

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA A SEPARAÇÃO EFICIENTE DO ARROZ POR NÍVEIS DE UMIDADE

Isaque Manassés Kleinschmidt¹, Gustavo Bisognin²

Resumo: Este estudo teve como objetivo a concepção e análise de sensores capacitivos de baixo custo para a aferição do teor de umidade em grãos de arroz, com vistas a subsidiar sistemas automatizados de separação por faixas de umidade. Inicialmente, foi realizada uma avaliação do desempenho de sensores comerciais de umidade de solo e de um protótipo resistivo artesanal, aplicados em amostras com teores de umidade de 17,8%, 20,1% e 22,8%. Na sequência, foram desenvolvidos sensores capacitivos compostos por chapas de alumínio de 4 × 4 cm, testando-se dois espaçamentos entre as placas (5 mm e 1 cm) e três valores de resistência elétrica (200 k, 460 k e 1 M). Para cada configuração experimental, foram realizadas quatro repetições com dez coletas por faixa de umidade, conduzidas por meio de um algoritmo desenvolvido para automatização do processo de aquisição de dados. Os valores obtidos foram submetidos a cálculos estatísticos de média com o intuito de mitigar a dispersão e reduzir o erro associado às medições. Em uma etapa complementar, investigou-se o impacto da duração do pulso de carga sobre a estabilidade das respostas dos sensores. O percurso metodológico adotado permitiu identificar as principais variáveis envolvidas, geometria dos eletrodos, valor da resistência e tempo de carga como elementos críticos para orientar o aprimoramento de sensores em aplicações futuras.

Palavras-chave: Sensor capacitivo; Umidade de grãos; ESP32.

¹Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), kleinschmidtisaque@gmail.com

²Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), gustavo@unesc.net

ABSTRACT: This study aimed to design and analyze low-cost capacitive sensors for measuring moisture content in rice grains, with a view to supporting automated sorting systems based on moisture levels. Initially, we evaluated the performance of commercial soil moisture sensors and a handmade resistive prototype, applying them to samples with moisture contents of 17.8%, 20.1%, and 22.8%. Subsequently, we developed capacitive sensors made of 4 × 4 cm aluminum plates, testing two plate spacings (5 mm and 1 cm) and three electrical resistance values (200 k, 460 k, and 1 M). For each experimental configuration, we performed four repetitions with ten data collections per moisture range, guided by an algorithm developed to automate the data acquisition process. The obtained values underwent statistical mean calculations to mitigate dispersion and reduce measurement error. In a complementary step, we investigated the impact of charge pulse duration on sensor response stability. The adopted methodological approach allowed us to identify the main variables involved—electrode geometry, resistance value, and charge time as critical elements to guide the improvement of sensors in future applications.

Keywords: Capacitive sensor; Grain moisture; ESP32.

1 INTRODUÇÃO

No avanço da modernização da agricultura, a utilização de sistemas automatizados tem sido notável e relevante como uma ferramenta crucial para o aumento da eficácia e da sustentabilidade na produção de alimentos. Entre os principais grãos cultivados no mundo, o arroz assume papel central por ser alimento básico para mais da metade da população global (Juliano, 1993). O processo de secagem está ligado a qualidade final do arroz, sendo a etapa fundamental no pós-colheita que busca reduzir o teor de umidade dos grãos a níveis confiáveis para armazenamento. No entanto, são enfrentados problemas consideráveis neste processo, como a secagem desigual, o consumo significativo de energia e perdas econômicas resultantes da deterioração dos grãos (Boemeke et al., 2024; Meneghetti; Fagundes; Amaral, 2024).

Observando essa questão, surge a problemática que encoraja este estudo: a ineficiência dos métodos tradicionais de secagem e a carência de um sistema apto para monitorar e separar os grãos de arroz com base em diferentes níveis de umidade antes do armazenamento. Grãos com teores distintos de umidade necessitam de tratamentos específicos

e, quando inadequadamente separados, podem danificar a qualidade do produto final, além de obter maior risco de contaminação por fungos e desenvolver prejuízos econômicos para os produtores (Destreza; Buenas; Atienza, 2023).

O tema escolhido tem mérito pelo valor científico e prático. Utilizando sensores de umidade embarcados e um microcontrolador ESP32, para a implementação de um sistema automatizado, é exibido como uma solução eficaz para otimizar esse processo. Possibilitando a leitura contínua da umidade dos grãos durante a descarga, guiando o fluxo para silos adequados de forma autônoma, além de enviar os dados para um servidor via API, permitindo o controle em tempo real e armazenamento histórico das medições.

O propósito geral deste trabalho é aprimorar a eficácia do processo de secagem de arroz pela separação precisa dos grãos em diferentes faixas de umidade, por um dispositivo automatizado. Os objetivos incluem desenvolver um sistema de leitura automática de umidade durante a descarga do caminhão, desviar o fluxo de arroz para silos adequados com base nas leituras adquiridas, enviar as informações para um servidor remoto por meio de uma API, assegurando maior uniformidade na secagem, diminuindo perdas e aumentando a eficiência do processo.

Apoia-se nesta teoria sensores de umidade, microcontroladores e sistemas de controle automatizados. Sensores capacitivos e resistivos são amplamente usados para medir a umidade relativa e total em materiais, cruciais em contextos de agricultura de precisão, onde a segurança das medições afeta a qualidade do produto (Chen; Lu, 2005)(Mecnika et al., 2015). O ESP32, microcontrolador com conectividade Wi-Fi e Bluetooth, exibe alto desempenho e baixo consumo de energia, para aplicações em Internet das Coisas e automação agrícola (Song et al., 2023). Já os sistemas de controle industrial, baseados em lógicas programáveis e tecnologias SCADA, são vitais para assegurar o funcionamento com eficácia e segurança de processos automatizados (Zheng et al., 2018).

O trabalho está estruturado da seguinte forma: a primeira seção apresenta o problema de pesquisa, justifica a escolha do tema, expõe os objetivos gerais e específicos e traz a fundamentação teórica; a segunda seção revisa os artigos utilizados como base, destacando suas limitações em relação ao tema; a terceira seção detalha a metodologia e o processo de desenvolvimento da pesquisa, desde a definição do tema até a análise dos resultados; a quarta seção discute os resultados obtidos, compara-os

com trabalhos relacionados e aponta as limitações identificadas; por fim, a conclusão sintetiza os principais achados em relação aos objetivos, indica as contribuições do estudo, ressalta suas limitações e sugere direções para pesquisas futuras.

2 TRABALHOS CORRELATOS

Este estudo se firma em trabalhos correlatos que relatam métodos modernos para aferição de umidade e classificação de grãos, como a tomografia radiográfica com ponderação de voxel, que entrega mapeamento espacial detalhado e alta correlação linear com o teor de umidade ($> 0,95$) mas precisa de equipamentos caros e não considera a separação em tempo real (Ramli et al., 2021), e os sensores dielétricos, que resultam em 3 medições não destrutivas e baixo custo, mas necessitam de calibrações específicas para cada tipo de grão e não abrangem automação na distribuição de lotes conforme a umidade (Jones; Sheng; Or, 2022). Há estudos, que se aprofundam na inteligência artificial para classificação morfológica de arroz, atingindo até 93,5% de precisão e AUC (Area Under the Curve) de 99,2% em SVM (Support Vector Machine), mas concentra-se somente na distinção de variedades, sem participação na gestão do processo de secagem (Çınarer; Erbaş; Öcal, 2024), já os métodos centrados em redes de sensores sem fio e RFID (Radio-Frequency Identification) conseguem mais de 99% de exatidão no monitoramento contínuo de umidade, mas necessitam de infraestrutura extensa (Azmi et al., 2021). Contudo, nosso sistema incorpora sensores de umidade, microcontroladores e algoritmos de análise de dados em apenas um dispositivo, concedendo a leitura em tempo real e classificação dinâmica dos grãos conforme a umidade aferida, aprimorando a precisão da secagem e reduzindo o consumo de energia e custos operacionais, exercendo um desempenho maior e também a sustentabilidade na produção de arroz.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste projeto determinou uma integração eficiente entre hardware e software, iniciando-se pela configuração do ambiente de desenvolvimento. A aplicação web foi executada localmente usando o editor Visual Studio Code (VSCode), na versão 1.96.4, por ser uma ferramenta versátil. A arquitetura do servidor foi formada com o framework Django, consultando uma máquina virtual utilizando Ubuntu Server 22.04.5 LTS por meio da extensão Remote - SSH. Paralelamente, a programação

