SISTEMA DE MONITORAMENTO DA TAXA DE APLICAÇÃO EM PULVERIZADORES AGRÍCOLAS BASEADO EM MICROCONTROLADOR

Arthur Souza Porfírio[1], Valter Blauth Júnior[2]

RESUMO: A pulverização agrícola convencional carece de controle rigoroso, gerando desperdícios e impactos ambientais. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um protótipo de telemetria de baixo custo, baseado em internet das coisas, para monitoramento da aplicação de defensivos. O sistema integra um microcontrolador com conectividade sem fio, sistema de posicionamento global e sensor de fluxo para calcular a taxa de aplicação localmente e transmitir os dados a um servidor remoto. A validação metodológica englobou calibração estática e ensaios dinâmicos em campo. Uma compensação analítica na programação mitigou erros de vibração mecânica no sensor, reduzindo o erro relativo da vazão para 4,66%. A telemetria em campo validou o modelo matemático e comprovou que oscilações de velocidade causam falhas diretas na dosagem, gerando subdosagem ou superdosagem. Conclui-se que a solução reduz a barreira financeira de acesso à agricultura de precisão, viabilizando o mapeamento de falhas operacionais e promovendo a sustentabilidade fitossanitária.

Palavras-chave: agricultura de precisão; telemetria; internet das coisas; microcontrolador ESP32; taxa de aplicação.

ABSTRACT: Conventional agricultural spraying lacks rigorous control, generating waste and environmental impacts. This work presents the development and validation of a low-cost telemetry prototype, based on the internet of things, for monitoring pesticide application. The system integrates a microcontroller with wireless connectivity, a global positioning system, and a flow sensor to calculate the application rate locally and transmit the data to a remote server. Methodological validation encompassed static calibration and dynamic field trials. An analytical compensation in the programming mitigated mechanical vibration errors in the sensor, reducing the relative

[1]Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Criciúma - Santa Catarina - Brasil. porfiriosouzaarthur@unesc.net

[2]Orientador, Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Criciúma - Santa Catarina - Brasil. valterblauth@unesc.net

flow error to 4.66%. Field telemetry validated the mathematical model and proved that speed oscillations cause direct dosing failures, generating underdosing or overdosing. It is concluded that the solution lowers the financial barrier to accessing precision agriculture, enabling the mapping of operational failures and promoting phytosanitary sustainability.

Keywords: precision agriculture; telemetry; internet of things; ESP32 microcontroller; application rate.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão demanda o uso de telemetria em equipamentos de pulverização para o controle de insumos, uma vez que o monitoramento de variáveis quase em tempo real (*near real-time*) gera dados essenciais para sistemas de tomada de decisão (Molin; Amaral; Colaço, 2015). Alinhada a essa necessidade, a expansão do agronegócio no Brasil eleva a busca por ferramentas de automação voltadas à redução de custos operacionais e ao aumento da conformidade ambiental (EMBRAPA, 2022). Apesar dessa demanda tecnológica, constata-se a ausência de registros contínuos da taxa de aplicação durante a operação, o que resulta em um cenário crítico no qual mais de 75% dos equipamentos de pulverização no território nacional operam de forma incorreta (Gandolfo et al., 2013). Essa falha decorre principalmente da falta de sincronia entre a vazão de fluido e a cinemática da máquina, gerando erros de dosagem que elevam significativamente o risco de deriva e contaminação ambiental (Rodrigues et al., 2015).

Para investigar essa problemática, a literatura científica apresenta diferentes abordagens de hardware, como o trabalho de Sharda et al. (2013), que quantificou a variabilidade da taxa de aplicação em pulverizadores autopropelidos equipados com controle automático de seções, registrando erros significativos durante oscilações de velocidade da máquina. Contudo, o estudo restringe-se à avaliação de equipamentos comerciais de arquitetura fechada, o que acaba limitando a extração e a customização do envio de dados para plataformas de terceiros.

Buscando resolver as variações físicas da aplicação, Deng et al. (2016) propuseram a regulação de pressão em malha fechada utilizando um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), cujos testes demonstraram eficácia na manutenção da pressão sob oscilações de vazão da bomba. No entanto, o sistema atua exclusivamente na correção hidráulica

mediante o uso de controladores industriais, não abordando a transmissão remota dos dados de operação para servidores em nuvem.

Sob a ótica da transmissão remota e do baixo custo, a validação de tecnologias de código aberto é documentada por Goulart (2023) e Hidrobo Proaño et al. (2024), que detalham o uso do microcontrolador ESP32 integrado a medidores de fluxo e módulos GPS para o monitoramento de recursos e geolocalização. Embora essas metodologias validem a estabilidade dos protocolos de rede sem fio para o envio de métricas, os projetos destinam-se a redes hídricas prediais e ao rastreamento veicular isolado, carecendo de integração com a cinemática e a matemática específica de máquinas agrícolas.

Em suma, embora os trabalhos correlatos evidenciem a necessidade de medição na pulverização e a viabilidade da comunicação sem fio, eles ainda apresentam lacunas de integração. Nesse contexto, constata-se a ausência de sistemas de telemetria de código aberto que combinem a leitura simultânea de múltiplos sensores de fluxo com dados de satélite para o cálculo contínuo da taxa de aplicação de cobertura, correlacionando de forma autônoma o volume de calda depositado com a área territorial efetivamente percorrida. Essa carência de soluções modulares acaba impedindo o acesso de propriedades de menor porte a plataformas de armazenamento em nuvem e gestão de frota.

Para suprir essa lacuna, o objetivo geral desta pesquisa consiste em desenvolver um sistema de telemetria de código aberto para máquinas de pulverização, capaz de adquirir e transmitir dados de operação quase em tempo real. Para alcançar esse propósito, definem-se como objetivos específicos: projetar a arquitetura do sensor embarcado para a leitura simultânea de variáveis de fluxo e cinemática; desenvolver o algoritmo de processamento em borda para o cálculo autônomo da taxa de aplicação; implementar a infraestrutura de comunicação sem fio, armazenamento em nuvem e interface *web* (*dashboard*) para o monitoramento remoto; e, por fim, validar a exatidão e a estabilidade do protótipo por meio de ensaios experimentais dinâmicos no campo.

