

RELATO DE EXPERIÊNCIA

Um sistema de informação para monitoramento de qualidade e estimativa de perdas em instalações de armazenamento de grãos usando dados de sensores de IoT e outros mecanismos

An information system for quality monitoring and loss indication in grain stores using data from IoT sensors and other mechanisms

Fernando Carvalho ¹ and Luiz Antonio Rodrigues ¹

¹PPGComp – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – Cascavel/PR – Brasil

*fernandocvl@gmail.com; luiz.rodrigues@unioeste.br

Recebido: 15/08/2022. Revisado: 08/04/2023. Aceito: 25/04/2023.

Resumo

O armazenamento de grãos é uma das etapas mais importantes da cadeia produtiva agrícola, pois é responsável por manter as características físico-biológicas dos grãos e, consequentemente, a qualidade dos produtos armazenados. As instalações de armazenamento de grãos (UAG) no estado do Paraná geralmente não possuem mecanismos automatizados para monitorar as condições ambientais, nem possuem soluções adequadas para o uso de tecnologias avançadas de Internet das Coisas (IoT). Neste trabalho, relatamos o desenvolvimento de um sistema de informação que permite aos operadores e gestores monitorar em tempo real os dados ambientais da UAG coletados por diferentes sensores, o que possibilita o monitoramento dos grãos e a indicação de perdas de qualidade no armazenamento.

Palavras-Chave: Agricultura digital; aplicações de sistemas de informação; internet das coisas; prototipagem de software; sistemas de gestão de dados.

Abstract

Grain storage is one of the most important steps in the agricultural production chain, as it is responsible for maintaining the physical-biological properties of the grains and, consequently, the quality of the stored products. Grain storage facilities (UAG) in the state of Paraná generally do not have automated mechanisms to monitor environmental conditions, nor do they have appropriate solutions for the use of advanced Internet of Things (IoT) technologies. In this paper, we report the development of an information system that allows operators and managers to monitor in real-time the environmental data of the UAG collected by different sensors, which enables the monitoring of grains and the indication of quality losses during harvest.

Keywords: Data management systems; digital agriculture; information systems applications; internet of things; software prototyping.

1 Introdução

Dentre as etapas da cadeia produtiva de grãos, o armazenamento destaca-se como uma das fases mais importantes, sendo relacionada à conservação e o armazenamento dos alimentos. De acordo com Grolleaud (2002) “O sistema pós-colheita abrange toda a cadeia, desde a entrega de uma colheita, do momento e local da colheita até o momento e local de consumo, com perda mínima, eficiência máxima e retorno máximo para todos os envolvidos”.

A definição de armazenagem remete ao conceito de abastecimento, sendo este um conjunto de medidas necessárias para prover, com regularidade, os alimentos básicos, visando principalmente que tais produtos atendam às necessidades alimentícias da população, a qual é constituída em grande parte pelos nutrientes encontrados nos cereais e grãos leguminosos, tais como os populares arroz e feijão, além do milho, do trigo, da soja, do café, entre outros. Segundo Puzzi (2000), quaisquer mudanças na disponibilidade, qualidade ou preço destes produtos ou seus derivados, afetam a rotina socio-econômica de uma região ou país.

No entanto, após a colheita de gêneros alimentícios, não se pode adicionar qualidade aos produtos, sendo possível apenas a sua manutenção ou a minimização da deterioração natural de suas propriedades orgânicas. Destaca-se pois, a importância das tecnologias para o armazenamento de grãos na etapa pós-colheita, devido a necessidade de manutenção da qualidade dos grãos durante todo o tempo em que são acondicionados, antes de serem transformadas em diversos subprodutos através da industrialização.

É consenso que para qualquer setor econômico a coleta de dados é primordial para melhorar o gerenciamento e a eficiência das operações. No agronegócio, por exemplo, as informações oriundas destes dados podem acarretar maiores níveis de produtividade e rentabilidade. Atualmente, a utilização de dispositivos de Internet das Coisas (IoT) permite que diversos sensores sejam espalhados em um ambiente para a coleta, o monitoramento e o intercâmbio dos dados sem a presença humana ou exigindo a mínima interação no processo. Consequentemente, são sistemas escaláveis por natureza, dada a interconectividade das “coisas”, bem como é frequente a geração de grandes volumes de dados, também devido a grande quantidade de dispositivos interconectados.

Segundo relatório da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) (Seixas e Contini, 2017), sistemas IoT têm sido dedicados a monitorar ambientes das propriedades rurais, desde a análise de condições do solo até o monitoramento dos equipamentos utilizados em todas as fases da produção agrícola. Assim, espera-se um grande crescimento no número de aparelhos agrícolas com IoT nos próximos anos, conforme análise da publicação Markets & Markets (Markets e Markets, 2021), que estima que o mercado de “Agriculture IoT” atingirá o patamar de 18,1 bilhões de dólares em 2026, quando em 2021 havia sido calculado em aproximadamente 11,4 bilhões de dólares.

As estruturas utilizadas para a estocagem de cereais são denominadas Unidade Armazenadora de Grãos (UAG), representadas, em sua maioria, pelas baterias de silos, armazéns graneleiros, silos metálicos e os armazéns convencionais (Puzzi, 2000). Nestas estruturas, a manutenção da

qualidade dos grãos armazenados é feita basicamente pelo controle de umidade e temperatura. A medição da temperatura é feita através de cabos termopares instalados no interior das estruturas dos armazéns, ligando a massa de grãos até um módulo coletor eletrônico. Em geral, o acompanhamento é feito manualmente por um operador que conecta o aparelho de leitura ao módulo coletor. Após efetuar a coleta da temperatura do armazém, o operador precisa também verificar qual é a umidade relativa do ar no momento. Assim, com base nestas informações, ele poderá consultar a tabela higroscópica relativa ao tipo de grão armazenado e tomar as providências necessárias, como ativar a aeração.

Nota-se, portanto, que a obtenção dos dados ambientais necessários para o procedimento é em grande parte manual e suscetível à erros. Além disso, um processo manual pode acarretar na falta de padrão nas coletas dos dados, uma vez que o operador pode realizar a coleta em diferentes horários do dia, por diferentes motivos ou ocasiões. Isto pode acarretar na falta de precisão na análise geral e histórica da operação do armazém, e até mesmo na baixa disponibilidade dos dados. Além disso, pode implicar em maior custo de operação pelo uso inadequado dos sistemas de aquecimento e aeração.

De acordo com pesquisa prévia realizada por meio de um instrumento de coleta de dados online junto aos responsáveis pelas UAGs do Paraná (Carvalho e Rodrigues, 2021), verificou-se que a grande maioria das unidades utiliza sistemas não automáticos de controle. Além disso, embora considerável parcela dos respondentes afirme conhecer os conceitos de automação de silos (62,2%) e Internet das Coisas (40%), não há utilização de sistemas destas categorias nas UAGs, especialmente para a coleta de informações ambientais, tão importantes para a manutenção da qualidade dos grãos. Embora o custo seja considerado impeditivo, há interesse na adoção de novas tecnologias em até 5 anos ou mais, mas ainda pouco significativa.