do microcontrolador ESP32 foi feita na Arduino IDE, sendo este material escolhido por sua simplicidade, oferecendo uma compatibilidade nativa com o ESP32 e diversa comunidade de suporte. Com essa separação entre os ambientes de desenvolvimento, consentiu uma cooperação precisa entre as partes web e embarcada, assegurando que os dados pudessem fluir entre sensores e servidor de forma disciplinada. Importante destacar que a metodologia adotada neste trabalho foi de natureza qualitativa, com ênfase na análise interpretativa dos dados coletados a partir dos sensores e na observação do comportamento dos dispositivos em diferentes condições experimentais. Teve como propósito na escolha das tecnologias usadas no backend, uma visão cordial dos dados, assegurar a robustez e o desempenho. O Django 3.2.12 foi utilizado como framework principal do servidor web, tendo a função de processar e mostrar os dados emitidos pelos sensores conectados ao ESP32. Estes dados foram guardados no banco de dados relacional PostgreSQL, usado por sua confiabilidade e recursos de consulta sofisticados. Pela interface gráfica pgAdmin o gerenciamento do banco foi aprimorado. Com HTML, CSS e Bootstrap, a interface do usuário foi desenvolvida, permitindo a criação de um dashboard web responsivo e moderno, sendo exibidos os dados por meio de gráficos e indicadores visuais, em tempo real.

Referente ao hardware, o microcontrolador ESP32 foi o elemento principal da aquisição de informações. Provido de conectividade Wi-Fi, o ESP32 foi empregado para coletar as informações dos sensores e enviá-las ao servidor por requisições HTTP no formato JSON. Para programar o microcontrolador a Arduino IDE foi utilizada, configurando a leitura periódica dos sensores e o envio dos dados. O Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2 teve maior ênfase e destaque entre os sensores utilizados, apresentando maior estabilidade nas medições, e portanto, mais confiável que os sensores resistivos e sensores da série MS, que para fins comparativos também foram testados.

Com o objetivo de determinar a umidade do arroz, determinou-se pela utilização de sensores feitos para medição de umidade em solos, em detrimento de sensores de umidade relativa do ambiente. Esta decisão se baseia no princípio de funcionamento dos sensores e na natureza do material observado.

Sendo material granular, o arroz armazena a umidade nos espaços intersticiais entre os grãos e em seu interior. A atuação dos sensores de umidade de solo detectam as alterações nas propriedades elétricas (capa-

citância ou resistência) do meio sólido/granular em função do teor de água presente. Dessa forma, este conceito se alinha voltado para a necessidade de quantificar a umidade obtida na massa de arroz.

No entanto, a fim de medir a concentração de vapor d'água na atmosfera circundante, os sensores de umidade do ambiente são calibrados. A sua aplicação primária não reside na avaliação direta da umidade interna de materiais sólidos e sim no monitoramento das condições climáticas do ar.

Contudo, é notório que a aplicação de sensores de umidade de solo apresentou ser metodologicamente mais coerente para a medição da umidade intrínseca do arroz, obtendo informações mais caracterizadas do teor de água no material em estudo.

Por meio de requisições HTTP POST, ocorreu a interação entre o servidor web e o ESP32, nas quais o microcontrolador entregava periodicamente as informações obtidas em formato JSON para uma API desenvolvida em Django. Por fim, esses dados eram guardados e validados no banco PostgreSQL, possibilitando a disponibilidade imediata para ser visualizado no dashboard web.

No início foram avaliados por meio de testes com sensores, três modelos diferentes de sensores de umidade de solo: dois sendo do tipo capacitivo e um resistivo. Neste caso, notou-se que tais sensores demonstram limitações relevantes na detecção de mudanças de umidade em grãos de arroz. Sendo então, apresentado leituras imprecisas ou inconsistentes, principalmente na tentativa de diferenciar níveis relativamente próximos de umidade. Ao observar essas limitações, determinou-se o desenvolvimento de um sensor capacitivo próprio, ajustado às especificidades físicas do arroz armazenado.

Na tentativa inicial incluiu a construção de um sensor resistivo usando chapas de alumínio de 4x4 cm recortadas de latas de refrigerante. Dessa forma, devido à espessura do material demasiadamente fina, notou-se grande fragilidade e frequentes deformações, prejudicando a estabilidade e as repetições das medições. Além da estrutura inadequada do sensor, demonstrou-se um comportamento extremamente instável nos testes práticos, o que impediu a continuidade dessa abordagem.

Visando a maior estabilidade e sensibilidade, decidiu-se realizar a construção de um sensor capacitivo. Obtido em loja de materiais de construção, foi utilizado chapas de alumínio mais espessas e confeccionadas placas com dimensões de 4x4 cm. De início, foi realizado o teste com

um espaçamento de 5 mm entre as placas, porém a quantidade reduzida de grãos que conseguia penetrar no espaço prejudicava diretamente os resultados, obtendo variações elevadas entre as medições. Neste caso, com o intuito de resolver essa questão, aumentou-se o espaçamento de 1 cm entre as chapas, conservando a dimensão das placas em 4x4 cm.

Fundamentando-se no princípio da capacitância, ocorre o funcionamento do sensor capacitivo desenvolvido que depende de três fatores: área das placas, distância entre elas e o material dielétrico entre as mesmas. Buscando ampliar a área de contato e, conseqüentemente, a sensibilidade do sensor, é obtido a escolha pelas dimensões de 4x4 cm. O espaçamento de 1 cm, embora diminua um pouco a capacitância absoluta, concede uma quantidade maior de grãos entre as chapas, transformando a amostragem com mais representação. Conforme sua umidade, varia a constante dielétrica do meio (neste caso, o arroz): à medida que aumenta a umidade, aumenta a constante dielétrica, promovendo maior capacitância entre as placas. Dessa forma, essa variação é identificada eletronicamente e decifrada como uma aproximação do nível de umidade do grão.

Foram adquiridas amostras de arroz com casca em uma empresa local especializada no beneficiamento do grão para a calibração e validação do sensor desenvolvido. Apresentavam teores de umidade de 17,8%, 20,1% e 22,8% nas amostras. Segundo a medição obtida com um equipamento profissional Motomco 999 ESI, calibrado pela empresa Master Calibrações. Com base nestes dados em referência, tornou-se viável comparar as leituras adquiridas pelo sensor desenvolvido e examinar sua resposta diante de distintos níveis reais de umidade.

Em recipientes plásticos as amostras foram adicionadas, e de forma a assegurar o contato com os grãos o sensor capacitivo foi posicionado. As leituras, executadas via ESP32, foram divulgadas ao servidor Django e registradas conforme metodologia previamente descrita. Esta fase experimental foi crucial para validar o sensor construído e examinar sua capacidade de identificar variações sutis de umidade em materiais granulares com baixa condutividade elétrica. Os dados adquiridos e as limitações detectadas serão debatidos com mais detalhes na seção de Resultados e Discussão.

