipamento com estrutura metálica, medindo 30 cm de largura, 45 cm de altura e 30 cm de profundidade. O aparelho é dividido em duas câmaras, onde foram avaliadas as medidas elétricas: tensão (V) e frequência (Hz). Dessa forma, foram ensaiadas 10 amostras com 10 repetições de grãos de soja e 10 amostras de 3 repetições de grãos de milho; o peso médio de ambas as amostras foi de 414g.

Neste estágio, também foi realizado o ensaio de secagem pelo método de estufa. Em seguida, os dados foram coletados e tabulados, dando início à análise por RLM, conforme os seguintes passos: (a) Definição das variáveis – a escolha das variáveis influenciou diversos fatores, incluindo o coeficiente de determinação (R^2), utilizado para medir a correlação entre elas; a umidade (u), foi definida como variável dependente, enquanto temperatura (x_1), frequência (x_2) e tensão (x_3) foram consideradas variáveis explicativas. (b) Análise gráfica e tabelas de dispersão - esta etapa foi realizada com o objetivo de verificar a pressuposta correlação entre a variável umidade (u) e cada uma das variáveis independentes. (c) Codificação e execução da RLM no software MATLAB - o modelo foi implementado e executado para análise dos dados.

O processamento dos dados por meio de RNA envolveu a utilização das bibliotecas NumPy (para processamento de matrizes e vetores), NeuroLab (para criação da rede neural), Pandas (para análise de dados) e Matplotlib (para geração de gráficos). A RNA foi desenvolvida com três entradas (temperatura, frequência e tensão) e uma saída (umidade). Os dados foram divididos em 80% para treinamento e 20% para teste. Além das camadas de entrada e saída (cada uma com um neurônio), a rede foi configurada com uma camada oculta contendo seis neurônios. Posteriormente, os valores medidos experimentalmente para a umidade foram utilizados como referência para ajuste dos parâmetros do modelo. Foram definidos o número de épocas (10.000) e o objetivo de erro (0,000001), que normatiza a tolerância ao erro. A validação dos resultados foi realizada por meio do cálculo do Erro Médio Absoluto (diferença entre o valor medido e o previsto) e do Erro Relativo (variação percentual em relação ao valor exato).

Na segunda etapa, foi realizada a modelagem do fluxo de grãos de soja e milho para analisar a acomodação das partículas em um aparato composto por um recipiente de acrílico em forma de caixa retangular acoplado a um funil. Na simulação, considerou-se que os grãos eram depositados cuidadosamente no recipiente, cuja base, que separa a caixa e o funil, encontrava-se inicialmente bloqueada. Após o acondicionamento dos grãos no funil, a base foi liberada, permitindo sua deposição na caixa retangular.

Para a simulação, a caixa retangular possuía uma base inferior de 120 mm \times 32,5 mm e altura de 147 mm, com a base superior aberta. O funil apresentava uma base menor aberta de 32,5 mm \times 120 mm, uma base maior aberta de 100 mm \times 120 mm e altura de 100 mm. A Tabela 1 apresenta as medidas [7] dos grãos de soja utilizadas na simulação.

Tabela 1: Medidas dos grãos de soja.

Umidade (% b.s.)	a (mm)	b (mm)	c (mm)
12	3.9	3.5	3.1

As medidas a , b e c , referem-se aos valores medidos dos grãos, análogos às medidas de um elipsoide, sobre os semieixos (x, y e z), conforme o modelo MS.

A Tabela 2 mostra as medidas [10] do comprimento (L), largura (W) e espessura (T) dos grãos de milho utilizadas nesta pesquisa.

Tabela 2: Medidas dos grãos de milho.

Umidade (% b.s.)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
12	9.76	7.82	3.9

Na fase posterior do estudo, as simulações visaram aprimorar a geometria das partículas com maior precisão. Para alcançar esse objetivo, foi essencial empregar um modelo interpretativo dos contatos entre os elementos do sistema [11], juntamente com um modelo matemático Multi Esferas (MS) [8, 9]. O suporte computacional foi fornecido pelo MED, um método numérico que requer um software capaz de executar suas operações.