A justificativa desta pesquisa apoia-se na crescente necessidade de otimização de insumos no campo, uma vez que o desperdício na tecnologia de aplicação atinge altos índices. Estima-se que as perdas de calda devido a falhas de calibração cheguem a 30% do volume total aplicado por temporada, gerando um prejuízo financeiro direto que compromete dezenas de dólares por hectare a cada ciclo produtivo (Ferreira, 2020). Ao extrapolar

essa ineficiência para a escala do agronegócio nacional, nota-se que esse déficit de precisão onera severamente os custos de produção, resultando em perdas financeiras bilionárias anualmente.

Diante desse impacto econômico, do ponto de vista tecnológico, a relevância computacional da proposta manifesta-se no desenvolvimento de um protótipo de telemetria para Internet das Coisas (Internet of Things – IoT) estruturado em torno do microcontrolador ESP32, uma arquitetura validada internacionalmente para agricultura inteligente, conforme Boralkar e Kulkarni (2024). Sua adoção viabiliza tanto o processamento em borda das interrupções geradas por múltiplos sensores de fluxo quanto o roteamento seguro dos pacotes de dados para o serviço Firebase. No domínio agronômico, a solução destaca-se por substituir processos de aferição manual por uma telemetria automatizada que integra o volume de calda distribuído por unidade de área à velocidade de deslocamento. O recálculo contínuo dessa métrica, essencial para garantir o alvo biológico sem causar fitotoxicidade ou desperdício, é regido pela Equação 1, conforme a metodologia padrão para o cálculo do volume de calda recomendada pela literatura (Pietczak et al., 2023):

$$Taxa(L/ha) = \frac{Vazo(L/min) \times 600}{Velocidade(km/h) \times Largura(m)} \tag{1}$$

Em que a constante 600 é o fator de conversão de unidades utilizado para adequar os parâmetros de entrada para litros por hectare (L/ha).

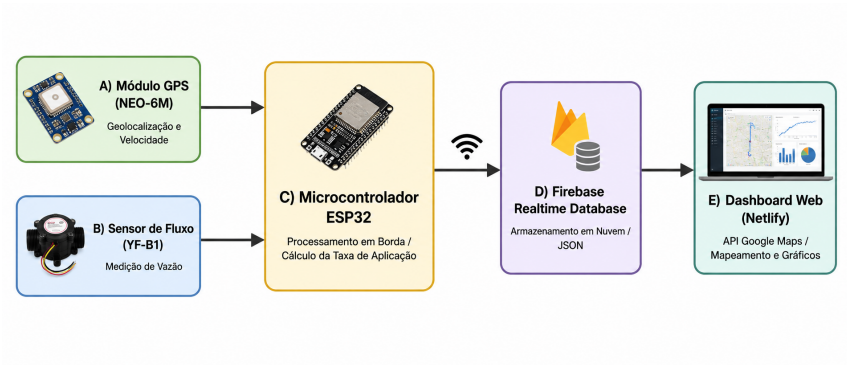
A manutenção rigorosa da taxa de aplicação (L/ha) configura-se como o fator mais crítico na tecnologia de aplicação de defensivos. A ausência de um monitoramento telemétrico espacial contínuo pode levar o operador a cometer falhas invisíveis a olho nu, resultando em dois cenários operacionais prejudiciais: a subdosagem e a superdosagem. A subdosagem compromete a eficácia do controle fitossanitário, favorecendo a sobrevivência do alvo biológico e acelerando o desenvolvimento de resistência em pragas e plantas daninhas. Por outro lado, as falhas de marcha que geram superdosagem acarretam graves consequências agronômicas e ambientais. O excesso de calda química depositada, além de causar fitotoxicidade imediata à cultura principal, promove a contaminação direta do solo. Esse volume excedente de ingredientes ativos tende a sofrer escoamento superficial ou lixiviação através do perfil do solo, atingindo lençóis freáticos e impactando negativamente a sustentabilidade do ecossistema agrícola local (Santos et al., 2024).

Para a apresentação deste estudo, o artigo encontra-se estruturado em quatro seções: a Introdução; os Materiais e Métodos empregados no desenvolvimento do protótipo; a descrição e discussão dos Resultados obtidos nos ensaios; e, por fim, a Conclusão da pesquisa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa classifica-se como aplicada com abordagem quantitativa, sendo dividida nas etapas de desenvolvimento tecnológico e validação experimental. Para atender a essas fases, a arquitetura do projeto engloba a montagem de um *hardware* embarcado, a programação de rotinas de processamento em borda e a configuração de serviços para armazenamento e visualização de dados em nuvem. A Figura 1 ilustra o fluxograma de comunicação e a arquitetura geral do sistema proposto.

Figura 1 - Diagrama de blocos do sistema de telemetria.



Fonte: Gerada por ChatGPT (OpenAI, 2026), via prompt: "Representação de rede neural"

A partir desta topologia, o desenvolvimento da solução foi segmentado e validado em módulos, descritos nas subseções a seguir.

2.1 ARQUITETURA DE HARDWARE

O núcleo de processamento do sistema utiliza o microcontrolador ESP32. A escolha por este dispositivo baseia-se na sua arquitetura de duplo núcleo de 32 bits, conectividade Wi-Fi nativa e pinos com suporte a interrupções de *hardware*. Conectados a este processador central, a medição do fluxo de líquido é realizada por um sensor de vazão em polímero, que opera sob o princípio do efeito Hall. Na arquitetura idealizada para barras de pulverização tratorizadas, a passagem do fluido provoca a rotação de uma turbina interna no sensor, gerando pulsos elétricos proporcionais ao volume transladado. Cabe destacar que estes medidores operam em

uma faixa de fluxo de 1 a 25 litros por minuto e apresentam uma precisão estática de $\pm$ 5% SEA YF (2020), assegurando a confiabilidade da leitura volumétrica no circuito hidráulico.

Em paralelo à medição de fluxo, a aquisição de dados de geolocalização e cinemática ocorre por meio do módulo GPS GY-NEO6MV2. A comunicação entre este receptor de satélite e o microcontrolador estabelece-se via protocolo serial UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*). Para suportar toda essa eletrônica de forma isolada, o sistema embarcado é alimentado diretamente por uma fonte de alimentação portátil, dispensando o uso de circuitos reguladores de tensão intermediários para fornecer energia aos componentes lógicos. Esta arquitetura foi projetada com foco em eficiência, apresentando um consumo energético máximo de aproximadamente 400 mA durante os picos de transmissão, dissipando em torno de 2 Watts Epressif Systems (2023), o que garante autonomia operacional contínua.