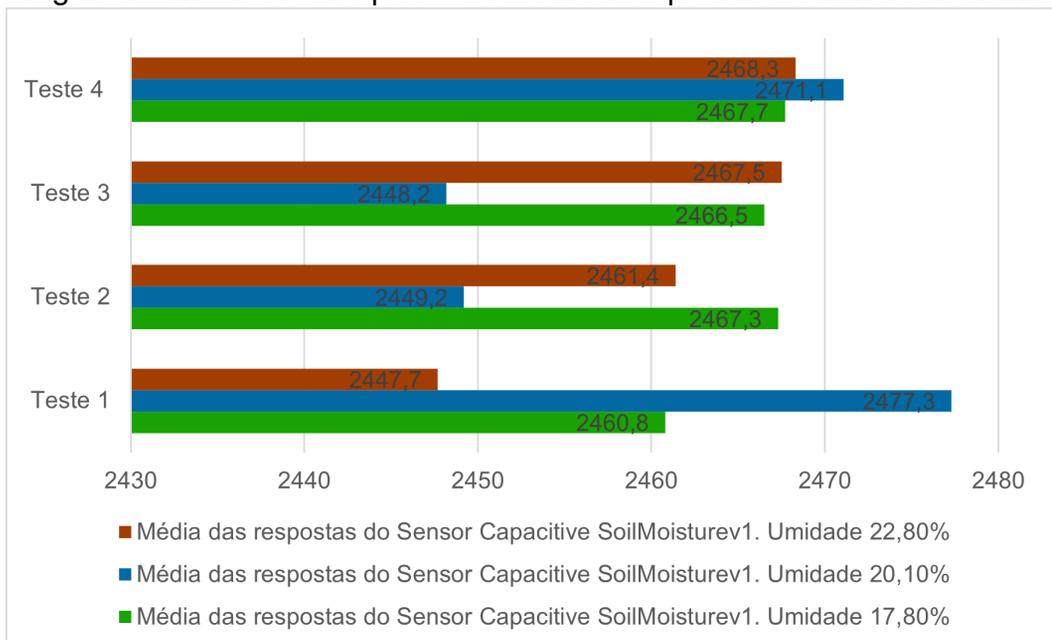
4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

Nas primeiras etapas dos testes, três sensores comerciais de umidade de solo foram avaliados em arroz com teores de umidade de

17,8%, 20,1% e 22,8%. Para cada condição, realizou-se um conjunto de 10 coletas de dados consecutivas, e esse mesmo conjunto foi repetido quatro vezes (Testes 1 a 4). Em seguida, calculou-se a média de cada bloco de 10 coletas para cada repetição, comparando-se essas quatro médias entre si e entre as diferentes faixas de umidade.

O Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2 (Figura 1)) apresentou para 17,8% de umidade médias que variaram de cerca de 2 460,8 μ s a 2 467,7 μ s; em 20,1%, as leituras oscilaram entre aproximadamente 2 448,2 μ s e 2 477,2 μ s; e, em 22,8%, as médias ficaram entre 2 447,7 μ s e 2 468,3 μ s. Mesmo calculando a média de 10 amostras em cada repetição, a dispersão interna de acima de 30 μ s mostrou-se comparável à diferença de sinal esperada para distinguir faixas estreitas (2% á 3%) de umidade.

Figura 1 - Média das respostas do Sensor Capacitive Soil Moisture v1.2

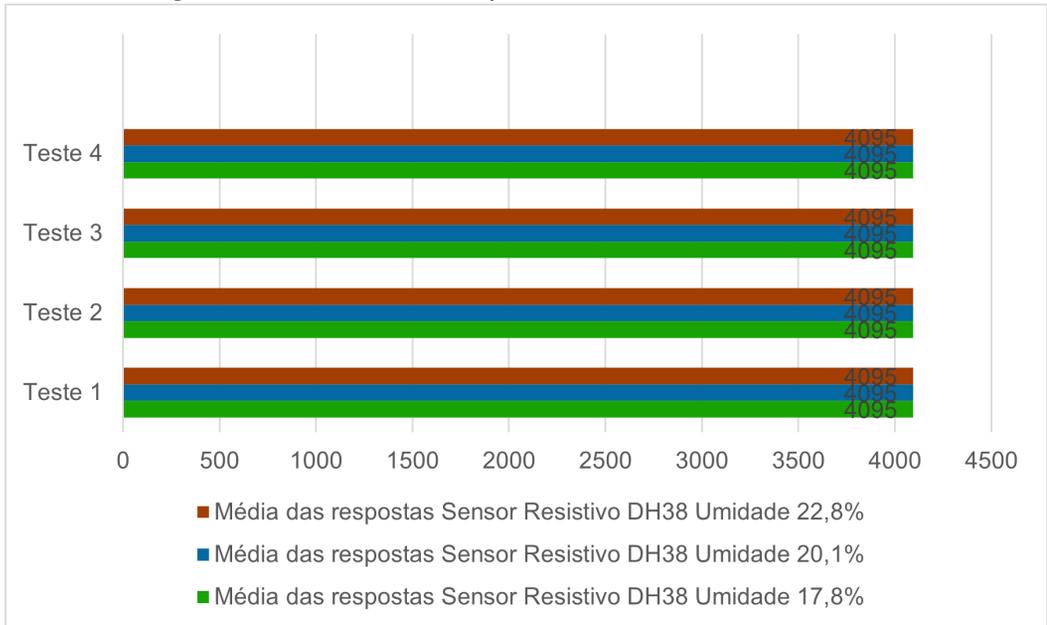


Fonte: Elaborado pelo autor.

O Sensor Resistivo DH38 (Figura 2) também foi submetido ao protocolo de 10 coletas por repetição, repetido quatro vezes, para as faixas de umidade de 17,8%, 20,1% e 22,8%. Em todas as medições, os valores permaneceram constantes em 4.095 unidades, sem apresentar qualquer variação entre as diferentes faixas de umidade. Esse valor corresponde ao limite máximo de leitura do sistema, indicando que o sensor operou em saturação durante toda a coleta de dados. Dessa forma, não foi possível observar qualquer sensibilidade do sensor à variação no teor de água do

arroz, o que compromete sua aplicabilidade para essa finalidade.

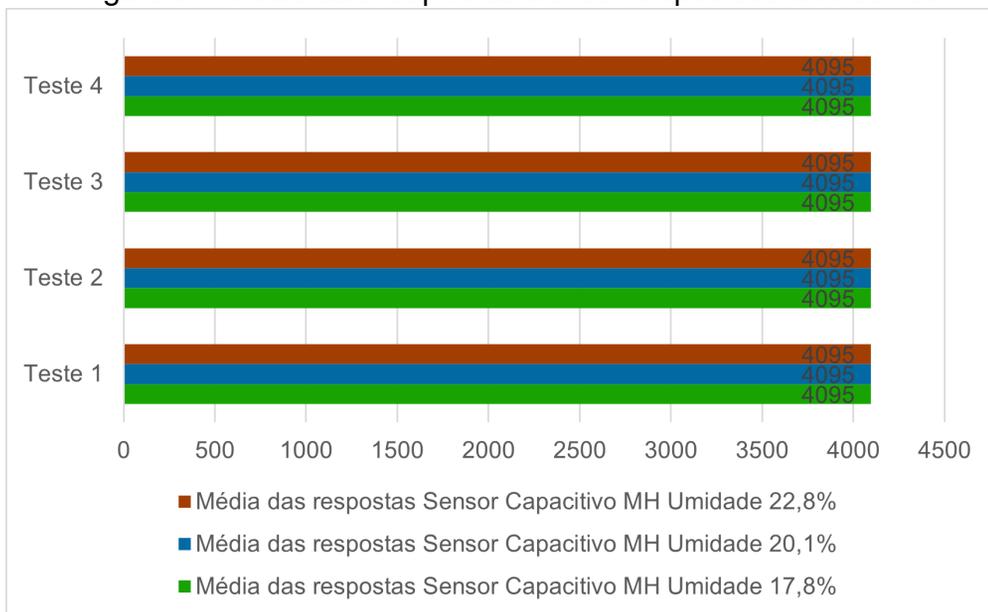
Figura 2 - Média das respostas Sensor Resistivo DH38



Fonte: Elaborado pelo autor.