Desta forma, verifica-se a necessidade de aprimoramentos estruturais para a minimização das perdas operacionais bem como consequentemente o aumento do controle do processo através da análise metódica dos dados ambientais dos armazéns de grãos.

A proposta deste trabalho foi desenvolver um sistema computacional baseado nas premissas do IoT, que permita o monitoramento dos grãos e a estimativa de perdas da qualidade do estoque em armazéns. Considerando os objetivos específicos da pesquisa, além dos resultados disponíveis em Carvalho e Rodrigues (2021), este trabalho apresenta três contribuições principais:

- Levantamento do dispositivos de IoT e sistemas acadêmicos/comerciais aplicáveis ao monitoramento de ambientes agrícolas.
- Identificação dos parâmetros de qualidade utilizados no monitoramento de armazéns de grãos.
- Desenvolvimento um sistema computacional para o monitoramento de dados de sensores nos armazéns de grãos para a estimativa de possíveis perdas pelas condições ambientais.

Diferente dos trabalhos encontrados na literatura, esta pesquisa busca integrar a aquisição de dados de sensores já consolidados (legados) e os de baixo custo, típicos

de IoT, com a análise dos dados coletados frente aos aspectos de qualidade de armazenamento dos grãos. Além disso, a solução proposta utiliza modernas tecnologias de desenvolvimento Web e disponibiliza mecanismos para integração por meio de *webservices*.

O restante do texto está organizado nas seguintes seções. A [Seção 2](#) descreve os trabalhos relacionados. A [Seção 3](#) apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa. A [Seção 4](#) detalha como é tratado o armazenamento de grãos no Brasil, incluindo os sistemas comerciais de monitoramento disponíveis. O sistema proposto é apresentado na [Seção 5](#). Por fim, a conclusão está na [Seção 6](#).

2 Trabalhos Relacionados

Em seu estudo, [Balsani et al. \(1997\)](#) descrevem a arquitetura e um protocolo para a transmissão de dados obtidos pelo monitoramento de determinados parâmetros de umidade e temperatura dos silos, utilizando para isto o microcontrolador 80535 e os protocolos de comunicação serial RS 485 e o protocolo HART, possibilitaram as medições e modelagem de silos e secadores em um sistema que objetiva a redução das perdas de grãos ocasionadas pelo armazenamento inadequado.

Em [Maier et al. \(2006\)](#) é apresentado que altos níveis de CO_2 em uma massa de grãos pode ser causada pela presença de insetos e fungos, ou ainda pelo metabolismo dos grãos, sendo inclusive, bastante difícil a detecção de tais pontos de concentração deste gás, já que podem se formar em locais distantes dos cabos sensores de temperatura, frequentemente instalados em silos e armazéns. Desta forma, através do monitoramento dos níveis de CO_2 , buscam detectar precocemente a ocorrência da deterioração de milho, observando a operação de três grandes armazéns no meio-oeste dos EUA, onde sensores de CO_2 foram instalados nos armazéns e enviavam os dados por Wi-Fi para um servidor central.

De maneira similar, [Ferrasa et al. \(2010\)](#) argumentam sobre o alto custo de aquisição e manutenção de tecnologias relacionadas com as atividades agrícolas, o qual muitas vezes inviabiliza a adoção, principalmente por parte de pequenos agricultores. Pensando nisto, construíram um protótipo de baixo custo para o monitoramento de temperatura e umidade de grãos armazenados em silos, que comunica-se por Wi-Fi com um computador, onde um programa fornece informações mais precisas para o controle da aeração dos grãos estocados.

Em [Rocha \(2012\)](#) realizou-se a modelagem matemática para processos de resfriamento e, ou, aquecimento de grãos armazenados, onde os dados obtidos permitiram a simulação computacional das condições ambientais mais adequadas para a aeração da massa de grãos. Através da análise das informações simuladas, é possível, por exemplo, prever as condições em certos cenários, minimizando as perdas causadas pela deterioração dos grãos, pelo controle inteligente dos sistemas de aeração dos armazéns.

Para [Faoro \(2019\)](#), a importância do sistema de aeração na manutenção da qualidade e conservação dos grãos, demanda uma eficiência que está relacionada à uniformidade do fluxo de ar por toda a massa de grãos. Por isso,

através da modelagem matemática e computacional desta distribuição de ar, e confrontando dados simulados com dados reais observados em armazéns e silos, foi proposta uma otimização no sistema de aeração para a melhoria da distribuição de ar no armazém, resultando na melhoria do desempenho do sistema.

O trabalho de [Agrawal et al. \(2016\)](#) trata da importância da adoção de práticas agrícolas inteligentes, mas pondera que estas práticas, via de regra, requerem grandes investimentos que normalmente não estão ao alcance de pequenas empresas e agricultores. Apoiando-se nos conceitos de Internet das Coisas (IoT), o trabalho demonstra que os custos podem ser reduzidos ao apresentar um dispositivo IoT para monitorar a quantidade e a qualidade, o volume, a temperatura e a umidade de um silo com a função de fornecer grãos para as tratadoras em uma fazenda de coelhos.

Em outro trabalho que se debruça sobre o problema da gestão do armazenamento de grãos, [Singh e Fielke \(2017\)](#) refletem sobre a má gestão da fase pós-colheita, onde cerca de um terço da produção global de grãos é perdida anualmente. Os principais fatores apontados são a falta de controle sobre o índice de umidade e a temperatura do grão, além das infestações por insetos e fungos. Ressalta porém, os recentes avanços tecnológicos para o monitoramento e controle do ambiente de armazenamento de grãos, o qual combina o uso de ferramentas de gestão que monitoram continuamente, não apenas os níveis de umidade e temperatura, como também os níveis de CO_2 , a presença de insetos, a probabilidade de fungos e outros microrganismos, a quantidade ideal de fumigantes, através de múltiplos sensores que são utilizados na automação das operações de armazenamento de grãos. Este aparato de sensores, equipamentos automáticos e sistemas de informação, propiciam um armazenamento de grãos mais econômico e seguro, e consequentemente, um aumento na quantidade de grãos disponível para consumo.

De maneira análoga, [Siviero \(2017\)](#) aborda a degradação da qualidade dos grãos por fungos, insetos e condições climáticas, propondo o monitoramento e o controle da temperatura e umidade, além de sensores de ultrassom para detectar a presença e o nível dos grãos no silo. Os sensores enviam os dados de leitura do ambiente para um microprocessador MSP430, que age como unidade remota, e este transmite via protocolo RS485 para a unidade central, um microcontrolador ARM que atua no acionamento do sistema de aeração, operando conforme o tipo de grão armazenado, mediante diferentes limiares de temperatura e umidade.

Diferente dos trabalhos relacionados, este trabalho propõe a possibilidade de monitoração de outros dados além dos que verificam-se convencionais, como temperatura, umidade e gases produzidos no estrutura de armazenagem. Além disso, o protótipo do sistema proposto implementa quatro equações de cálculo de umidade do grão em função da temperatura e umidade do ar ambiente, e permite adicionar ajustes dos parâmetros de acordo com o tipo de grão armazenado, algo que também não foi observado nos sistemas comerciais verificados. Por fim, destaca-se a proposta de utilização de componentes e tecnologias modernas, incluindo dispositivos de baixo custo e comunicação sem-fio.