2.2 DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE E FIRMWARE

Em relação ao controle lógico, o *firmware* do microcontrolador foi redigido em linguagem C++ utilizando o ambiente de desenvolvimento Arduino IDE. Como estratégia para evitar gargalos, a programação implementa rotinas de interrupção isoladas na memória RAM para a contagem de pulsos dos sensores de fluxo, prevenindo a perda de pacotes durante a execução do código principal.

Após a coleta pelas interrupções, o laço de repetição (*loop*) executa o cálculo da vazão, a soma do fluxo total e a leitura da velocidade de deslocamento fornecida pelo GPS. Em seguida, os valores obtidos alimentam a equação matemática da taxa de aplicação, e a estrutura de dados resultante é convertida para o formato JSON para viabilizar a transmissão à nuvem.

2.3 INFRAESTRUTURA DE NUVEM E INTERFACE DE CONTROLE

Uma vez formatado o pacote JSON pelo microcontrolador, o roteamento dos dados ocorre via rede sem fio para o serviço Firebase Realtime Database. Contudo, para garantir a plena operacionalidade do sistema em zonas rurais com sombreamento de conectividade, a arquitetura de *software* foi desenvolvida com premissas de funcionamento *offline*. O ESP32 foi programado para atuar simultaneamente como um servidor *web* local em modo *Access Point*.

Por meio dessa interface nativa, o operador pode conectar um *smartphone* diretamente à rede Wi-Fi gerada pelo próprio implemento para acessar o painel de controle interno. Esta tela de gerenciamento local permite visualizar os parâmetros instantâneos (velocidade e taxa de aplicação), definir a meta volumétrica desejada, gerenciar a memória *LittleFS* (realizando o *download* ou a exclusão dos arquivos CSV) e, por fim, inserir as credenciais de um roteador externo para que o módulo retome o roteamento quase em tempo real (*near real-time*) para a nuvem. Apoiado nessa flexibilidade de rede, o banco de dados armazena os registros telemétricos de forma segura, acompanhados de carimbos de tempo (*timestamps*).

Para viabilizar a interpretação dessas informações pelo operador ou gestor agronômico, a interface do sistema foi desenvolvida em tecnologias web (HTML, CSS e JavaScript) e hospedada na plataforma Vercel. O painel de controle consome as informações do Firebase e utiliza a biblioteca *JavaScript open-source Leaflet* em conjunto com as camadas de mapa do *Google Maps* para a plotagem espacializada das coordenadas de pulverização, gerando a visualização espacial e o mapeamento da taxa de aplicação de cobertura em tempo de execução.

2.4 PROTOCOLO EXPERIMENTAL E VALIDAÇÃO DINÂMICA

Finalizadas as etapas de montagem e integração, o protocolo experimental foi estruturado em duas fases metodológicas distintas: a calibração volumétrica estática e a validação dinâmica em campo. Para viabilizar a execução de múltiplos ensaios contínuos, utilizou-se o reservatório (5L) e o circuito de compressão prévia de um pulverizador manual. Contudo, para simular com rigor as velocidades reais e a dinâmica de um maquinário agrícola tratorizado, o arranjo tecnológico foi embarcado em um veículo automotor.

Na primeira fase (estática), o método de aferição da medição de fluxo contrastou o dado registrado pelo sistema com o volume físico coletado em uma proveta graduada durante o intervalo cronometrado de 60 segundos. O tempo de amostragem de 60 segundos adotado para a coleta volumétrica fundamenta-se nas práticas e metodologias padrão de calibração de pulverizadores agrícolas no campo. Este intervalo é o tempo exato necessário para extrapolar a leitura para a métrica de Litros por minuto (L/min) de forma direta, além de garantir a estabilização da pressão no sistema hidráulico e fornecer uma amostra estatisticamente representativa para minimizar erros de flutuação de leitura. Durante a execução des-

tes testes iniciais, constatou-se que as vibrações mecânicas inerentes ao deslocamento do equipamento e as flutuações pneumáticas geravam falsos pulsos elétricos no sensor de vazão. Para minimizar esta interferência sem a necessidade de redesenho do *hardware*, implementou-se o método de calibração dinâmica de campo no *firmware*. Esta adaptação atua não apenas como um filtro digital (técnica de *debounce*) para atenuar ruídos elétricos de alta frequência, mas principalmente como uma compensação analítica de calibração. Dessa forma, a lógica de *software* atua para compensar matematicamente as anomalias físicas do circuito (como passagem de microbolhas e turbulência do rotor), garantindo que a contabilização reflita o volume útil aplicado.

Para a validação científica deste módulo, estabeleceu-se como critério de aceitação o cálculo do Erro Relativo Percentual (E_r), conforme as diretrizes de análise de erros do Instituto de Física da Unicamp Cruz et al. (1997), expresso pela Equação 2:

$$E_r(\%) = \left| \frac{V_{lido} - V_{real}}{V_{real}} \right| \times 100 \tag{2}$$

Admitiu-se uma margem de divergência máxima de $\pm$ 5% entre o volume físico (proveta) e o volume digital (microcontrolador).

Uma vez aferida a precisão estática, o sistema avançou para a segunda fase. O planejamento experimental consistiu na execução de 12 ensaios dinâmicos contínuos, combinando trajetos lineares com diferentes perfis de velocidade cinemática. Para garantir a transparência metodológica e a organização das repetições experimentais, a distribuição dos 12 ensaios entre os cenários propostos foi estruturada a partir da classificação dos arquivos de log extraídos, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Planejamento experimental dos ensaios dinâmicos

Cenário	Regime de Deslocamento	Velocidade Alvo (km/h)	Perfil do *Log*	Nº de Ensaios (Repetições)
I	Marcha Manual (A pé)	1,5 a 4,5	Baixa velocidade	2
II-A	Constante Veicular (Baixa)	$\sim$10,0	Média velocidade	5
II-B	Constante Veicular (Alta)	$\sim$20,0	Alta velocidade	2
III	Variável (Teste de Estresse)	Dinâmica (1,1 a 24,5)	Altamente oscilante	3
Total de Ensaios Dinâmicos Executados				**12**

Fonte: Do autor (2026).