O módulo Capacitivo MH (Figura 3) O módulo Capacitivo MH foi testado com 10 coletas por repetição, totalizando quatro repetições. Em todas as umidades (17,8%, 20,1% e 22,8%), a média das medições ficou em 4.095 unidades, que é o limite máximo do conversor analógico-digital. Isso indica que o sensor operou saturado e, por isso, não conseguiu diferenciar as faixas de umidade, comprometendo sua precisão.

Figura 3 - Média das respostas Sensor Capacitivo MH Series

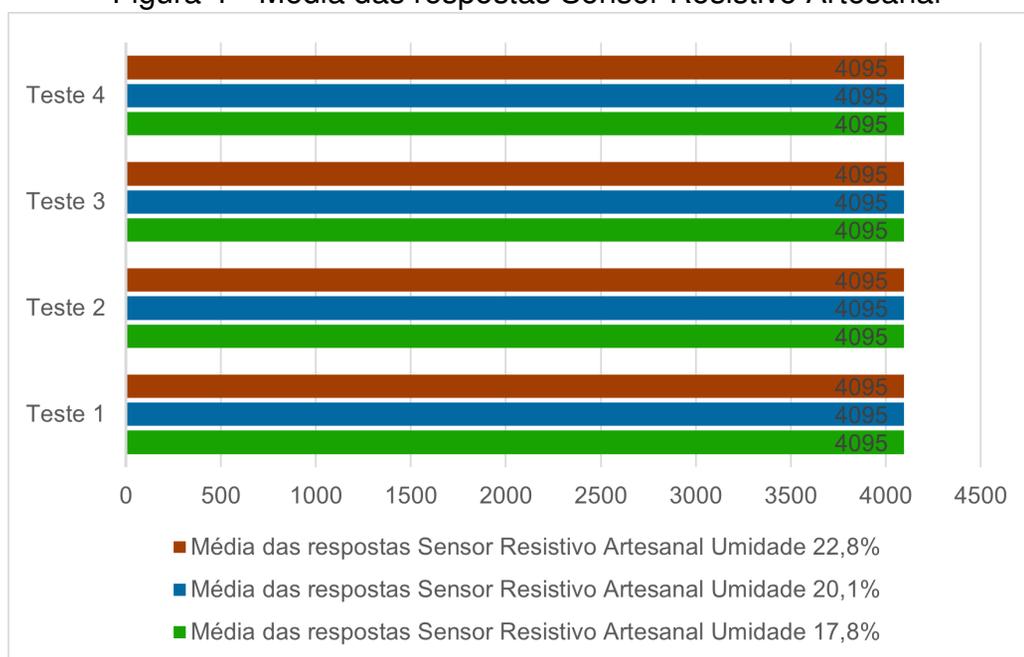


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tentativa de construir um sensor resistivo artesanal com chapas de alumínio de lata, de 4mm de espesura (Figura 4), procedeu-se da mesma forma: 10 coletas por repetição, repetidas quatro vezes. Em todas as condições de umidade 17,8%, 20,1% e 22,8%, as médias resultantes permaneceram próximas a 4.100(unidades arbitrárias), sem diferença perceptível. Além da fragilidade mecânica das chapas finas, o sensor resistivo artesanal mostrou-se incapaz de registrar mudança no teor de água, mesmo após consolidar médias de 10 medições em cada um dos quatro testes.

Esse comportamento sugere que, além da baixa precisão elétrica do sensor, a configuração resistiva não foi suficientemente sensível às variações dielétricas provocadas pelas diferentes porcentagens de umidade no arroz. A resistência elétrica entre as placas aparentemente se manteve constante, o que pode indicar falha tanto no princípio físico aplicado quanto na construção do sensor. Considerando esses fatores, a solução resistiva artesanal mostrou-se ineficaz para a aplicação desejada, sendo descartada como alternativa viável já nas etapas iniciais do experimento.

Figura 4 - Média das respostas Sensor Resistivo Artesanal



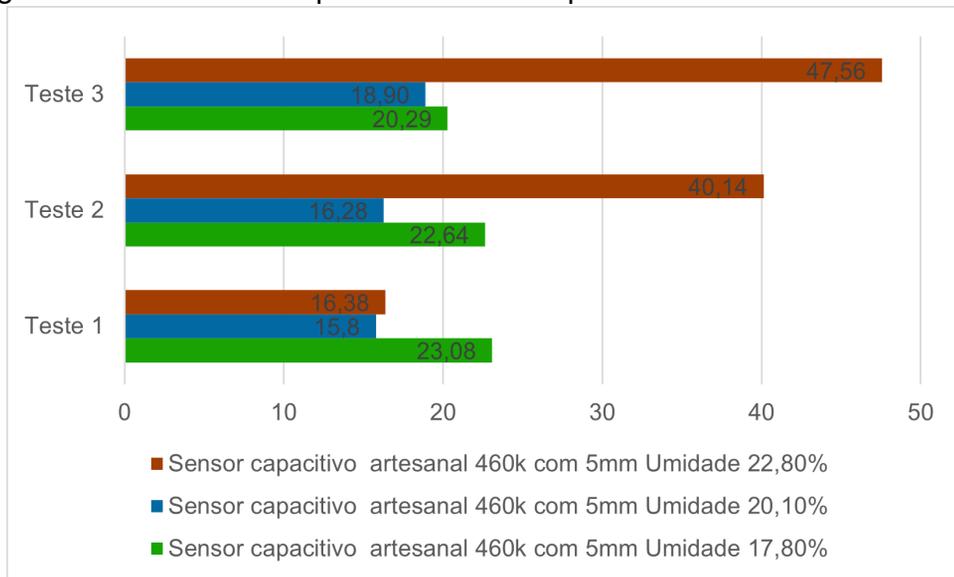
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em suma, com 10 coletas de dados por repetição e quatro repetições para cada faixa, as Figuras 1 a 4 comprovaram que nenhum dos sensores comerciais nem o protótipo resistivo artesanal conseguiu fornecer leituras suficientemente estáveis ou lineares para separar grãos de arroz por faixas próximas de umidade. A alta dispersão interna entre as repetições, mesmo após o cálculo da média interna e a sobreposição das faixas de resposta convenceram de que seria inviável usar esses componentes.

Por essa razão, desenvolveu-se outro sensor capacitivo artesanal com chapa de alumínio mais espessa, com 4×4cm, espaçadas em 5mm, para maximizar a sensibilidade à constante dielétrica do arroz e superar as limitações de ruído e instabilidade detectadas nos testes iniciais.

Na etapa de avaliação inicial, o sensor capacitivo artesanal de 460k com 5 mm de espaçamento entre as placas (Figura 5) apresentou resultados muito inconsistentes, com médias para 17,8% variando de 20,29 μ s a 23,08 μ s, para 20,1% de 15,8 μ s a 18,9 μ s e para 22,8% de 16,38 μ s a 47,56 μ s. Essa amplitude de até 32 μ s nas faixas intermediárias e de 31,8 μ s em alta umidade demonstrou que o espaçamento menor favorecia ruídos mecânicos e elétricos, comprometendo a repetibilidade e a distinção entre teores próximos de água.