3 Metodologia

Afim de atender aos objetivos definidos para o trabalho, elaborou-se um questionário com o intuito de mapear as tecnologias empregadas no monitoramento dos armazéns de grãos do Paraná, como também o nível de conhecimento técnico dos responsáveis pelas UAGs sobre a automação do monitoramento, suas impressões acerca dos custos de tais tecnologias, e suas expectativas quanto aos possíveis resultados positivos alcançáveis pela implantação destas novas tecnologias nos armazéns. O questionário foi enviado para o e-mail das empresas proprietárias de armazéns, além de entrevistas por telefone com os profissionais envolvidos.

Em paralelo, foi feita uma revisão de literatura sobre as aplicações tecnológicas e os tipos de dispositivos sensores baseados em IoT comumente empregados no escopo da agricultura, especialmente aqueles utilizados no monitoramento da armazenagem de grãos, e ainda, os sistemas comerciais que as empresas de armazenagem utilizam para o monitoramento dos seus estoques.

Pesquisou-se também sobre os tipos de estruturas de armazenagem de grãos mais comuns no Brasil e sobre os parâmetros de qualidade dos grãos produzidos em larga escala no Brasil, com destaque para a soja e o milho, e como estes parâmetros são monitorados e interpretados nas operações de manutenção da qualidade destes produtos (Seção 4).

Finalmente, para o desenvolvimento do sistema proposto, foram pesquisadas e utilizadas tecnologias modernas para desenvolvimento Web, visando facilitar o acesso a partir de diferentes dispositivos. Para isto, foi modelado um banco de dados para armazenar as informações sobre o tipo do armazém, dimensões, tipos e quantidades de sensores instalados, e o tipo de grão estocado, e até mesmo os dados ambientais das estruturas, como a temperatura, umidade, e níveis de gases aferidos pelos sensores presentes, como registros temporais para posterior análise histórica. Desta forma, o sistema permite a visualização do histórico dos eventos de monitoramento e, a partir destas informações, estima o nível de qualidade dos grãos estocados (Seção 5).

4 Armazenamento de Grãos no Brasil

A CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) (CONAB, 2017) é o órgão responsável pela gestão do armazenamento de grãos no país, que considera tanto os estoques públicos quanto os armazéns particulares que compõem o sistema de armazenagem.

A prerrogativa de atuação da CONAB é prevista pela lei 9.973 de 2000 (Brasil, 2000) e pelo decreto 3.855 de 2001 (Brasil, 2001), nas quais a armazenagem é uma área estratégica na logística do abastecimento. A atividade vai além da guarda e conservação de produtos agrícolas estocados, pois envolvem também ações e articulações de estudo, planejamento e administração dos estoques e armazéns incluindo a gestão do SICARM (Sistema de Cadastro Nacional de Unidades Armazenadoras) (SICARM, 2021). Este cadastro online contém dados como o endereço e a localização geográfica dos armazéns, a razão social do proprietário e demais informações para contato, o tipo da estrutura edificada, e a sua capacidade estática de estocagem.



Figura 1: Exemplar de Silo Individual

4.1 Unidades Armazenadoras de Grãos (UAGs)

No seu artigo segundo e item dois, o decreto 3.855/2001 (Brasil, 2001) constitui como unidades armazenadoras as edificações, instalações e equipamentos destinados à guarda e conservação dos produtos agropecuários, seus derivados, subprodutos e resíduos de valor econômico. Em geral, para o armazenamento de grãos, as edificações mais utilizadas são os silos metálicos, os armazéns graneleiros e os armazéns convencionais (Puzzi, 2000).

Os silos, individuais ou em baterias, são unidades armazenadoras caracterizadas por compartimentos estanques ou herméticos, ou ainda semi-herméticos (Paturca, 2014), como ilustrado na Fig. 1. Em virtude da compartimentação disponível, permitem o controle das características físico-biológicas dos grãos, já que, embora estes percam a identidade de origem, as espécies e padrões agrícolas são armazenados separadamente.

Em razão da cobertura metálica, os grãos armazenados nestas estruturas podem ser afetados por intempéries, migração de umidade, condensação de vapor d'água, radiação solar, entre outros. O uso de paredes duplas ou material isolante são soluções que podem ser empregadas, porém a primeira não é adequada para regiões com grande amplitude térmica anual e a segunda tem um custo mais elevado (Puzzi, 2000).

Já os armazéns graneleiros, também denominados silos horizontais, são unidades de armazenamento de concreto ou alvenaria, com cobertura metálica, e que separam o local em depósitos onde a massa de grão é armazenada. Por ser uma estrutura para grandes volumes, pode ser maior também a dificuldade no controle homogêneo de temperatura e também aumentar o risco de deterioração.

Finalmente, os armazéns convencionais são estruturas de piso plano, comumente construídos em alvenaria, estruturas metálicas ou mistas, onde os produtos são estocados em sacaria, e devidamente empilhados e dispostos em blocos.

Existem ainda outros tipos de estruturas, menos utilizadas ou utilizadas em ocasiões mais específicas, como os silos elevados de concreto e os silos bolsa, o último sendo uma alternativa para armazenamento temporário (Paturca, 2014).

4.2 UAGs no Paraná

Com base nas informações extraídas do SICARM em jan/2022 (Tabela 1), o Paraná possui 2.456 UAGs que somam aproximadamente 30 milhões de toneladas de Capacidade Estática de Armazenamento (CEA). Destas, 1.287 são Baterias de Silos (52,4%), 530 Graneleiros (21,58%), 453 Armazéns Convencionais (18,44%), 167 Silos (6,8%) e 19 outras estruturas (0,77%). A região Oeste é a que possui maior CEA do Estado, totalizando mais 6,2 milhões de toneladas (20,9% do total). Na Tabela 1 pode-se também observar a quantidade de unidades armazenadoras de grãos por mesorregião, na qual, mais uma vez, a região oeste lidera a lista com 473 UAGs.

Tabela 1: Capacidade Estática de Armazenagem (CEA) por mesorregião do Paraná

Mesorregião	Capacidade (Ton.)	Qtd. de UAGs		
Oeste	6.264.234	20,9%	473	19,3%
Norte Central	5.621.794	18,7%	407	16,6%
Centro Oriental	3.976.042	13,3%	320	13,0%
Centro-Sul	3.127.216	10,4%	249	10,1%
RMC	3.145.831	10,5%	138	5,6%
Centro Ocidental	2.964.494	9,9%	246	10,0%
Sudoeste	1.850.610	6,2%	240	9,8%
Norte Pioneiro	1.496.577	5,0%	142	5,8%
Noroeste	915.952	3,1%	143	5,8%
Sudeste	641.968	2,1%	98	4,0%
Total	30.004.718	100%	2.456	100%

Dados do SICARM de jan/2022 SICARM (2021).

