

# Agricultura de Precisão Integrando de Rede em Malha IoT e Computação em Nuvem

Eduardo E. Mosca  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Universidade Estadual do Ceará  
Fortaleza-CE, Brasil  
eduardo.mosca@aluno.uece.br  
ORCID: 0000-0003-3572-7691

Carlos A. Aquino  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Universidade Estadual do Ceará  
Fortaleza-CE, Brasil  
carlos.aquino@aluno.uece.br  
ORCID: 0009-0005-9911-2161

Antonio M. Braga Neto  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Universidade Estadual do Ceará  
Fortaleza-CE, Brasil  
mozar.braga@aluno.uece.br  
ORCID: 0009-0000-1836-0985

Ivo A. Pimenta  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Universidade Estadual do Ceará  
Fortaleza-CE, Brasil  
aguiar.pimenta@aluno.uece.br  
ORCID: 0009-0005-4571-6242

Rafael L. Gomes  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Universidade Estadual do Ceará  
Fortaleza-CE, Brasil  
rafa.lopes@uece.br  
ORCID: 0000-0001-7922-0695

**Resumo**—As Fazendas Inteligentes são uma aplicação da Internet das Coisas (IoT) no setor agrícola, onde uma variedade de equipamentos agrícolas e dispositivos ambientais são integrados com tecnologias avançadas. A conectividade de rede entre estes dispositivos permite a troca de dados em tempo real, facilitando o monitoramento e a gestão eficiente das operações agrícolas, otimizando recursos e melhorando a produtividade e sustentabilidade das fazendas. Deste modo este trabalho pretende mostrar a criação de um modelo de Agricultura de Precisão, em que será possível coletar dados da fazenda em tempo real bem como realizar um mapeamento da fazenda, sendo possível dizer qual o problema da fazenda e onde ele se encontra, se houver, em tempo real. Para isso, o sistema utiliza uma rede em malha para conectividade total na fazenda e se integra a um serviço de nuvem, que armazena e processa dados de um sensor de umidade do solo, validando a coleta e envio em tempo real.

**Index Terms**—Agricultura 4.0, Fazendas Inteligentes, Comunicação Sem Fio, Internet das Coisas.

## I. INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, o setor agrícola vem se desenvolvendo muito rapidamente para atender adequadamente a demanda global e para, também, aumentar a qualidade dos alimentos. Com isso as plantações e fazendas vem investindo cada vez mais em monitoramento de recursos e do cultivo das plantas com o intuito de atingir esses objetivos. Tal conceito vem se solidando na literatura como Fazendas Inteligentes e Agricultura de Precisão [1].

Ambos os termos se referem às tecnologias utilizadas nas plantações. Porém, para Fazendas Inteligentes, o termo é relacionado a captura, coleta e interpretação dos dados coletados das plantas, enquanto para a Agricultura de Precisão está mais relacionado ao foco em aumentar a eficiência e a rentabilidade por meio da otimização dos insumos e recursos, reduzindo o impacto ambiental [2]. As tecnologias

agrícolas atuais e futuras, fundamentais para a Agricultura de Precisão, se dividem em três categorias principais [3]: Internet das Coisas (IoT), Veículos Aéreos Não Tripulados (UAV) e Sensores, essenciais para Agricultura de Precisão. Contudo, o desenvolvimento da Agricultura de Precisão é limitado pela falta de modelos de sistemas que orientem a construção de sistemas de monitoramento baseados em IoT que sejam escaláveis e possuam uma capacidade de análise de dados eficiente [1].

De maneira geral, as soluções baseadas em IoT para ambientes inteligentes sofrem com problemas de conectividade devido a potência de transmissão limitada dos dispositivos, bem como a interferência de outros dispositivos e do ambiente rede, resultando em situações de baixa capacidade de transmissão em cenários de longo alcance [4]. Este cenário acontece com a tecnologia LoraWan [5], onde a transmissão de dados pode ocorrer em grandes distâncias, mas a taxa de transmissão é limitada a poucos Kbps (entre 300 bps a 50 kbps) e o custo de implantação é alto. Por outro lado, a tecnologia Wifi (Família 802.11) possui as seguintes vantagens [6]: (A) Largura de banda alta, permitindo a transferência rápida de dados entre dispositivos (suportando grandes volumes de dados, como vídeos e imagens de alta resolução); e, (B) Alcance considerável, permitindo que dispositivos IoT se comuniquem de forma confiável e com protocolos de segurança avançados.

Uma alternativa para expandir o alcance é a aplicação de Redes em Malha IoT usando WiFi [7], [8]. Essas redes permitem a comunicação direta entre dispositivos IoT, acesso à Internet e integração com serviços em nuvem para armazenamento e análise de dados [9]. Com algoritmos de roteamento dinâmico e gerenciamento centralizado, as Redes em Malha IoT garantem escalabilidade para adicionar novos dispositivos sem comprometer o desempenho, tornando-se

assim uma abordagem chave para aplicações IoT como o caso de fazendas inteligentes e agricultura de precisão [10], [11].