O YADE (*Yet Another Dynamic Engine*) opera com estrutura de código aberto extensível para modelos numéricos discretos - sistema operacional Linux - via terminal de comando por meio de scripts em Python [8, 9]. Os grãos estudados possuem formato irregular, enquanto o MED opera com partículas esféricas. Portanto, recorreu-se à formação de *clumps*, partículas formadas por esferas ajustadas geometricamente para modelar outras formas, como por exemplo a elipse. Os grãos de soja foram modelados por *clumps* de 5 (soja) e 6 (milho) esferas. Os parâmetros utilizados, neste trabalho, relativos ao material do aparato e aos grãos constam na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros utilizados na simulação.

	acrílico	soja	milho
massa específica (kg/m ³)	740	1243 ^[a]	1163 ^[b]
módulo de Young (Pa)	12,5 x 10E6	2,6E6 ^[a]	3,0E8 ^[b]
coeficiente de Poisson	0,25	0,25 ^[a]	0,4 ^[b]
ângulo de atrito (Rad)	0,593	0,39 ^[a,b]	0,33 ^[b]

Referências: [a] - [3], [b] - [5]

3 Resultados e Discussões

Nesta seção, são apresentados os resultados da modelagem da umidade dos grãos de soja e milho a partir dos métodos de RLM e RNA, além do estudo do impacto da morfologia dos grãos na porosidade durante a acomodação das partículas no sensor.

No MATLAB, foram inseridas as matrizes referentes a cada variável e, após o processamento, obtiveram-se os coeficientes que formam as equações correspondentes aos modelos de regressão para os grãos de soja (1) e milho (2), apresentadas a seguir:

$$u_s(x_1, x_2, x_3) = -2,7465 + 0,21902x_1 + 0,000035157x_2 + 0,01371x_3 \quad (1)$$

e

$$u_m(x_1, x_2, x_3) = 9,1506 - 0,6506x_1 + 0,0001x_2 + 0,001x_3, \quad (2)$$

onde x_1 , x_2 e x_3 representam, respectivamente, a temperatura, a diferença de frequência e a tensão; u_s , o teor de umidade nos grãos de soja e u_m , o teor de umidade nos grãos de milho.

Após o treinamento da rede neural artificial utilizando a plataforma Google COLAB, foram registrados valores para os erros de treinamento e teste das amostras de soja e milho.

A Figura 1 representa a comparação entre o erro produzido, em relação aos valores obtidos no ensaio por secagem, pelo modelo de RLM e por RNA para os grãos de soja. O gráfico 2 apresenta a mesma comparação, mas para as amostras de grãos de milho. Em ambos os gráficos foram utilizadas escalas logarítmicas.

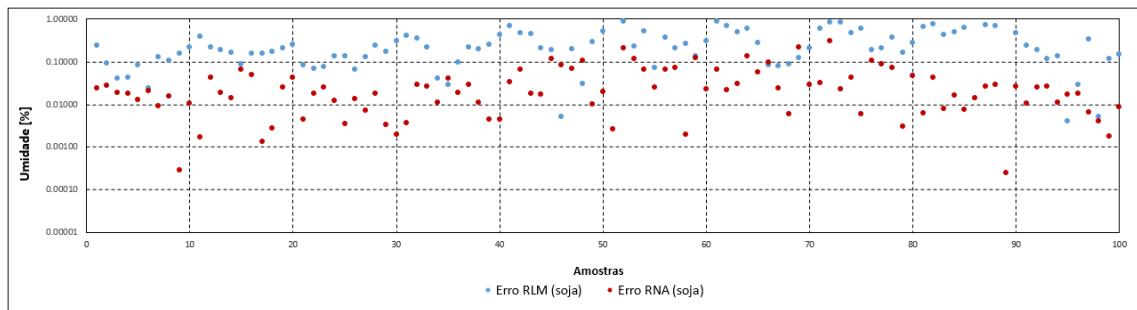


Figura 1: Erro Absoluto - RLM x RNA (soja). Fonte: própria dos autores.