4.3 Aspectos de Qualidade no Armazenamento de Grãos

Segundo Faoro (2019), os grãos dos cereais armazenados também são seres vivos e, da mesma forma procedem a respiração, liberando durante o processo gás carbônico (CO₂), água e calor. Assim, a medida que aumenta a umidade dos grãos, há a consequente liberação de calor da massa de grãos armazenada, comprometendo a conservação dos grãos devido a aceleração do processo respiratório e ao aumento da temperatura.

Assim, a temperatura e o teor de água dos grãos são os principais fatores que interferem na sua qualidade na fase de armazenagem, estando diretamente relacionados à respiração e a presença de microrganismos nas estruturas (Silva, 2008).

Conforme Mesterházy et al. (2020), a redução das perdas de grãos por fatores bióticos (organismos vivos que compõem o ecossistema de armazenagem) é um grande desafio para o abastecimento de alimentos.

O trabalho de Nascimento e Queiroz (2011) destaca que a manutenção da qualidade de grãos na fase pós-colheita é feita principalmente pelo processo de aeração, que consiste justamente no controle da temperatura da massa de grãos, por meio da passagem forçada de ar nos grãos.

A higroscopia é a propriedade que alguns materiais têm de absorver e reter a umidade. As tabelas higroscópicas apresentam a relação entre o grau de temperatura obser-

vado e a umidade relativa do ar, pela qual o índice estabelece um nível para considerar o grão como seco, ideal ou úmido.

Existem modelos teóricos e empíricos para expressar os valores de higroscopia de determinados grãos. As equações de Henderson e de Chung-Pfost são duas das que melhor expressam o nível higroscópico dos grãos nas faixas mais amplas de temperatura e umidade relativa, mas modificações empíricas melhoram os resultados (Rocha, 2012). Como exemplo, a Eq. (1) apresenta a equação de Henderson modificada (Henderson-Thompson) (Bortolaia, 2011), muito utilizada como referência. Os parâmetros da equação para os cereais mais produzidos no Paraná são destacados na Tabela 2.

$$M_e = 0,01 \left[-\frac{\ln(1 - a_w)}{K(T + C)} \right]^{\frac{1}{N}} \quad (1)$$

em que:

- M_e é o teor de água de equilíbrio (umidade do grão);
- a_w é a atividade da água, neste caso equivalente a umidade relativa do ar (%);
- T é a temperatura em °C;
- K , C e N são constantes que variam de acordo com o produto armazenado (Tabela 2);

Tabela 2: Parâmetros para a equação de Henderson-Thomson para alguns cereais produzidos no Paraná (Pabis et al., 1998).

Produto	Parâmetros		
	K	N	C
Arroz	1,9187 x 10 ⁻⁵	2,4451	51,161
Feijão	2,0899 x 10 ⁻⁵	1,8812	254,23
Milho	8,6541 x 10 ⁻⁵	1,8634	49,810
Soja	30,5327 x 10 ⁻⁵	1,2164	134,136
Trigo	2,5738 x 10 ⁻⁵	2,2110	70,318

A Fig. 2 apresenta um exemplo de Tabela Higroscópica para a cultura do Milho, gerada a partir da equação de Henderson-Thomson. De acordo com os dados da tabela, Para manter o nível ideal do milho com temperatura do ar em 18°C, a umidade relativa do ar deve estar entre 60 e 65%. Já para a soja, considerando a mesma temperatura de 18°C, o ideal é manter a umidade relativa do ar entre 70 e 75%.

Além da equação de Henderson-Thomson, Segundo, a norma ASAE D245.5 recomenda a utilização das equações de Chung-Pfost, Halsey Modificada, Oswin Modificada, e Guggenheim-Anderson-DeBoer (Guimarães, 2005).

O teor de umidade contido nos grãos é de suma importância para armazenagem, uma vez que impacta juntamente com outros fatores, na manutenção de suas propriedades físico-químicas ao longo da cadeia produtiva (Mohler, 2010). O teor de umidade dos grãos pode ser expresso tanto em base úmida quanto em base seca. O teor de umidade em base úmida (%b.u.) é a relação entre a massa de água e a massa total do grão.

Durante os procedimentos operacionais, a temperatura

Temperatura (°C)	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80
10	14,2	14,6	14,9	15,3	15,7	16,1	16,5	16,9	17,4	17,9
11	14,1	14,5	14,8	15,2	15,6	16,0	16,4	16,8	17,3	17,7
12	14,0	14,4	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7	17,1	17,6
13	13,9	14,2	14,6	15,0	15,4	15,8	16,2	16,6	17,0	17,5
14	13,8	14,1	14,5	14,9	15,2	15,6	16,0	16,5	16,9	17,4
15	13,7	14,0	14,4	14,8	15,1	15,5	15,9	16,4	16,8	17,3
16	13,6	13,9	14,3	14,7	15,0	15,4	15,8	16,2	16,7	17,1
17	13,5	13,8	14,2	14,6	14,9	15,3	15,7	16,1	16,6	17,0
18	13,4	13,7	14,1	14,5	14,8	15,2	15,6	16,0	16,5	16,9
19	13,3	13,6	14,0	14,4	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,8
20	13,2	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,2	16,7
21	13,1	13,4	13,8	14,2	14,5	14,9	15,3	15,7	16,1	16,6
22	13,1	13,4	13,7	14,1	14,4	14,8	15,2	15,6	16,0	16,5
23	13,0	13,3	13,6	14,0	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,4
24	12,9	13,2	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,3
25	12,8	13,1	13,4	13,8	14,2	14,5	14,9	15,3	15,7	16,2
26	12,7	13,0	13,3	13,7	14,1	14,4	14,8	15,2	15,6	16,1
27	12,7	13,0	13,3	13,7	14,0	14,4	14,7	15,1	15,5	16,0
28	12,6	12,9	13,2	13,6	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9
29	12,5	12,8	13,1	13,5	13,8	14,2	14,6	15,0	15,4	15,8
30	12,4	12,7	13,0	13,4	13,8	14,1	14,5	14,9	15,3	15,7
31	12,4	12,7	13,0	13,3	13,7	14,0	14,4	14,8	15,2	15,6
32	12,3	12,6	12,9	13,3	13,6	14,0	14,3	14,7	15,1	15,5
33	12,2	12,5	12,9	13,2	13,5	13,9	14,2	14,6	15,0	15,4
34	12,1	12,5	12,8	13,1	13,5	13,8	14,2	14,6	14,9	15,4
35	12,1	12,4	12,7	13,0	13,4	13,7	14,1	14,5	14,9	15,3
36	12,0	12,3	12,6	13,0	13,3	13,7	14,0	14,4	14,8	15,2

Condições destacadas em azul correspondem ao intervalo 0,5 pontos abaixo e acima do teor de umidade ideal para comercialização (14,0%). Verifique as normas de classificação para Milho.