Figura 5 - Média das respostas Sensor Capacitivos Artesanal 460k / 5mm

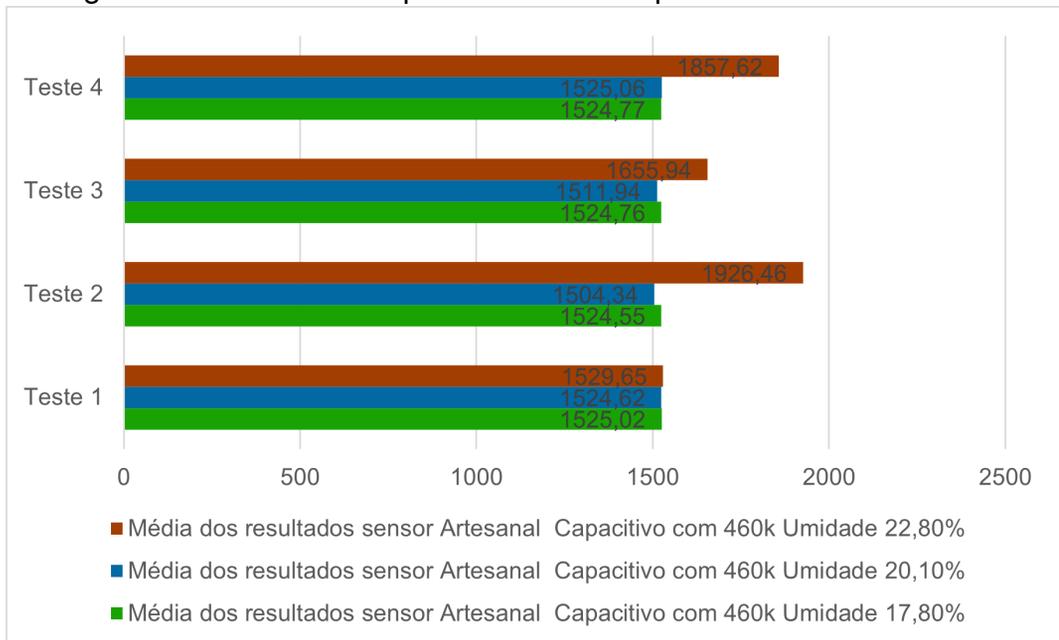


Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante dessa instabilidade, o sensor foi reconstruído mantendo o resistor de 460 k, mas aumentando o espaçamento para 1 cm e reforçando a montagem das chapas de alumínio (Figura 5). Nos testes subsequentes, cada faixa de umidade (17,8%, 20,1% e 22,8%) foi medida em três repetições com dez coletas cada. Para 17,8%, as médias ficaram entre 1 524,55 μ s e 1 524,77 μ s (amplitude de apenas 0,22 μ s); em 20,1%, variaram de 1 504,34 μ s a 1 525,06 μ s (amplitude de 20,72 μ s); e em 22,8%, oscilaram de 1 655,94 μ s a 1 926,46 μ s (amplitude de 270,52 μ s). Embora ainda haja dispersão em faixas de alta umidade, a diferença interna nas leituras de 17,8% e 20,1% tornou-se desprezível, indicando notável ganho de estabilidade com o espaçamento ampliado. Os sensores capacitivos artesanais foram montados com chapas de alumínio de 4 x 4 cm espaçadas por 1 cm e testados com três valores de resistor: 460k, 200k e 1M.

No sensor com 460 k (Figura 6), as médias para 17,8% ficaram de 1 524,55 μ s a 1 525,02 μ s (amplitude 0,47 μ s); em 20,1%, variaram de 1 504,34 μ s a 1 525,06 μ s (amplitude 20,72 μ s); e em 22,8%, oscilaram entre 1 529,65 μ s e 1 926,46 μ s (amplitude 396,81 μ s). Houve bom equilíbrio entre tempo e dispersão interna em 17,8%/ 20,1%, mas ruído muito alto em 22,8%.

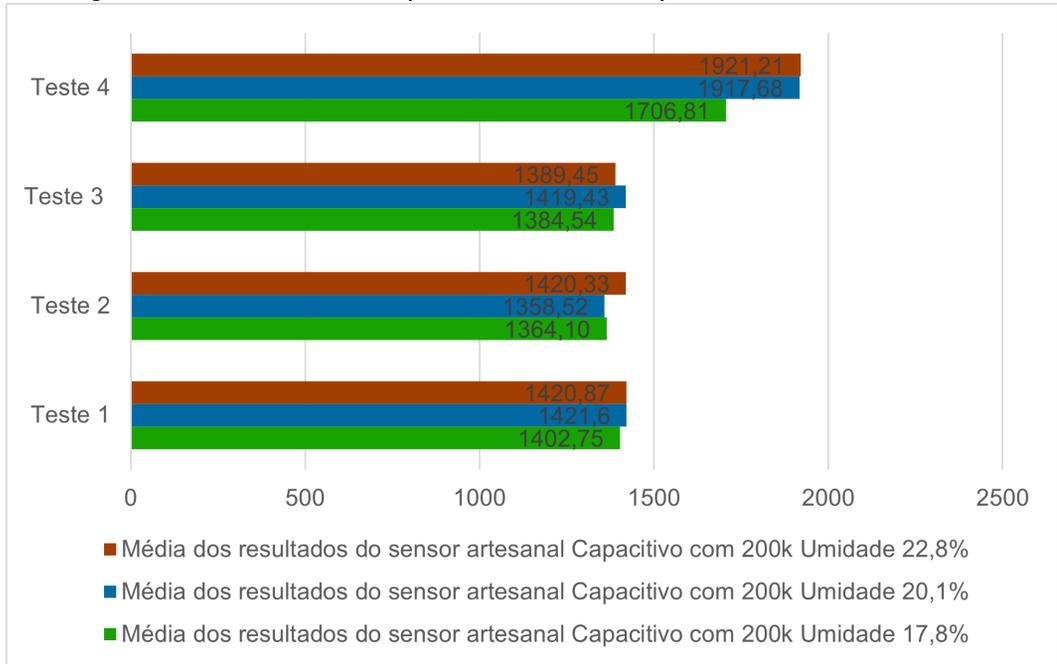
Figura 6 - Média das respostas Sensor Capacitivos Artesanal 460 k



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já o sensor com 200 k (Figura 7) apresentou para 17,8% médias entre 1 364,10 μs e 1 706,81 μs (amplitude 342,71 μs); em 20,1%, entre 1 358,52 μs e 1 917,68 μs (amplitude 559,16 μs); e em 22,8%, de 1 389,45 μs a 1 921,21 μs (amplitude 531,76 μs). Embora o resistor de 200 k tenha reduzido o tempo médio de carga para cerca de 1 365–1 370 μs em 17,8% 20,1% e 1 498 μs em 22,8%, a variabilidade interna ainda se mostrou elevada, especialmente em baixos teores. Essa ampla dispersão de valores, principalmente em 17,8% de umidade, indica que o sensor com 200 k sofre maior interferência de ruído e instabilidade elétrica, possivelmente devido ao carregamento mais rápido do circuito. A baixa resistência oferecida pelo resistor pode não ter sido suficiente para controlar adequadamente a corrente de carga, o que dificulta a estabilização dos valores de leitura.