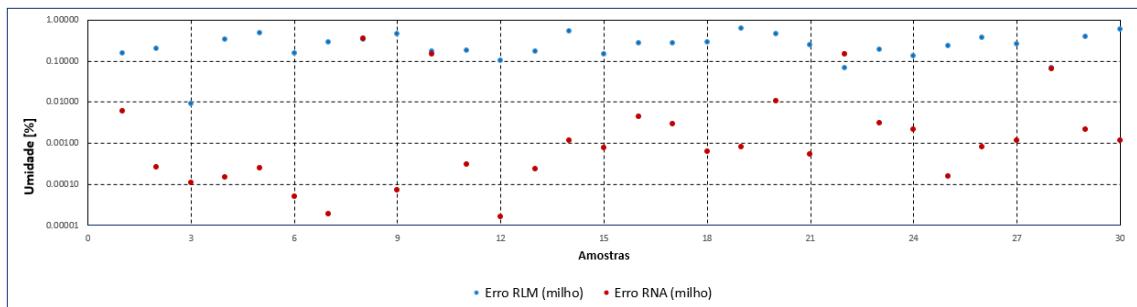


Figura 2: Erro Absoluto - RLM x RNA (milho). Fonte: própria dos autores.

Os gráficos demonstram que os resultados fornecidos pelo modelo de RLM exibem uma dispersão mais pronunciada em comparação com aqueles gerados pela RNA, em relação aos dados adquiridos nos ensaios (parâmetros). A Tabela 4 mostra uma comparação através dos erros (pontos percentuais).

Tabela 4: Comparação do erro absoluto.

Grãos	e_{RLM}	$e_{RN\ treino}$	$e_{RN\ teste}$
milho	0,2734	0,002	0,1026
soja	0,3074	0,0309	0,06

Os resultados provenientes do estudo do impacto da morfologia dos grãos na porosidade durante o fluxo e a acomodação das partículas derivaram da simulação e cálculo da porosidade, apresentada na Figura 3.

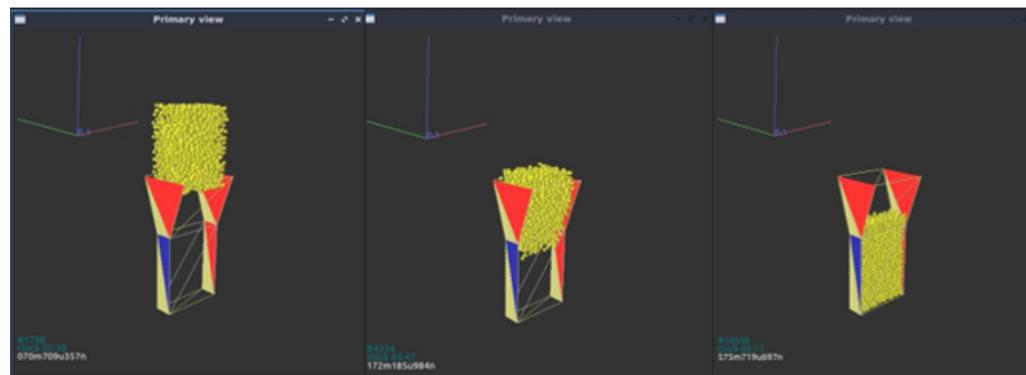


Figura 3: Simulação - 1 esfera (soja). Fonte: própria dos autores.

O cálculo da porosidade é realizado quando todas as partículas preenchem o receptáculo e o escoamento cessa. No intuito de promover uma aproximação da forma geométrica real dos grãos de soja, foram elaborados *clumps*. Desta forma, além da modelagem que representa os grãos de soja como uma esfera, há a proposição de outro modelo, que busca uma maior aproximação do formato dos grãos, a partir de conformações que incluem várias subesferas. A Figura 4 mostra a modelagem de grãos de soja a partir de esferas (A) e *clumps* (B); este último, formado por 5 subesferas (via modelo MS). A Figura 5 mostra a modelagem para grãos de milho com *clumps* de 12 (A) e 6 (B) subesferas.