Figura 2: Exemplo de tabela de referência para o equilíbrio higroscópico do milho

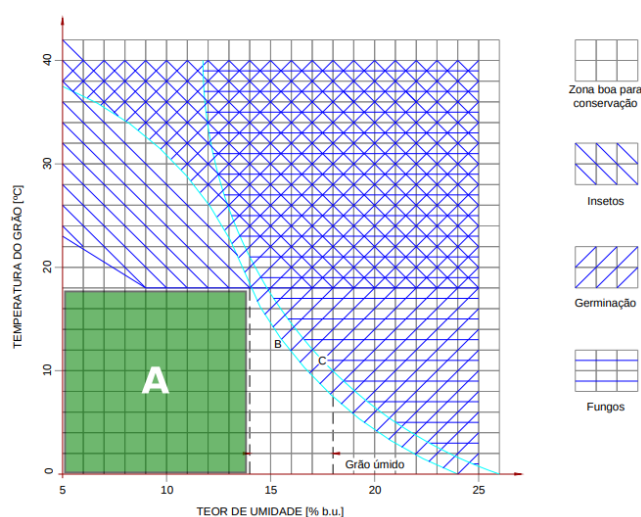


Figura 3: Efeitos da temperatura e da umidade na armazenagem de grãos

interna do armazém é aferida juntamente com a umidade relativa do ar, geralmente do ambiente externo do armazém, e pelo cruzamento entre a coluna e a linha da tabela, o valor estimado do equilíbrio higroscópico é tomado como referência para a operação efetuar a manutenção da qualidade do estoque.

A Fig. 3 apresenta os efeitos da temperatura e da umidade de cereais armazenados de acordo com Burges e Burrell (1964). Pode-se observar que a combinação de altas temperaturas e alto teor de umidade dos grãos pode ocasionar sérios prejuízos relacionados ao surgimento de pragas, fungos e germinação. Uma zona segura se mantém abaixo de 18 graus de temperatura e de 14% de umidade do grão (região A em destaque).

Complementarmente, teores de umidade superiores a

24% e temperatura acima de 0°C resultam na germinação dos grãos, ou ainda no crescimento de fungos, o que prejudicaria a qualidade da massa de grãos armazenados, inclusive afetando o estoque em função do tempo estocado. O limiar de 23% de umidade também afeta negativamente os grãos, podendo ocasionar a germinação dos grãos, assim como as temperaturas superiores a 18°C são propícias para a proliferação de insetos. As curvas B e C representam tais limites.

O trabalho de Santos et al. (2012) mostrou que a perda de matéria seca para os grãos de milho com teor de água de 17,9% é 4 vezes superior à verificada para o produto armazenado com teor 14,8%. A pesquisa utilizou bolsas herméticas e avaliou os resultados por 150 dias. Ao final, os grãos de milho armazenados com teor de água de 17,9% em temperatura de 35°C apresentaram classificação inferior (Tipo 2), isto é, se degradaram.

4.4 Sistemas Comerciais de Monitoramento

O monitoramento e coleta dos dados em UAGs é geralmente realizada por meio de pares termoeletrônicos, também conhecidos como termopares, o que caracteriza o processo denominado de *termometria* (Puzzi, 2000). Com base em leituras diárias, é possível acionar, de forma preventiva, os mecanismos de ventilação das unidades (aeração).

A Fig. 4 ilustra a utilização do cabo termopar instalado em um silo metálico e os mecanismos de leitura, controle e referência. Os cabos são fixados no topo da estrutura e presos nas laterais (Fig. 4a). O monitoramento é feito, em geral, manualmente por meio de quadros de comando, a exemplo do apresentado na Fig. 4b.

Uma tabela higroscópica (Fig. 4c) é utilizada para referência do operador do silo, que fará o acionamento do aerador de acordo com os dados obtidos dos sensores.

Na prática, os cabos propiciam a aferição da temperatura interna do armazém e, após a verificação da umidade relativa do ar, é efetuada a consulta na tabela higroscópica (Fig. 4d), para a orientação quanto a ação necessária (Fig. 4d).

Assim, algumas companhias desenvolvem e aprimoram soluções para a automação deste processo. É o caso da canadense OPI e seu sistema Blue, que fornece informações sobre a condição dos grãos armazenados, tanto em dispositivos móveis quanto para desktops. Os dados monitorados pelo sistema são: temperatura, umidade, ventiladores de aeração, nível de estoque de grãos e ambiente externo, via estação meteorológica.

Fundada em 2016, a greco-americana Centaur desenvolveu um sistema baseado em sensores sem-fio que permite o monitoramento das condições de grãos em tempo real. Os dados de temperatura, umidade e concentração de CO₂ são enviados para uma plataforma em nuvem. Desta forma, combinando estes dados em uma simulação digital avançada, propicia uma previsão da deterioração dos produtos. A comunicação dos sensores é feita por redes de dados móveis. Já o gerenciamento dos dados é feito por um aplicativo web, acessível por dispositivos móveis ou computadores convencionais.

A dinamarquesa Eye-Grain ApS, possui uma vasta linha de sensores que permitem a captação dos dados de tempe-

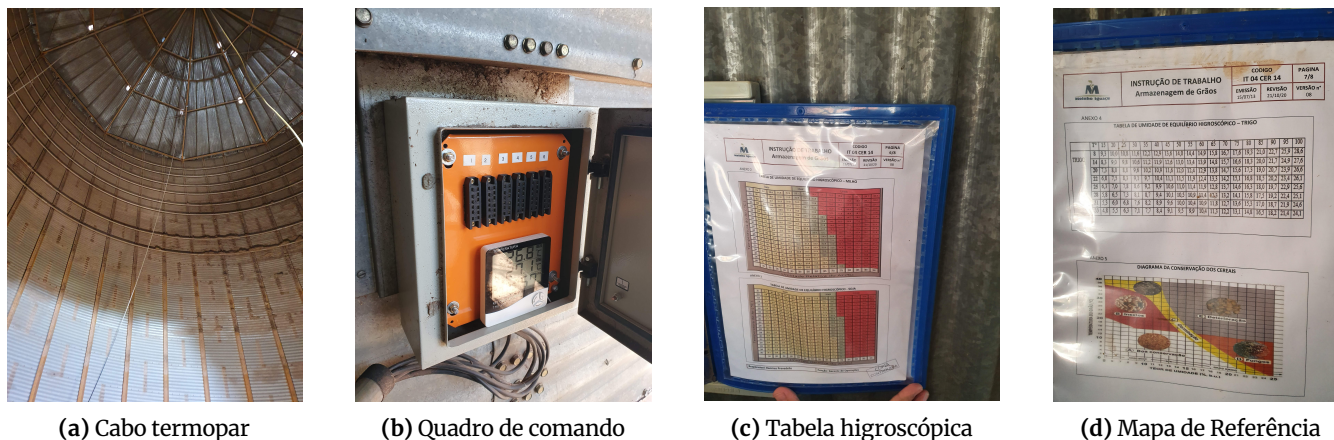


Figura 4: Exemplos de mecanismos de controle operacional e tabelas de referência em uma UAG do Paraná

ratura, umidade, níveis de CO_2 , alerta de incêndio, dados ambientais oriundos da estação meteorológica, e nível de grãos armazenados por radar de micro-ondas. A gestão dos dados é feita por uma unidade central, denominada "iGRAIN IoT", que faz interface direta com todos os sensores iGRAIN. Os gateways de comunicação fazem interface com o aplicativo iGRAIN, o software iGRAIN dashboard Manager, o instrumento de operação manual iGRAIN e com dispositivos móveis via Bluetooth, wireless, LAN, servidor local e servidor em nuvem. Esta unidade de comunicação permite ainda a integração com sistemas PLC/SCADA já existente em controles do armazém de grãos.