A validação global do protótipo foi consolidada pelo cruzamento analítico dos *logs* exportados nestes cenários. Cabe ressaltar que, por se tratar de um sistema de monitoramento contínuo, a execução combinada

destes 12 ensaios resultou na consolidação de um banco de dados composto por mais de 1.500 registros telemétricos individuais. Esse volume amostral permitiu evidenciar, com segurança metodológica para esta etapa de prova de conceito, a capacidade do processamento em borda de recalcular continuamente a taxa de aplicação perante variáveis dinâmicas e ruídos operacionais de campo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os dados obtidos durante a validação prática do protótipo de telemetria agrícola. Os testes foram divididos entre calibração em bancada e ensaios dinâmicos em campo, com o intuito de avaliar a integração de *hardware*, a estabilidade do *software* embarcado e a precisão do algoritmo de cálculo de taxa de aplicação em tempo real.

Para a validação experimental desta Prova de Conceito, optou-se por simulações em escala reduzida conduzidas em dois regimes distintos de deslocamento. Em ambos os cenários, o *hardware* de telemetria foi acoplado a um pulverizador manual de compressão prévia (5L). O primeiro ensaio consistiu na operação do equipamento por um indivíduo a pé, com o objetivo de avaliar a sensibilidade do sistema frente às oscilações de velocidade inerentes ao deslocamento do operador. O segundo ensaio foi realizado com o protótipo embarcado em um veículo automotivo em movimento, simulando as velocidades médias e a dinâmica de deslocamento contínuo de um maquinário agrícola real. Esta abordagem metodológica dupla foi escolhida por permitir a validação da captura, do processamento e da transmissão dos dados em diferentes condições de vibração e velocidade, permitindo avaliar o desempenho do algoritmo antes de uma futura escalabilidade comercial.

3.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DE CAMPO E DESEMPENHO DO HARDWARE

Durante a realização do ensaio experimental em campo, conduzido a pé pelo operador, o microcontrolador ESP32 realizou a aquisição simultânea dos dados de geolocalização e velocidade via módulo GPS, e de fluxo de calda via sensor de vazão em polímero.

O sistema apresentou estabilidade operacional no processamento em borda (*edge computing*), sendo capaz de consolidar as variáveis físicas, aplicar a equação de taxa de aplicação (L/ha) e armazenar os pacotes de dados no sistema de arquivos interno (*LittleFS*) em formato *CSV*. A Tabela 2

apresenta um extrato da janela de estabilização térmica e de deslocamento do sistema, contendo os dados brutos extraídos do equipamento.

Tabela 2 - Extrato do Log de Telemetria (*CSV* gravado pelo Protótipo)

Tempo (s)	Vazão Lida (L/min)	Velocidade (km/h)	Taxa (L/ha)	Latitude	Longitude
401	10.3	3.4	1829.4	-28.597557	-49.330737
405	10.3	2.9	2173.9	-28.597576	-49.330703
409	11.0	3.2	2060.0	-28.597614	-49.330714
412	10.7	3.4	1898.7	-28.597649	-49.330723
417	10.7	3.3	1919.8	-28.597673	-49.330759
441	11.0	3.9	1689.0	-28.597620	-49.330872

Fonte: Do autor (2026).

Conforme exposto na Tabela 2, o desempenho da solução de *hardware* mostrou-se estável. O módulo GPS NEO-6M manteve o rastreio ativo e registrou velocidades variando entre 2,9 e 3,9 km/h. A arquitetura de *software* evitou o bloqueio de execução (*locking delays*), gravando sucessivamente com intervalos médios de 4 segundos de resolução. Do ponto de vista computacional e agronômico, essa latência caracteriza o protótipo como um sistema de monitoramento quase em tempo real (*near real-time*). Embora um atraso de 4 segundos seja elevado para atuar ativamente em válvulas de alta precisão (*hard real-time*), essa resolução temporal é plenamente satisfatória para a plotagem gerencial do mapa de calor na nuvem e para a emissão de alertas visuais ao operador.

Apesar da estabilidade na captura de coordenadas geográficas e deslocamento dinâmico, os dados brutos evidenciam uma anomalia na coluna de Vazão Lida. O sensor registrou uma média de 10,6 L/min, o que ultrapassa severamente a capacidade volumétrica física do equipamento utilizado (aferido previamente em 1,5 L/min). As variáveis físicas que causaram este fenômeno e as adaptações realizadas no sistema para corrigi-lo são analisadas criticamente na seção a seguir.

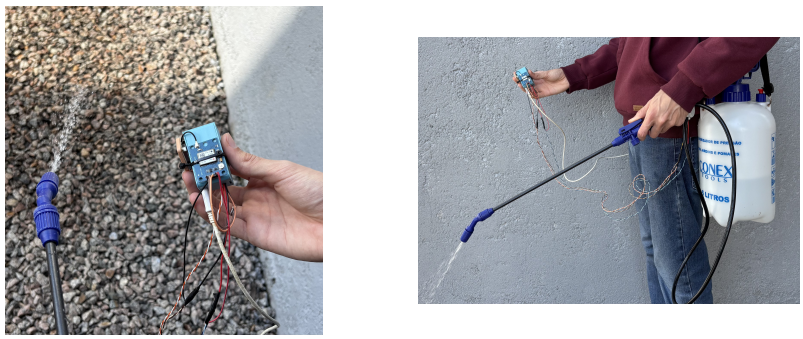
3.2 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO: LIMITAÇÕES E CALIBRAÇÃO DINÂMICA

Durante a análise inicial da telemetria, diagnosticou-se que a discrepância na vazão foi causada por vibração mecânica induzida pelo deslocamento do operador e por flutuações de pressão inerentes ao sistema de compressão pneumática do pulverizador manual. Sensores de fluxo baseados no efeito Hall, como o modelo em polímero utilizado, possuem rotores magnéticos de alta sensibilidade. Durante o trajeto no campo, os

solavancos físicos do líquido e a eventual passagem de microbolhas de ar comprimido pela tubulação fizeram o rotor girar em falso, gerando pulsos anômalos que o microcontrolador interpretou erroneamente como uma vazão elevada.

Para mitigar este efeito físico sem a necessidade de substituição de *hardware*, adotou-se o método de calibração dinâmica de campo. O primeiro passo consistiu na determinação exata da vazão real por meio de uma coleta volumétrica manual com recipiente graduado durante o intervalo cronometrado de um minuto (Figura 2).

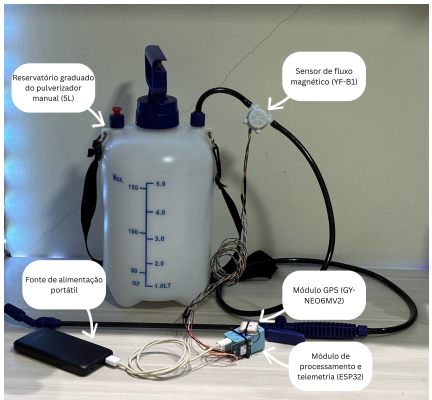
Figura 2 - Aferição de vazão do pulverizador



Fonte: Do autor (2026).