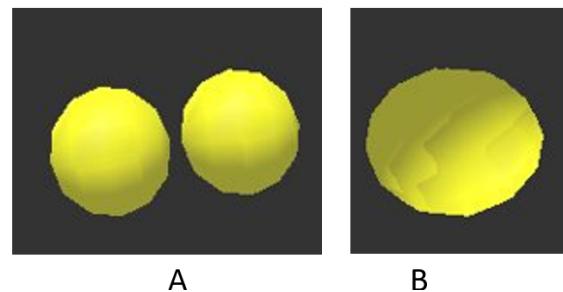


Figura 4: Comparaçāo esfera - *clump* (soja). Fonte: própria dos autores.

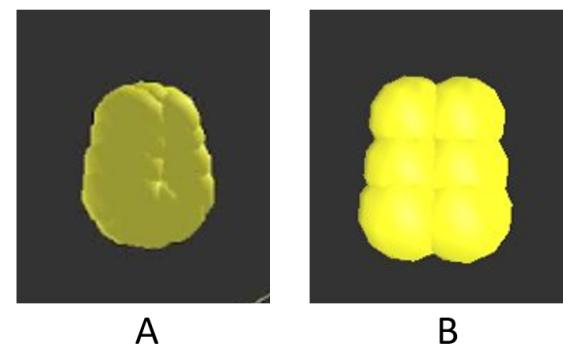


Figura 5: Comparaçāo esfera - *clump* (milho). Fonte: própria dos autores.

Devido ao alto custo computacional, neste trabalho, foram utilizados *clumps* com 5 subesferas para a soja e 6 para o milho. Os resultados com os valores da porosidade medidos nas simulações com grãos de soja são apresentados pela Tabela 5.

Tabela 5: Medidas dos grãos de soja.

	coeficiente de variação		
	porosidade	tensão	frequência
milho(<i>clu</i>)	0,0055	0,0471	0,0070
soja(<i>esf</i>)	0,0139	0,1025	0,0086

A Tabela 5 apresenta os dados relativos à variação da porosidade dos grãos, os quais foram derivados da análise de dispersão das variáveis frequência e tensão em cada amostra, mantendo constante a faixa de umidade. Posteriormente, foi conduzida uma análise das variações nas medidas de porosidade.

A hipótese examinada sugere que a variação da porosidade, resultante da acomodação dos grãos no aparato, pode influenciar nas alterações das medidas elétricas para uma mesma amostra de grãos. Dada a extensão dos dados considerados, não foi possível calcular a correlação entre as variações das medidas elétricas de tensão e frequência e a variação da porosidade.

Contudo, uma análise global dos dados foi realizada para determinar se apresentavam uma tendência comum e, com base nisso, inferir uma possível relação de causa e efeito entre as variáveis. Observou-se que a variação da porosidade nos grãos de soja foi maior do que nos grãos de milho, assim como a variação da tensão e frequência. Isso sugere uma possível relação de causa e efeito entre a variação da porosidade e as medidas elétricas, indicando que a porosidade pode influenciar tais medidas.

É importante salientar que outras variáveis podem estar afetando as medidas elétricas além da porosidade. Portanto, para determinar com segurança a existência de uma relação de causa e efeito entre as variáveis, uma análise mais aprofundada é necessária.