A **Kepler Weber**, companhia líder nacional em sistemas de armazenagem, desenvolveu o sistema denominado Sync, que é uma plataforma de soluções integradas para a armazenagem de grãos baseada no conceito de Internet das Coisas. A gestão é feita por uma aplicação web baseada em computação em nuvem, chamada KW Cloud, que permite o controle em tempo real dos equipamentos da planta de armazenagem. O sistema de termometria digital emprega sensores baseados em microchips, resultando em mais precisão de leitura das temperaturas dos grãos. O sistema de gerenciamento cruza os dados de sensores digitais com as informações de uma estação meteorológica para determinar o acionamento dos ventiladores do sistema de aeração de forma automática e inteligente.

Fundada em 2014 na cidade de Londrina-PR, a **Termo-Plex** é uma empresa especializada no monitoramento e na automação agroindustrial, que desenvolveu um sistema de termometria e automação de aeração baseado em sensores digitais, e que permitem a verificação dos níveis de umidade e a temperatura interna do armazém. Além disso, é possível controlar o acionamento dos ventiladores de aeração, ou delegar ao sistema o monitoramento e o acionamento inteligente da aeração.

A empresa **Widitec** oferece um sistema de termometria para silos e armazéns que utiliza comunicação sem-fio para a coleta dos dados de temperatura, talude e nível dos grãos. Com isso, além do diagnóstico e da imagem térmica, o sistema permite controlar o estoque e o histórico de armazenagem das unidades. Um cabo pêndulo especial, de-

nominado **QUALYCable**¹, foi especialmente desenvolvido pela companhia, o qual possui até 48 sensores digitais que permitem monitorar umidade, temperatura e qualidade dos grãos armazenados, e assim, determinar a tendência de deterioração dos grãos.

5 Protótipo do Sistema

O sistema foi prototipado utilizando a arquitetura cliente-servidor Web, dividido em *front-end* e *back-end*, na qual o primeiro envolve as interfaces de usuário que possibilitarão a visualização do ambiente monitorado, e o segundo, as integrações com os sistemas de sensoramento utilizados nos silos e armazéns. Como infraestrutura básica de desenvolvimento foi utilizado o Docker para o gerenciamento do contêiner e o MySQL Server 8 como banco de dados, além do servidor Web Nginx. Na programação, optou-se pelas linguagens Java e Python no *back-end* para o desenvolvimento das APIs de integração do sistema e processamento de dados de monitoramento. O Maven foi utilizado para o gerenciamento do projeto, com o *front-end* escrito em JavaScript, e suporte do NodeJS.

O sistema Web possui design responsivo, possibilitando a adaptação da interface do sistema para quaisquer dispositivos móveis. Por meio do sistema, é possível realizar o cadastro dos armazéns, considerando dados técnicos, como o tipo da estrutura, a capacidade estática, a latitude e longitude em que está localizado, o volume e o tipo de grãos estocados na unidade, assim como a quantidade e os tipos de sensores instalados para o monitoramento do armazém.

Os dados de entrada foram simulados. Inicialmente foi considerada a verificação da temperatura e da umidade, mas a ocorrência de gases, como a amônia, o nitrogênio, o dióxido de carbono, o gás sulfídrico, e de fumaça, poderão ser incorporados. Desta maneira, o sistema possibilita tanto a entrada de dados de forma manual, através da digitação de um operador, bem como pela leitura integrada com sensores digitais autônomos. O objetivo é padronizar

¹Disponível em <http://www.widitec.com.br/novo/produtos/detalhes/53/Cabo%20P%C3%AAndulo%20-%20QUALYCABLE>

o formato de entrada com JSON (*JavaScript Object Notation*), de modo que seja possível capturar os dados de diversos tipos de sistemas sensores.

Para o escopo de cálculo de higroscopia dos grãos, foram implementadas as equações de Chung–Pfost e Owsin para monitoramento de grãos de milho e trigo, e as equações de Henderson–Thompson e Halsey para monitoramento de grãos de soja e milho, todas devidamente parametrizadas conforme a norma ASAE D245.5 de 2001.

Com base na higroscopia calculada, o sistema indica possíveis condições para os grãos armazenados conforme a lógica de classificação interpretada de [Burgess e Burrell \(1964\)](#), indicando condições de armazenagem “Ideal” ou de “Grão Úmido”, com variações de risco de deterioração, fungos e insetos de “Moderado”, “Alto” e “Muito alto”.

Foi desenvolvido ainda um protótipo de sensor autônomo, utilizando-se a plataforma Arduino IDE, para validar a captação de dados de temperatura e umidade de sensores conectados ao microcontrolador ESP32. Os dados captados pelos sensores DHT22 conectados ao microcontrolador são enviados para o servidor da aplicação utilizando uma API de integração, que, por sua vez, gera gráficos temporais sobre os níveis de temperatura e umidade, além de calcular as condições de armazenamento por meio dos dados capturados.

Vale ressaltar que os sensores DHT22 foram utilizados como prova de conceito e para a obtenção de dados reais, e a avaliação de sua confiabilidade e durabilidade fogem do escopo do trabalho. Para a implantação em um ambiente industrial, os cabos termopares convencionais ou outros dispositivos sensores citados na [Seção 4.4](#) figuram como alternativas robustas e confiáveis.

5.1 Testes do Sistema

Para testar o sistema proposto, foram criados dois cenários, descritos a seguir. O primeiro é referente a entrada de dados reais obtidos a partir de sensores de umidade e temperatura em um ambiente local. O segundo foi gerado a partir do cenário descrito em ([Devilla et al., 2004](#)), que utiliza um silo-teste com grãos de milho.

Teste com dados de sensores reais. Nesta abordagem, foi utilizado o protótipo construído utilizando-se um microcontrolador ESP-WROOM-32, modelo Wemos LoLin32 que é equipado com 4MB de memória flash e CPU de 32 bits e 240MHz de clock, além de conectividade sem-fio compatível com os protocolos 801.11 B/G/N. A placa foi conectada em um sensor DHT22, modelo AM2302, que foi acoplado nas portas GND e alimentação 5 volts, além do terceiro pino de transmissão conectado na porta GPIO 26 do microcontrolador. A [Fig. 5](#) ilustra a construção do protótipo utilizado na leitura e transmissão dos dados.

O acoplamento entre o conjunto de microcontrolador e sensores e o servidor de aquisição dos dados é feito via *socket* da API de integração. Além disso, o sistema Web efetua a validação do sensor integrado utilizando um código *hash* gerado quando um novo sensor é cadastrado, evitando-se assim que sensores inseguros enviem dados para o banco de dados da aplicação.