O sistema de telemetria embarcada foi estruturado a partir da integração de cinco componentes principais, conforme ilustrado na Figura 3. A fonte de alimentação portátil fornece energia contínua de 5 V para o módulo de processamento (ESP32). Este atua como a unidade central, recebendo os pulsos do sensor de vazão em polímero, acoplado à mangueira do reservatório de 5 L, e cruzando esses dados com as coordenadas e a velocidade do GPS NEO-6M.

Figura 3 - Visão geral dos componentes que integram o protótipo.



Fonte: Do autor (2026).

O volume físico real coletado de 1,5 L/min serviu como valor de referência. Utilizando a volumetria total consumida conhecida e a média dos pulsos anômalos registrados, o fator de calibração do *firmware* foi recalculado proporcionalmente, sendo ajustado de 3,0 para 22,0. É fundamental ressaltar que este fator não representa uma constante universal do sensor em polímero, mas sim uma compensação analítica de calibração específica para este arranjo tecnológico (pulverizador manual de 5 L sob compressão prévia). Em um cenário de escalabilidade, este parâmetro atua como uma variável de configuração, devendo ser aferido e customizado individualmente para cada implemento agrícola que receber a telemetria, adequando-se à pressão, turbulência e vazão nominal do maquinário hospedeiro.

A dedução deste novo fator calculado (F_{novo}) tomou como base a correlação entre a vazão incorreta (V_{lida}), o fator padrão de fábrica do sensor (F_{antigo}) e a vazão real (V_{real}), conforme a Equação 3:

$$F_{novo} = \frac{V_{lida} \times F_{antigo}}{V_{real}} \tag{3}$$

Substituindo os valores obtidos no ensaio (vazão lida de 11,0 L/min para uma saída real de 1,5 L/min sob fator inicial de 3,0), obteve-se o ajuste matemático final expresso na Equação 4:

$$F_{novo} = \frac{11,0 \times 3,0}{1,5} = 22,0 \tag{4}$$

Esta compensação garantiu que o sistema passasse a interpretar adequadamente a translação do fluido, demonstrando a estabilidade do algoritmo em suprimir, via *software*, as particularidades mecânicas do implemento. O ensaio linear subsequente demonstrou a eficácia desta compensação analítica: a vazão média registrada caiu para 1,43 L/min, gerando um Erro Relativo (E_r) de apenas 4,66%, contido na margem de tolerância do fabricante ($\pm$ 5%).

Para demonstrar a estabilidade estatística do sistema após a compensação analítica, o cálculo do Erro Relativo final é explicitado pela substituição dos valores de validação empírica na Equação 2. Considerando a vazão de referência na proveta (V_{real}) como 1,50 L/min e a vazão média registrada pelo microcontrolador (V_{lido}) como 1,43 L/min, obtém-se o seguinte detalhamento algébrico:

$$E_r(\%) = \left| \frac{1,43 - 1,50}{1,50} \right| \times 100 \tag{5}$$

$$E_r(\%) = \left| \frac{-0,07}{1,50} \right| \times 100 \tag{6}$$

$$E_r(\%) = 0,0466 \times 100 = 4,66\% \tag{7}$$

3.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DINÂMICOS PÓS-CALIBRAÇÃO

Uma vez validada a precisão estática do sensor, o protótipo foi submetido a 12 ensaios dinâmicos em campo. Para conferir robustez estatística aos resultados e mitigar o efeito de anomalias isoladas de leitura (*outliers*), o delineamento experimental baseou-se em múltiplas repetições. A execução destes ensaios gerou um volume amostral superior a 1.500 registros telemétricos. A consolidação espacial e temporal destes dados através de médias aritméticas permitiu suprimir flutuações pontuais, assegurando que os índices de precisão representem o comportamento estabilizado do sistema.

Tabela 3 - Resumo estatístico dos 12 ensaios dinâmicos.

Cenário	**Nº de Ensaios**	**Média do Erro (%)**	**Desvio Padrão (σ)**
Manual (A pé)	2	4,8	0,21
Constante (Baixa)	5	4,5	0,12
Constante (Alta)	2	4,6	0,15
Variável	3	4,7	0,25

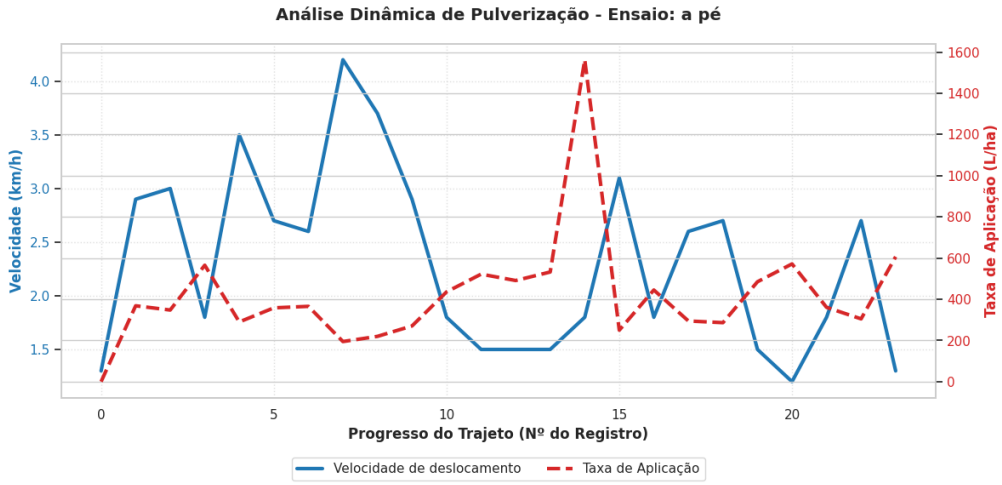
Fonte: Do autor (2026).

Após a consolidação estatística, os resultados mais representativos foram estruturados em três categorias de análise gráfica, detalhadas a seguir.

3.3.1 Cenário Base: Operação Manual (A pé)

O primeiro cenário buscou registrar a linha de base de operação original do pulverizador costal, com o operador realizando o percurso a pé.