4 Considerações Finais

Neste estudo, foram utilizadas técnicas de modelagem matemática e computacional para determinar o teor de umidade em grãos de soja e milho, considerando medidas elétricas e a influência da morfologia das partículas no escoamento. Tanto a RLM quanto as RNA foram empregadas para desenvolver modelos preditivos. Os resultados indicaram que a RNA foi mais eficaz na inferência do teor de umidade, apresentando erros menores que a RLM. Levantou-se a hipótese de que a morfologia dos grãos poderia influenciar a variação da porosidade e, consequentemente, nas medidas elétricas. Simulações numéricas apoiaram essa hipótese, mostrando uma correlação entre a variação da porosidade e das medidas elétricas. No entanto, são necessárias mais investigações, incluindo outros tipos de grãos e uma análise mais detalhada dos mecanismos envolvidos, para confirmar essa relação.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- [1] M. A. Bakhtavar e I. Afzal. “Seed storage and longevity: mechanism, types and management”. Em: **Advances in Seed Production and Management**. Ed. por M. Cojocaru, I. Kotsireas, R. Makarov, R. Melnik e H. Shodiev. Springer, 2020. Cap. 21, pp. 451–468. ISBN: 978-981-15-4198-8. DOI: 10.1007/978-981-15-4198-8_21.
- [2] B. K. Bala. **Drying and Storage of Cereal Grains**. 2^a ed. Wiley-Blackwell, 2016. ISBN: 978-1-119-12423-8.
- [3] J. M. Boac, M. E. Casada, R. G. Maghirang e Joseph P. Harner III. “3-D and Quasi-2-D Discrete Element Modeling of Grain Commingling in a Bucket Elevator Boot System”. Em: **Transactions of the ASABE** 55.2 (2012), pp. 659–672. ISSN: 2151-0032. DOI: 10.13031/2013.41367.
- [4] G. Deshmukh, P. Birwal, S. Patel, R. Datir e A. Surywanshi. “Sorption Isotherms of Traditional Indian Dairy Products: A Review”. Em: **Journal of Food, Nutrition and Population Health** 1.3 (2017), p. 25. ISSN: 2277-7695.
- [5] C. González-Montellano, E. Gallego, Á. Ramírez-Gómez e F. Ayuga. “Three dimensional discrete element models for simulating the filling and emptying of silos: Analysis of numerical results”. Em: **Computers and Chemical Engineering** 40 (2012), pp. 22–32. ISSN: 0098-1354. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2012.01.006.
- [6] A. Kakade, S. Khodke, S. Jadhav, M. Gajabe e N. Othzes. “Effect of Moisture Content on Physical Properties of Soybean”. Em: **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences** 8.4 (2019), pp. 1775–1784. ISSN: 2319-7706. DOI: 10.20546/ijcmas.2019.804.206.
- [7] H. Kibar e T. Ozturk. “Physical and mechanical properties of soybean”. Em: **International Agrophysics** 22.3 (2008), pp. 239–244. ISSN: 0236-8722.
- [8] D. Markauskas, R. Kačianauskas, A. Džiugys e R. Navakas. “Investigation of adequacy of multi-sphere approximation of elliptical particles for DEM simulations”. Em: **Granular Matter** 12 (2010), pp. 107–123. ISSN: 1434-5021. DOI: 10.1007/s10035-009-0158-y.
- [9] D. Markauskas, Á. Ramírez-Gómez, R. Kačianauskas e E. Zdancėvičius. “Maize grain shape approaches for DEM modelling”. Em: **Computers and Electronics in Agriculture** 118 (2015), pp. 247–258. ISSN: 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2015.09.004.
- [10] A. Netam, K. K. Patel e R. K. Naik. “Moisture Dependent Physical Properties of Maize Cobs and Kernels”. Em: **The Pharma Innovation Journal** 10.12S (2021), pp. 332–337. ISSN: 2277-7695.
- [11] J.-P. Plassiard e F.-V. Donzé. “Rockfall Impact Parameters on Embankments: A Discrete Element Method Analysis”. Em: **Rock Mechanics and Rock Engineering** (2009). ISSN: 1016-8664. DOI: 10.2749/101686609788957874.
- [12] S. S. Shirhole, R. N. Kenghe e P. M. Nimkar. “Moisture Dependent Physical Properties of Soybean”. Em: **International Journal of Engineering Science and Technology** 3.5 (2011), pp. 3807–3815. ISSN: 0975-5462.
- [13] S. V. Wandkar, P. D. Ukey e D. A. Pawar. “Determination of Physical Properties of Soybean at Different Moisture Levels”. Em: **Agricultural Engineering International: CIGR Journal** 14.2 (2012), pp. 138–142. ISSN: 1682-1130.