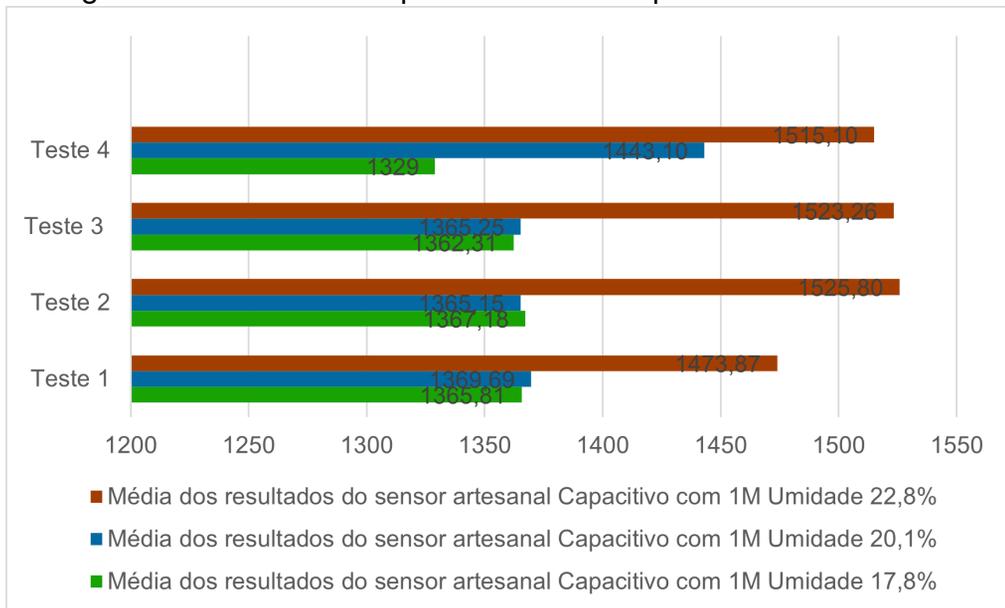
Figura 7 - Média das respostas Sensor Capacitivos Artesanal 200k



Fonte: Elaborado pelo autor.

No sensor com 1 M (Figura 8), as médias em 17,8% variaram de 1 362,31 μ s a 1 367,18 μ s, mas o Teste 4 mostrou 1 329,00 μ s, gerando amplitude de 38,18 μ s. Em 20,1%, as médias oscilaram entre 1 365,15 μ s e 1 443,10 μ s (amplitude 78 μ s), e em 22,8% ficaram entre 1 473,87 μ s e 1 525,80 μ s (amplitude 51,93 μ s). Esses resultados indicam tendência de aumento do tempo de carga com a umidade, mas variações internas ainda elevadas. Apesar dessa correlação positiva, o sensor com 1 M ainda apresentou variações internas significativas dentro da mesma faixa de umidade, o que compromete sua precisão. A presença de valores discrepantes, como no Teste 4 de 17,8%, evidencia que, mesmo com um resistor mais alto que teoricamente deveria proporcionar maior estabilidade por retardar o carregamento, ruídos elétricos, interferências ambientais ou limitações construtivas do sensor podem estar impactando as medições. Ainda que este tenha sido o sensor com melhor desempenho relativo em termos de estabilidade, a sobreposição dos valores médios entre diferentes faixas torna inviável seu uso como ferramenta confiável para separar com exatidão os grãos de arroz com base em seu teor de umidade.

Figura 8 - Média das respostas Sensor Capacitivos Artesanal 1M

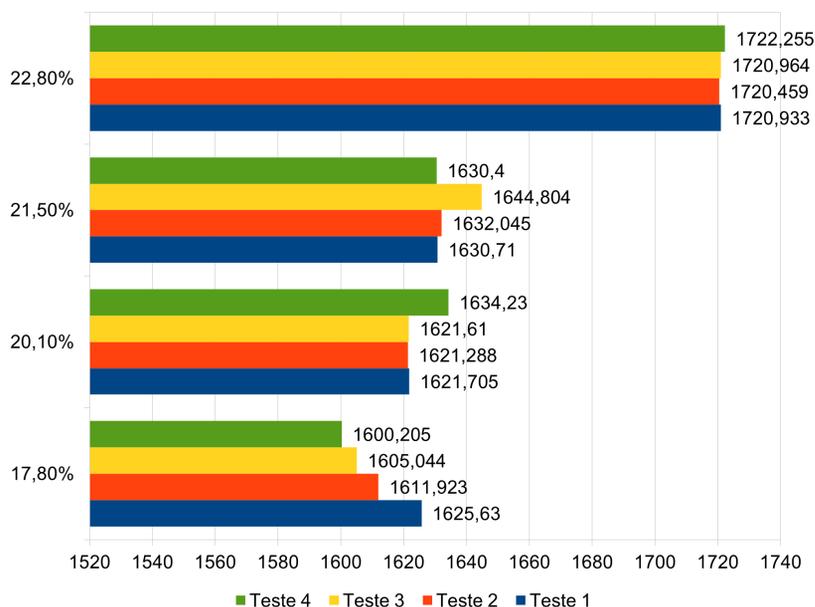


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em suma, a comparação entre as Figuras 5 e 6 evidencia que o espaçamento de 5 mm resultou em ruído elevado e leituras imprevisíveis, levando ao descarte desse protótipo. Já o espaçamento de 1 cm, mesmo mantendo o mesmo resistor de 460 k, promoveu redução drástica do ruído interno em teores intermediários, tornando-se, portanto, a solução mais robusta e adequada para diferenciar faixas próximas de umidade em grãos de arroz. Nos Figuras 6, 7 e 8 está representado esse mesmo sensor capacitivo de 1 cm, cuja única diferença entre cada série de medições foi o valor do resistor empregado – 200 k, 460 k ou 1 M. A estrutura física (chapas e espaçamento) permaneceu idêntica em todos os casos; modificou-se apenas o resistor para avaliar seu efeito na estabilidade e no alcance de leitura em cada faixa de umidade.

Para prosseguir na busca por um sensor capacitivo que apresente maior precisão, manteve-se a configuração de chapas de alumínio de 4 x 4 cm com espaçamento de 1 cm e resistência de 460 k, mas procedeu-se ao aumento do tempo de carga do circuito. Ao estender deliberadamente o intervalo de carga antes da medição, observou-se uma redução substancial na dispersão dos resultados. Conforme ilustrado na Figura 9, cada condição de umidade (17,8%, 20,1% e 22,8%) foi submetida a quatro repetições, cada uma com dez amostras, e os valores médios registrados evidenciam uma notável estabilidade interna.

Figura 9 - Média Sensor Capacitivo Artesanal maior tempo Carga



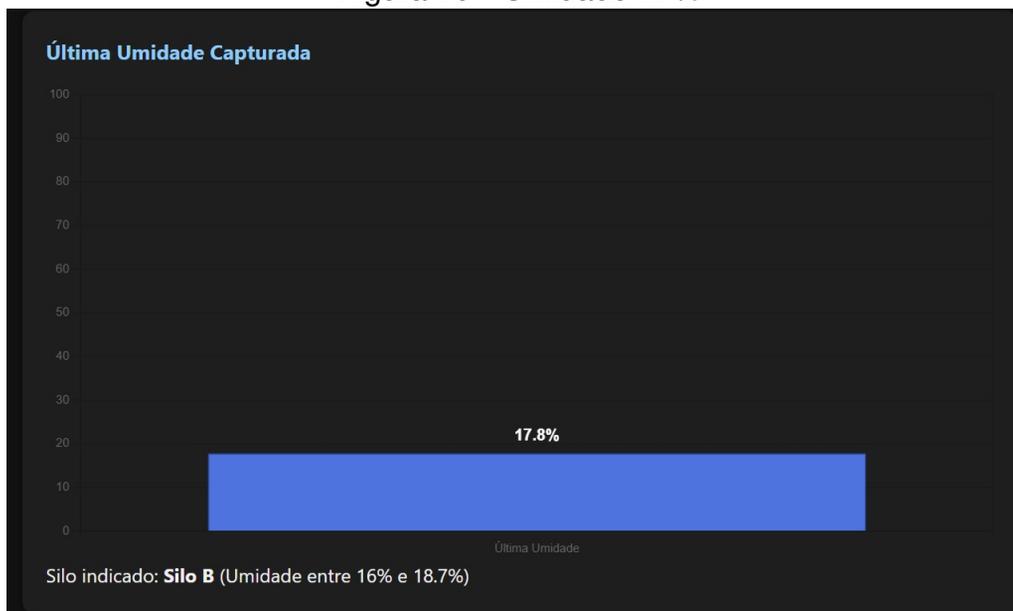
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados demonstram que, apesar de o protótipo capacitivo de 1 cm ter apresentado maior estabilidade interna em comparação às versões anteriores (5 mm de espaçamento ou sensores comerciais), a sobreposição das leituras ainda impede discriminar faixas muito próximas de umidade. Constate-se, por exemplo, que, mesmo executando coletas simultâneas com três sensores iguais (Figuras 5 e 6), as médias de cada conjunto de 10 medições variaram de modo a se sobreporem – em 20,1% os valores flutuaram entre aproximadamente 19,7% e 20,3%, e em 17,8% entre 17,5% e 18,1% –, revelando que, embora haja redução de ruído, continua presente variabilidade que compromete a separação precisa das amostras.