Figura 4 - Taxa de aplicação em deslocamento manual



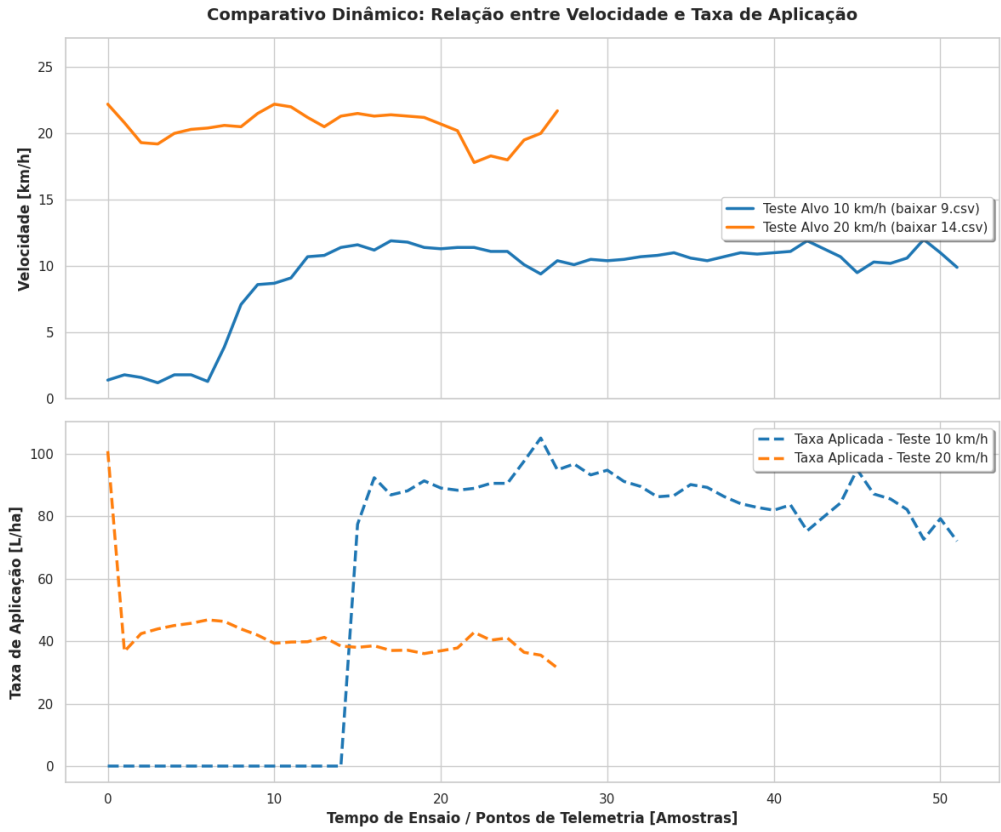
Fonte: Do autor (2026).

Como ilustra a Figura 4, a operação humana apresenta flutuações naturais e contínuas na velocidade de caminhada, o que reflete diretamente nas oscilações da taxa aplicada. Cabe destacar, com base na análise destes dados quantitativos, que em regimes de deslocamento a pé variando entre 1,8 e 4,2 km/h, a limitação de acurácia do módulo GPS NEO-6M torna-se evidente. Por ser um dispositivo civil de baixo custo, o sensor apresenta instabilidade posicional acentuada em baixas velocidades, gerando ruídos na leitura cinemática. Essa limitação intrínseca de *hardware* contribui para a variabilidade observada na taxa de aplicação neste ensaio específico, sendo um efeito que é naturalmente atenuado quando o sistema é submetido a velocidades automotivas mais elevadas e contínuas.

3.3.2 Cenário de Velocidades Constantes: 10 km/h vs 20 km/h

Para avaliar a resposta matemática do sistema frente ao tráfego de máquinas agrícolas, o pulverizador foi embarcado em um veículo automotor e submetido a ensaios de deslocamento em velocidades constantes alvo de 10 km/h e 20 km/h. A expectativa teórica é que, ao dobrar a velocidade mantendo a mesma vazão, a taxa de aplicação caia pela metade.

Figura 5 - Comparativo de taxa de aplicação em velocidades veiculares



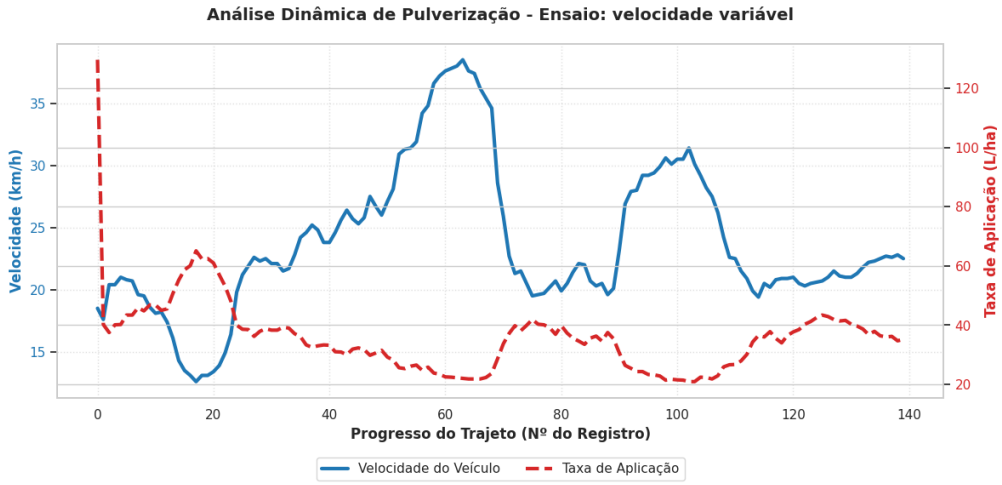
Fonte: Do autor (2026).

A Figura 5 ilustra de forma clara essa premissa física. Observa-se que, devido ao rigor no controle da velocidade do veículo durante o percurso, o sistema de telemetria registrou duas faixas de aplicação distintas e estáveis. O recálculo executado pelo microcontrolador ESP32 apresentou comportamento consistente, garantindo a integridade dos dados registrados no *dashboard*.

3.3.3 Cenário de Velocidade Variável (Teste de Estresse)

O ensaio mais crítico simulou variações dinâmicas em campo, como trocas de marcha bruscas ou desvios de obstáculos. O veículo transitou oscilando intencionalmente a velocidade entre acelerações severas e frenagens repentinas.