Com este conjunto foi possível realizar a transmissão dos dados da leitura de temperatura e umidade do ambiente, realizadas a cada 10 minutos por um período de três

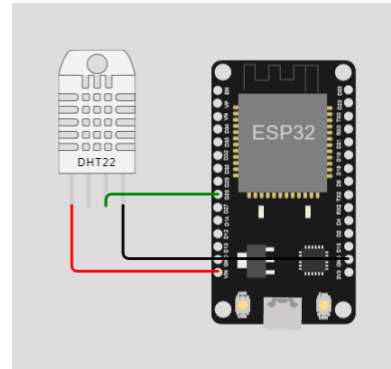


Figura 5: Diagrama do protótipo de sensor para captação de dados ambientais

dias. A [Fig. 6](#) apresenta os dados registrados em gráficos considerando um armazém com soja. O resultado indica a umidade calculada para o grão de soja em 16,15% e a previsão da condição de armazenagem: “Grão Úmido – Risco de fungos e insetos”.

Teste com dados simulados. Devido a dificuldade de se obter dados públicos referentes ao monitoramento de ambientes de armazenamento de grãos, optou-se pela geração dos dados simulados, bem como do cálculo de condições de armazenagem, para o período de um ano.

Deste modo, com base na captura dos dados reais por meio do protótipo de monitoramento desenvolvido, efetuou-se a seleção dos dados relativos a um período de 24 horas, com intervalo de coleta de uma hora. De acordo com [Devilla et al. \(2004\)](#), a diferença de temperatura ideal entre a massa de grãos e a temperatura ambiente externa deve ser próxima de 3°C. Assim, estipulou-se uma aleatoriedade com valores entre 3 e 6 graus superiores as leituras reais de um dia, para a replicação dos dados simulando as leituras de 10 sensores fictícios.

Com base nos dados gerados referentes a leitura de um dia para 10 sensores, foi aplicada uma variância de 10% para a aleatoriedade dos dados replicados para criar uma simulação de 30 dias de dados de monitoramento. Desta forma, obteve-se a referência nomeada para o mês de janeiro. Posteriormente, tomou-se por base as variações de temperatura e umidade média observadas no Estado durante os meses do ano de 2019, segundo consta no Atlas Climático do Estado do Paraná ([Nitsche et al., 2019](#)). Assim, aplicando os diferenciais registrados para o período de um ano, foram gerados os registros para os meses de fevereiro a dezembro, devidamente organizados e armazenados no banco de dados da aplicação.

O resultado obtido, apresentado na [Fig. 7](#), indica a umidade calculada para o grão de milho em (19,87%) e a previsão da condição de armazenagem informando “Grão Úmido – Risco de fungos e insetos”.

6 Conclusão

Este trabalho apresentou uma proposta de sistema de informação para a integração entre sensores de dados ambientais em Unidades de Armazenamento de Grãos (UAGs)

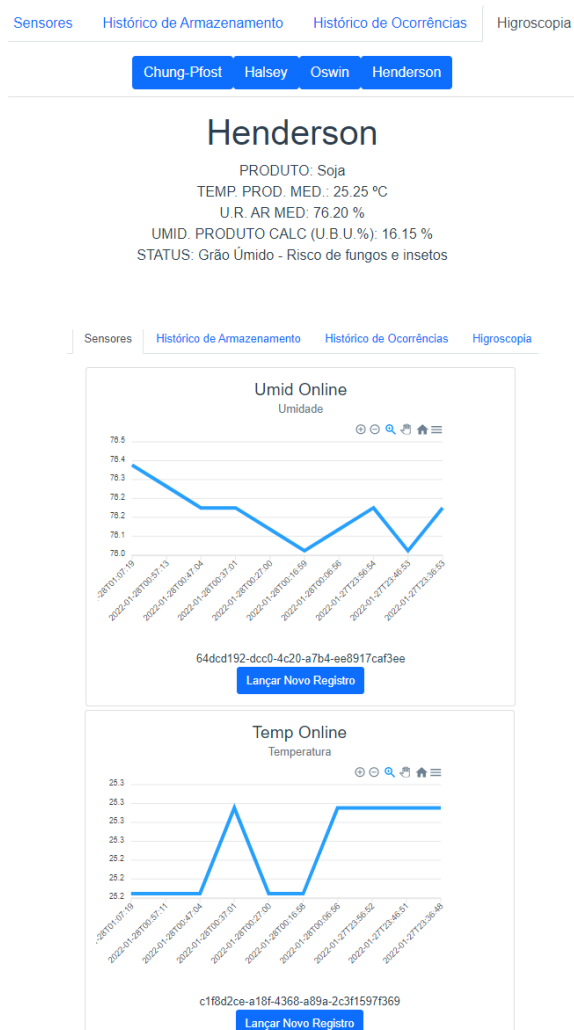


Figura 6: Protótipo do sistema proposto, com detalhamento dos dados de monitoramento de soja

que permite o monitoramento das informações pelos técnicos e responsáveis em tempo real. Além disso, com base nos parâmetros de qualidade dos grãos armazenados identificados durante a pesquisa, é possível acompanhar os níveis de perda do produto.

O sistema foi testado utilizando um protótipo de coleta de dados de umidade e temperatura que se comunica por rede sem-fio com o servidor de aplicação. Um segundo cenário sintético foi utilizado para simular dados de umidade e temperatura com base em um histórico de dados reais de um silo-teste com grãos de milho.

Como trabalhos futuros, propõe-se aprimorar os modelos de predição e perdas, bem como permitir a integração com dispositivos atuadores, possibilitando a automação completa dos mecanismos de controle do ambiente. Busca-se, atualmente, uma unidade armazenadora de grãos na região que disponha de dados digitalizados para acoplamento do sistema.

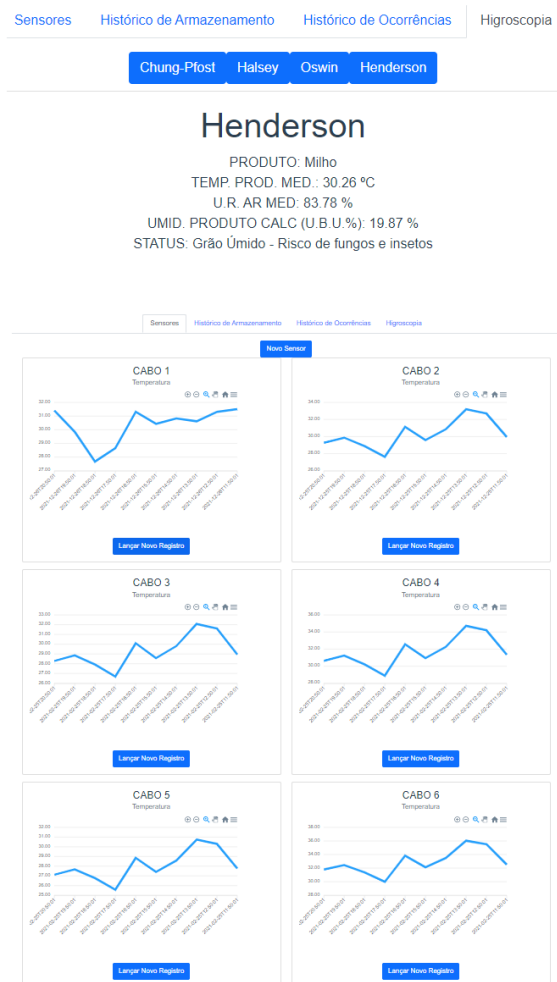


Figura 7: Protótipo do sistema proposto, com detalhamento dos dados de monitoramento de milho