Ainda assim, o sistema de monitoramento, desenvolvimento baseado em ESP32 e interface web (Figura 10 e Figura 11), mostrou-se plenamente funcional para mapear e exibir os valores de umidade em tempo real. Na Figura 10 e Figura 11 observa-se a tela do dashboard mostrando a última umidade capturada (17,8% e 20,1%), provando que a comunicação entre sensor, servidor e interface gráfica está operando de forma estável. Na figura 12 e Figura 13, fica clara a variação que o sensor sofreu ao longo de vinte coletas consecutivas, em que pontos 17,6% a 17,9% ou de 20,0% a 20,2% ilustram precisamente a dispersão típica de leitura. Por fim, nas Tabelas 14 e 15, dados enviados confirmam que o fluxo de amostras (Sensor 1, Sensor 2, Sensor 3) foi transmitido corretamente ao servidor, mesmo

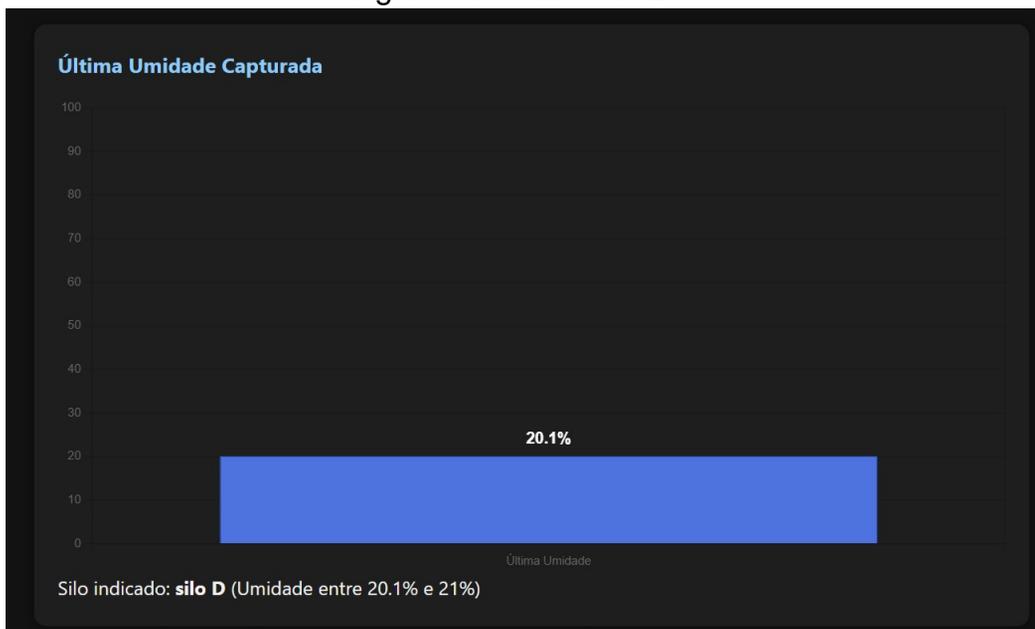
que os valores não se mantenham estritamente estáticos em cada lote.

Figura 10 - Umidade 17%



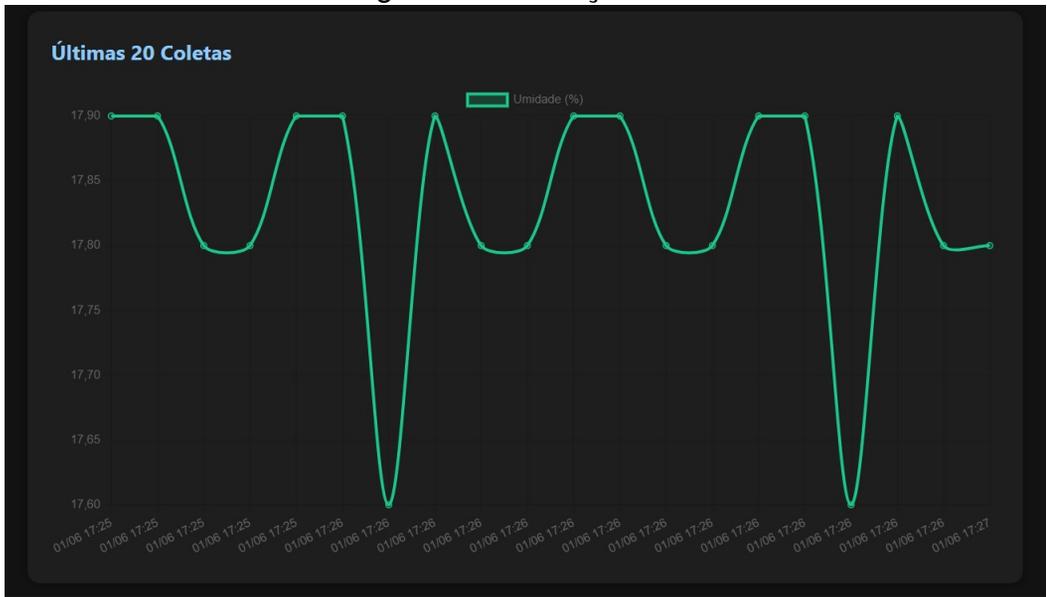
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 - Umidade 20%



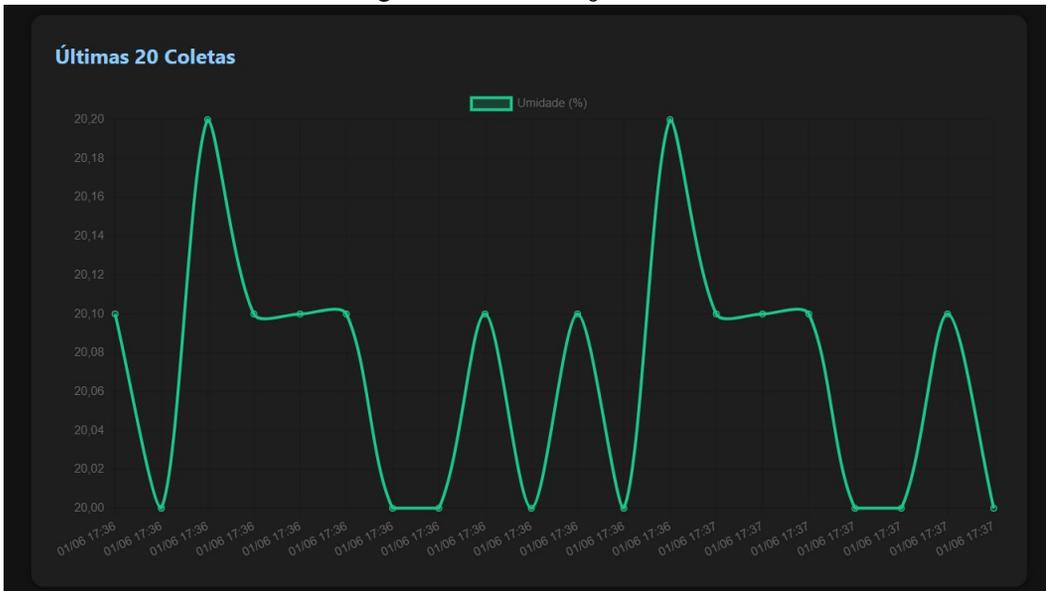
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 - Variação 17%