Figura 6 - Taxa de aplicação sob velocidade variável



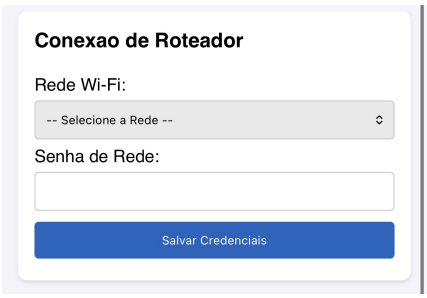
Fonte: Do autor (2026).

A Figura 6 evidencia a vulnerabilidade da pulverização perante o controle inadequado do trator. Em determinados momentos do percurso, a redução drástica da velocidade gerou um pico instantâneo na taxa de aplicação, elevando-a para valores críticos (superdosagem). Do ponto de vista agronômico, essa condição acarreta desperdício financeiro e risco de fitotoxicidade para a cultura da macieira. Em contrapartida, as acelerações bruscas derrubaram a taxa aplicada (subdosagem), não garantindo o volume necessário para a proteção foliar. Esta discrepância reforça a relevância da solução desenvolvida neste trabalho para auditar e corrigir operações no campo quase em tempo real.

3.4 INTERFACE DE VISUALIZAÇÃO (DASHBOARD WEB) E GESTÃO NA NUVEM

A gestão da informação telemétrica do protótipo foi dividida em duas instâncias de acesso: a interface local (*offline*) e o *dashboard* em nuvem. A Figura 7 ilustra o servidor *web* nativo hospedado na própria memória do ESP32. Esta interface permite o acesso completo às funcionalidades do sistema mesmo em cenários de sombreamento de conectividade agrícola.

Figura 7 - Interface web local nativa hospedada no microcontrolador ESP32.



(a) Configuração de Wi-FI

(b) Definição de meta e gerenciamento de arquivos CSV.

Fonte: Do autor (2026).

Através deste painel acessado via conexão Wi-Fi direta com o módulo, o operador consegue auditar e parametrizar a pulverização. A tela apresentada na Figura 7a atua como um gerenciador de credenciais, permitindo configurar a rede local da fazenda, além das credenciais de acesso e escrita no Firebase Database. Já a instância exibida na Figura 7b viabiliza a parametrização da meta de aplicação em L/ha antes do início da operação, o monitoramento instantâneo das variáveis físicas por meio dos medidores e, crucialmente, o gerenciamento da memória *LittleFS*. Esta última funcionalidade permite a visualização, exclusão e extração física dos *logs* em formato CSV gravados no microcontrolador.

A consolidação de toda a telemetria processada na borda é materializada na interface gráfica do usuário. O *dashboard* web (Figura 8) permite o monitoramento instantâneo, exibindo as métricas globais do teste, o volume de calda consumido e os parâmetros dinâmicos em painéis laterais.

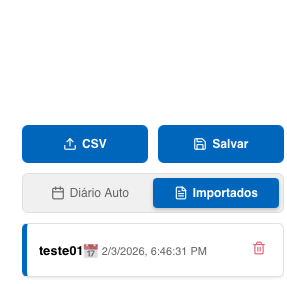
Figura 8 - Dashboard telemétrico e mapa de calor

Fonte: Do autor (2026).

O grande diferencial gerencial da interface é a plotagem espacializada das falhas evidenciadas nos ensaios. A paleta de cores do mapa de calor atua como um alerta rápido: pontos verdes sinalizam cobertura dentro da meta; vermelhos acusam as zonas de superdosagem (frenagens) e amarelos demarcam as áreas de subdosagem (acelerações).

Complementando o ecossistema, o módulo de interface permite a importação dos logs em formato *CSV* extraídos do microcontrolador, realizando a renderização dinâmica do mapa de calor na tela para fins de auditoria e cálculos de custo de safra (Figura 9).

Figura 9 - Interface de gestão e histórico de logs salvos na nuvem.



(a) Histórico de arquivos salvos.

(b) Registro com marca temporal.

Fonte: Do autor (2026).

3.5 COMPARAÇÃO COM TRABALHOS RELACIONADOS

Em comparação com sistemas comerciais de taxa variável e telemetria para pulverização descritos por Sharda et al. (2013), que exigem

alto investimento financeiro e são voltados a grandes maquinários, o protótipo desenvolvido demonstra que a integração de microcontroladores de baixo custo com sensores de mercado é capaz de entregar resultados de processamento em borda com precisão satisfatória. Em consonância com o estudo de Boralkar e Kulkarni (2024), que destaca a viabilidade do *chip* ESP32 na agricultura inteligente, este trabalho expande essa aplicação especificamente para o monitoramento dinâmico da pulverização.

A literatura aponta que a Agricultura 4.0 muitas vezes exclui o pequeno produtor devido ao elevado custo de aquisição tecnológica (PRÓXIMO NÍVEL, 2019). Contudo, os resultados comprovaram que é possível embarcar a mesma modelagem matemática de monitores comerciais de alto padrão em componentes acessíveis, permitindo a mitigação de falhas operacionais e inserindo o implemento de pequeno porte no ecossistema da Internet das Coisas (IoT) (Sarno, 2017).

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema de telemetria agrícola focado no monitoramento da taxa de aplicação em pulverizadores. A partir do projeto e da execução de sucessivos ensaios dinâmicos, conclui-se que o protótipo atendeu às premissas estabelecidas, atuando com estabilidade no processamento de dados em borda e validando a solução tecnológica proposta.

A validação da arquitetura evidenciou que a integração de componentes embarcados de baixo custo como microcontroladores, módulos de geolocalização e sensores de fluxo apresenta viabilidade técnica para o ambiente agrícola. Os desafios físicos inerentes à operação, como vibrações mecânicas e flutuações pneumáticas, foram atenuados por meio de calibração dinâmica via *software*. Essa adaptação algorítmica reduziu o erro relativo para patamares aceitáveis ($\pm 4,66\%$), demonstrando a capacidade de contornar limitações físicas de *hardware* de forma programática.

Os resultados práticos obtidos nos ensaios veiculares validaram a hipótese central do estudo: a vulnerabilidade do processo de pulverização frente a variações de velocidade. O sistema apresentou comportamento compatível com o modelo matemático ao recalcular a taxa de aplicação continuamente, evidenciando a correlação inversamente proporcional entre o deslocamento e o volume aplicado. Mais além, as simulações expuseram falhas operacionais críticas, registrando picos de superdosagem em frenagens e subdosagem em acelerações abruptas.