Referências

- Agrawal, H., Prieto, J., Ramos, C. e Corchado, J. M. (2016). Smart feeding in farming through iot in silos, *Intelligent Systems Technologies and Applications 2016*, Springer, Cham, pp. 355–366. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47952-1_28.
- Balsani, W. R., Cruvinel, P. E. e Torre-Neto, A. (1997). Monitoramento de parâmetros climáticos em silos agrícolas com arquitetura inteligente, *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente* pp. 202–206. Disponível em https://fei.edu.br/sbai/SBAI1997/ARTIGOS/III_SBAI_31.pdf.
- Bortolaia, L. A. (2011). *Modelagem Matemática e Simulação do Processo de Secagem Artificial de Grãos de Soja em Secadores de Fluxo Contínuo*, Doutorado em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/37388>.
- Brasil (2000). Lei no 9.973 de 29 de maio de 2000. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9973.htm.

- Brasil (2001). Decreto no 3.855, de 3 de julho de 2001. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2001/d3855.htm.
- Burges, H. D. e Burrell, N. J. (1964). Cooling bulk grain in the british climate to control storage insects and to improve keeping quality, *Journal of the Science of Food and Agriculture* 15(1): 32–50. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740150106>.
- Carvalho, F. e Rodrigues, L. (2021). Perfil tecnológico e de automação das unidades armazenadoras de grãos do estado do paraná, *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Agroinformática (SBIAGRO 2021, SBC, Porto Alegre, RS, Brasil, pp. 245–253*. <https://doi.org/sbiagro.2021.18396>.
- CONAB (2017). Armazenagem. Disponível em <https://www.conab.gov.br/armazenagem>.
- Devilla, I. A., Couto, S. M., Zolnier, S. e de S. e Silva, J. (2004). Variação da temperatura e umidade de grãos armazenados em silos com aeração, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 8(2–3): 284–291. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662004000200018>.
- Faoro, V. (2019). *Modelagem Matemática e Otimização do Fluxo de Ar em Armazéns Graneleiros*, Doutorado em modelagem matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/5870>.
- Ferrasa, M., Biaggioni, M. A. M. e Dias, A. H. (2010). Sistema de monitoramento da temperatura e da umidade em silos graneleiros via radiofrequência, *Revista Energia na Agricultura* 25(2): 1–18. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2010v25n2p139-156>.
- Grolleaud, M. (2002). Post-harvest losses: discovering the full story. Overview of the phenomenon of losses during the Post-harvest. Disponível em <http://www.fao.org/3/AC301E/AC301e00.htm>.
- Guimarães, D. S. (2005). *Desenvolvimento de Módulo Computacional para a Secagem Estacionária de Sementes*, PhD thesis, Universidade Federal de Pelotas. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp000717.pdf>.
- Maier, D., Hulasare, R., Qian, B. e Armstrong, P. (2006). Monitoring carbon dioxide levels for early detection of spoilage and pests in stored grain, *9th International Working Conference on Stored Product Protection*, Brazilian Post-harvest Association – ABRAPOS, pp. 1174–1181. <http://dx.doi.org/10.5073/jka.2010.425.332>.
- Markets e Markets (2021). Agriculture iot market by offering hardware, application (precision farming, precision forestry, precision livestock, precision aquaculture and smart greenhouse), farm size, production stage, and geography (2021–2026). Disponível em <https://bit.ly/34QEgP8>.
- Mesterházy, A., Oláh, J. e Popp, J. (2020). Losses in the grain supply chain: Causes and solutions, *Sustainability* 12(6). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su12062342>.
- Mohler, B. C. (2010). *Avaliação das Características de Secagem dos Grãos de Soja*, Bacharelado em engenharia química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/35186>.
- Nascimento, V. R. G. e Queiroz, M. R. d. (2011). Estratégias de aeração de milho armazenado: temperatura e teor de água, *Engenharia Agrícola* 31: 745 – 759. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000400013>.
- Nitsche, P. R., Caramori, P. H., da Silva Ricce, W. e Pinto, L. F. D. (2019). Atlas climático do estado do paraná. Disponível em <http://www.idrparana.pr.gov.br/system/files/publico/agrometeorologia/atlas-climatico/atlas-climatico-do-parana-2019.pdf>.
- Pabis, S., Jayas, D. e Cenkowski, S. (1998). Grain drying: Theory and practice, Wiley–Blackwell.
- Paturca, E. Y. (2014). Caracterização das estruturas de armazenagem de grãos: um estudo de caso no mato grosso, *Technical report*, Universidade de São Paulo. Disponível em <https://esalqlog.esalq.usp.br/paturca-e-y-caracterizacao-das-estruturas-de-armazenagem-de-graos-um-estudo-de-caso-no-mato-grosso-2014-1>.
- Puzzi, D. (2000). *Abastecimento e armazenagem de grãos*, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola.
- Rocha, K. S. O. (2012). *Modelagem e Simulação do Processo de Resfriamento de Grãos Armazenados em Silos Graneleiros por Meio das Leis de Conservação de Energia e Massa*, Doutorado em engenharia agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Disponível em <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/710/1/texto%20completo.pdf>.
- Santos, S. B. d., Martins, M. A., Faroni, L. d. R. D. e Brito Junior, V. R. d. (2012). Perda de matéria seca em grãos de milho armazenados em bolsas herméticas, *Revista Ciência Agrônômica* 43: 674 – 682. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000400008>.
- Seixas, M. A. e Contini, E. (2017). Internet das coisas (iot): inovação para o agronegócio, *Secretaria de Inteligência e Macroestratégia – Diálogos Estratégicos*. Disponível em <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/192513/1/Internet-das-coisas-1.pdf>.
- SICARM (2021). Sistema de Cadastro Nacional de Unidades Armazenadoras. Disponível em <http://sisdep.conab.gov.br/consultaarmazemweb>.
- Silva, J. d. S. e. (2008). *Armazenagem E Comercialização De Grãos No Brasil*, Ed. Aprenda Fácil.
- Singh, C. B. e Fielke, J. M. (2017). Recent developments in stored grain sensors, monitoring and management technology, *IEEE Instrumentation Measurement Magazine* 20(3): 32–55. <https://doi.org/10.1109/MIM.2017.7951690>.
- Siviero, L. F. C. (2017). *Monitoramento via ultrassom, temperatura e umidade no armazenamento de grãos com acionamento do sistema de aeração*, Bacharelado em engenharia elétrica, Universidade Estadual de Londrina. Disponível em http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2017_LuizFernandoConteSiviero.pdf.