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Variação 20%



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1 - Tabela Umidade 17%

Sensor1	Sensor 2	Sensor 3
17,65	18,00	17,90
17,70	17,95	17,85
18,10	17,50	17,85
17,95	18,15	17,60
17,75	17,80	18,00
17,40	17,60	17,90
18,00	17,90	17,80
17,85	18,05	17,55
17,75	17,95	17,60
17,90	18,00	17,70

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Tabela Umidade 20%

Sensor1	Sensor 2	Sensor 3
20,05	20,30	19,90
20,10	19,75	20,25
20,35	20,00	20,10
19,80	20,20	19,95
20,20	20,10	20,10
20,25	19,85	20,15
20,00	20,05	20,25
19,95	20,35	20,10
20,10	20,20	19,80
20,05	19,90	20,15

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, conclui-se que, embora o sensor capacitivo apresente instabilidade suficiente para impedir a separação exata dos grãos por faixas estreitas de umidade, o sistema de mapeamento e visualização das amostras de umidade está funcionando perfeitamente. A arquitetura de hardware (ESP32 + sensor) e software (API Django + dashboard web) provê uma plataforma confiável para coleta, transmissão e exibição das medições, garantindo que todos os dados capturados sejam armazenados e disponibilizados em tempo real, sem falhas de comunicação.

5 CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, buscou-se desenvolver um sensor capacitivo de baixo custo que permitisse discriminar faixas próximas de umidade em grãos de arroz, viabilizando a separação automática conforme o

teor de água. Iniciou-se pela avaliação de sensores comerciais e de um protótipo resistivo artesanal, todos os quais mostraram ruído excessivo ou saturação, confirmando a necessidade de uma solução customizada. Posteriormente, foram construídos sensores capacitivos artesanais com chapas de alumínio de 4 × 4 cm e espaçamento variável entre 5 mm e 1 cm, testando-se resistores de 200 k, 460 k e 1 M. Constatou-se que o espaçamento de 5 mm gerava dispersão elevada, enquanto 1 cm reduzia significativamente o ruído interno nos teores de 17,8% e 20,1%, mas ainda apresentava amplitude de variação que se sobrepunha entre faixas (até algumas dezenas de microsegundos de diferença).

Em seguida, ao manter o resistor de 1 k e ampliar o tempo de carga, observou-se nova redução de ruído (amplitude de apenas 1,32 μ s em 22,8%), porém as médias ainda se sobrepunham ligeiramente entre as repetições para um mesmo teor, demonstrando que, apesar do avanço, o sensor continuava instável o suficiente para impedir classificação inequívoca em faixas com diferença de poucos pontos percentuais. Dessa forma, não foi possível, com os recursos e configurações testados, atingir a sensibilidade necessária para a separação precisa do arroz por níveis de umidade.

Contudo, o sistema completo de mapeamento e exibição das amostras de umidade mostrou-se plenamente funcional. O ESP32 colecionou e transmitiu corretamente todas as leituras ao servidor Django, e o dashboard web exibiu em tempo real os valores capturados (conforme ilustram as primeiras duas capturas de tela). As variações dos sensores, embora presentes, foram registradas, transmitidas e visualizadas sem perda de dados, validando a plataforma como base para quaisquer melhorias futuras.

Os resultados obtidos fornecem diretrizes claras para trabalhos futuros. Primeiramente, recomenda-se investigar valores de resistor intermediários (por exemplo, 680 k) ou arranjos em paralelo/série que possam aproximar o tempo de carga do ponto ótimo entre sensibilidade e estabilidade. Em segundo lugar, sugere-se a adoção de técnicas de filtragem digital, média móvel, mediana ou filtragem passa-baixa adaptativa — implementadas diretamente no microcontrolador, de modo a mitigar flutuações instantâneas sem sacrificar a capacidade de resposta. Adicionalmente, recomenda-se reforçar a estrutura mecânica das chapas e empregar blindagem eletromagnética em fios e conectores, a fim de minimizar interferências externas. Por fim, estuda-se a possibilidade de utilizar dielétricos alternati-

vos, como placas de PCB interdigitadas, para aumentar a área de medição efetiva e a sensibilidade ao teor de água no grão.

Em suma, embora a busca meticulosa por um sensor capacitivo de precisão tenha resultado em ganhos substanciais na redução de ruído e no entendimento das variáveis que influenciam a resposta, não foi possível atingir a sensibilidade requerida para a separação precisa do arroz. Ainda assim, este trabalho servirá de base para novos experimentos e refinamentos que, aliados às abordagens propostas, poderão tornar viável a aplicação industrial de sensores capacitivos de baixo custo para classificação de grãos por faixas de umidade.

REFERÊNCIAS

AZMI, N. et al. **RF-based moisture content determination in rice using machine learning techniques**. [S.l.]: MDPI, 2021. 1875 p.

BOEMEKE, L. R. d. S. et al. **Manejo Térmico e Consumo de Energia na Secagem Intermitente de Grãos de Arroz**.

C.P. 359, CEP 96.010-900, Pelotas, RS: [s.n.], 2024. Dis-

ponível em: <[https://www.sosbai.com.br/uploads/trabalhos/](https://www.sosbai.com.br/uploads/trabalhos/manejo-termico-e-consumo-de-energia-na-secagem-intermitente-de-graos-de-arroz_465.pdf)

[manejo-termico-e-consumo-de-energia-na-secagem-intermitente-de-graos-de-arroz_465.pdf](https://www.sosbai.com.br/uploads/trabalhos/manejo-termico-e-consumo-de-energia-na-secagem-intermitente-de-graos-de-arroz_465.pdf)>.

CHEN, Z.; LU, C. **Humidity sensors: a review of materials and mechanisms**. [S.l.]: American Scientific Publishers, 2005. v. 3. 274–295 p.

ÇINARER, G.; ERBAŞ, N.; ÖCAL, A. **Rice classification and quality detection success with artificial intelligence technologies**. [S.l.]:

SciELO Brasil, 2024. e24220754 p.

DESTREZA, F. G.; BUENAS, L. J. E.; ATIENZA, E. A. V. Improving rice farming productivity through solar-powered electronic stirring with sms notifications. In: **2023 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)**. [S.l.: s.n.], 2023. p. 207–212.

JONES, S. B.; SHENG, W.; OR, D. **Dielectric measurement of agricultural grain moisture—theory and applications**. [S.l.]: MDPI, 2022. 2083 p.

JULIANO, B. O. **Rice in human nutrition**. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1993.

MECNIKA, V. et al. Preliminary study on textile humidity sensors. In: **Smart SysTech 2015; European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–9.

MENEGHETTI, V. L.; FAGUNDES, C. A. A.; AMARAL, J. d. S. **Tempo de operação, consumo energético e rendimento de inteiros em grãos de arroz secados pelo método intermitente e em silo-secador**. 2024.

RAMLI, N. A. M. et al. **A new method of rice moisture content determination using voxel weighting-based from radio tomography images.** [S.l.]: MDPI, 2021. 3686 p.

SONG, W. et al. Design of factory environmental monitoring system based on esp32. In: **2023 5th International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer (ICFTIC).** [S.l.: s.n.], 2023. p. 311–314.