Ao mapear essas variações e integrar os dados em uma plataforma gerencial com mapas de calor georreferenciados, a solução consolida-se como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão. O sistema auxilia diretamente na prevenção de falhas, contribuindo para a redução do desperdício de insumos, o aumento da sustentabilidade agrícola e a mitigação dos riscos de fitotoxicidade no solo.

Entre as limitações deste estudo, reconhece-se a execução em escala reduzida. A utilização de um reservatório de 5 L restringe a validação sob pressões hidráulicas e vazões típicas de maquinários comerciais de grande porte. Adicionalmente, destaca-se a limitação de acurácia de rastreadores civis em baixas velocidades (inferiores a 5 km/h), o que restringe a precisão espacial da telemetria em operações exclusivamente manuais.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de ensaios experimentais de longa duração em campo, visando analisar o desgaste e a confiabilidade dos sensores sob regimes severos de operação. No escopo do processamento de sinais, propõe-se investigar o impacto das vibrações na integridade dos dados para o aperfeiçoamento dos filtros digitais. Sugere-se também a incorporação de sistemas de geolocalização de alta precisão (como tecnologia RTK) e a evolução do monitoramento passivo para a atuação ativa em Taxa Variável (VRA). Adicionalmente, no domínio do desenvolvimento de software, propõe-se a parametrização do fator de calibração dinâmico diretamente via interface de usuário (dashboard/frontend), eliminando a necessidade de hardcoding no firmware do microcontrolador (ESP32) e permitindo que o operador ajuste o sistema de forma ágil caso ocorra a substituição de componentes hidráulicos. Por fim, recomenda-se avaliar a eficiência de protocolos de comunicação sem fio de longo alcance em cenários rurais com restrição de conectividade

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores declaram que ferramentas de Inteligência Artificial generativa foram utilizadas exclusivamente como apoio auxiliar à elaboração deste trabalho, incluindo assistência na revisão linguística, estruturação textual e organização de ideias. Nenhuma ferramenta de IA foi utilizada para substituição da autoria intelectual, análise científica, interpretação dos resultados ou tomada de decisões acadêmicas. A responsabilidade integral pelo conteúdo, originalidade, veracidade das informações e conformidade com os princípios de integridade científica permanece integralmente atri-

buída aos autores.

REFERÊNCIAS

BORALKAR, R. R.; KULKARNI, S. S. **Iot based smart agriculture system using esp32**. In: **4th Interdisciplinary Conference on Electrics and Computer (INTCEC)**. IEEE, 2024. 2024. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10602915>. Acesso em: 22 out. 2025.

CRUZ, C. H. de B. et al. **Guia para Física Experimental: Caderno de Laboratório, Gráficos e Erros**. Campinas, 1997. Versão 1.1.

DENG, W. et al. **Constant pressure control for variable-rate spray using closed-loop proportion integration differentiation regulation**. Journal of Agricultural Engineering, XLVII, n. 512, p. 148–156. 2016, Disponível em: <https://www.agroengineering.org/jae/article/view/512>. Acesso em: 22 out. 2025.

EMBRAPA. **Agricultura de precisão**. 2022. Agência de Informação Tecnológica. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/avanco-tecnologico/agricultura-de-precisao>. Acesso em: 25 ago. 2025.

Epressif Systems. **ESP32 Series Datasheet**. Shanghai, China, 2023. Disponível em: <https://www.espressif.com>. Acesso em: 27 abr. 2026.

FERREIRA, M. d. C. **Como minimizar perdas na aplicação de defensivos agrícolas**. 2020. Revista Cultivar. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/como-minimizar-perdas-na-aplicacao-de-defensivos-agricolas>. Acesso em: 24 out. 2025.

GANDOLFO, M. A. et al. **Inspeção periódica de pulverizadores: diagnóstico para a região norte do paraná**. Engenharia Agrícola, SciELO Brasil, v. 33, n. 2, p. 411–421. 2013, Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/>. Acesso em: 22 out. 2025.

GOULART, L. V. M. **Monitoramento Inteligente de Consumo de Água em Condomínios Através de um Sistema de Sensor de Vazão e Microcontrolador ESP32 com Plataforma Tago.IO para Análise de Dados em Tempo Real**. Editora Científica, 2023. In: Smart Cities e Smart Factory: Insights sobre tendências e padrões, Vol. 1. Disponível em: <https://editoracientifica.com.br/ebooks/smart-cities-e-smart-factory-insights-sobre-tendencias-e-padroes-volume-1/>. Acesso em: 22 out. 2025.

Hidrobo Proaño, S. M. et al. **Desarrollo de un sistema de localización basado en GPS e IoT: Un estudio de caso en Quito**. Revista

Investigación Tecnológica IST Central Técnico, v. 6, n. 1. 2024, Disponível em: <https://doi.org/10.70998/itistct.v6i1.165>. Acesso em: 22 out. 2025.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. d.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos. 2015.

PIETCZAK, E. L. et al. **A qualidade da água e adjuvantes na tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas**. TECNOLOGIA E GESTÃO DA INOVAÇÃO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO SUSTENTÁVEIS. 2023.

PRÓXIMO NÍVEL. **Entenda como a Agricultura 4.0 deve levar inovação aos pequenos produtores**. 2019. Blog Próximo Nível, por Claro. Disponível em: <https://proximonivel.claro.com.br/entenda-como-a-agricultura-4-0-deve-levar-inovacao-aos-pequenos-produtores/>. Acesso em: 22 ago. 2025.

RODRIGUES, E. B. et al. **Deriva de equipamentos costais na aplicação de glyphosate**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, SciELO Brasil, v. 19, n. 10, p. 1012–1017. 2015, Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/>. Acesso em: 22 out. 2025.

SANTOS, E. L. d. et al. **Impactos causados pelo uso excessivo de agroquímicos na agricultura familiar: uma revisão**. Observatorio de la Economía Latinoamericana, v. 22, n. 3, p. e3746. 2024.

SARNO, L. V. **Iot no agronegócio**. GV Executivo, v. 16, n. 2. 2017.

SEA YF. **Water Flow Sensor YF-B1 Technical Specifications**. [S.l.], 2020. Acesso em: 27 abr. 2026.

SHARDA, A. et al. **Field application uniformity and accuracy of two rate control systems with automatic section capabilities on agricultural sprayers**. Precision Agriculture, v. 14, p. 307–322. 2013, Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9296-z>. Acesso em: 22 out. 2025.