Junto a esta necessidade de conectividade, as fazendas inteligentes e agricultura de precisão necessitam processar os dados coletados a fim de habilitar aplicações que fornecem indicativos valiosos sobre o estado das plantações, prevenir doenças, otimizar o uso de recursos como água e fertilizantes, e até mesmo automatizar processos como irrigação e pulverização [1]. Essas aplicações não apenas aumentam a eficiência e a produtividade agrícola, mas também contribuem para uma gestão sustentável dos recursos naturais, reduzindo custos e impactos ambientais. Neste cenário, a computação em nuvem é uma abordagem crucial, pois fornece uma infraestrutura flexível e escalável para armazenamento, processamento e análise de grandes volumes de dados agrícolas, onde a coleta contínua de dados em tempo real requer uma capacidade de processamento e armazenamento ágil e eficiente [12].

Contudo, soluções que integrem essas abordagens são complexas pois necessitam lidar com os aspectos de capacidade de comunicação e de taxa de transmissão necessários [13]. Essa integração envolve garantir que diferentes dispositivos e protocolos de comunicação funcionem em harmonia, o que é um desafio técnico complexo. Outro desafio crucial é o gerenciamento de dados e a latência [14]. Com grandes volumes de dados sendo gerados continuamente por dispositivos IoT, a transmissão e processamento em tempo real se tornam complicados, especialmente em Redes em Malha, onde a comunicação pode ser lenta e sujeita a falhas. A escalabilidade e resiliência do sistema também são preocupações importantes, já que a infraestrutura deve ser capaz de suportar um grande número de dispositivos e continuar operando eficientemente, mesmo diante de falhas.

Dentro deste contexto, este trabalho apresenta uma solução para fazendas inteligentes e agricultura de precisão, onde os dispositivos de IoT servirão não apenas para coletar dados do ambiente, mas fazer parte do processo de comunicação através de uma rede em malha baseada em tecnologia Wifi e roteamento dinâmico, onde os dados são enviados para um ambiente de nuvem real para serem processados. A solução foi avaliada em um ambiente real dentro da universidade, a partir de uma aplicação de monitoramento de umidade do solo executando na nuvem AWS, onde aspectos de capacidade de conectividade, taxa de transmissão sobre diversos saltos e atraso fim-a-fim (entre dispositivo e nuvem).

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção III descreve o estudo realizado, enquanto as Seções IV discute os experimentos e os resultados, respectivamente. Por fim, a Seção V conclui o artigo e apresenta trabalhos futuros.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, são apresentados diversos estudos e propostas no âmbito das Fazendas Inteligentes, destacando-se a implementação de IoT em diferentes modelos de solução. Independentemente das especificidades dos protocolos da camada física, uma característica comum observada é a adoção da topologia de Malha para otimizar o envio de dados.

Sayem et al. [15] focam em garantir a segurança das fazendas agrícolas em Bangladesh, onde o roubo e atividades agressivas estão aumentando. Os autores apresentam um sistema de segurança agropecuária inteligente baseado em IoT, projetado para detectar acessos não autorizados e alertar os agricultores em tempo real. O sistema consiste em uma estação emissora localizada na fazenda e duas estações receptoras—uma na casa do agricultor e outra em seu dispositivo móvel.

Prasa et al. [16] visam otimizar o monitoramento e gestão na agricultura inteligente através de Redes de Sensores Sem Fio baseadas em LoRaWan. O estudo inclui monitoramento remoto e análise de dados dos sensores por algoritmo de agrupamento não supervisionado, visando automatizar o sistema agrícola. No entanto, o modelo se limita à coleta e transmissão de dados em um ponto específico. Similarmente, Pechlivani et al. [17] apresentam uma ferramenta baseada em IoT, projetada para uma análise do solo e monitoramento ambiental no domínio agrícola. A ferramenta integra vários sensores para medições tanto do solo quanto do ambiente, a fim de monitorar o ambiente em tempo real.

Vineetha et al. [18] descrevem um algoritmo estrutural para gerenciar agroecossistemas de forma autônoma a partir de dados coletados em tempo real a partir de dispositivos IoT. O algoritmo faz parte de um sistema que possibilita o monitoramento, agendamento e controle de diferentes componentes do agroecossistema, como água, solo, fertilizantes, luz, umidade, temperatura, pH do solo e crescimento das culturas. Além disso, o algoritmo pode identificar tendências e padrões gerais no ambiente e oferecer conselhos oportunos aos agricultores com base nas condições em tempo real.

As referências [15]–[18] apresentam propostas que aplicam IoT para monitoramento e atuação em ambientes agrícolas. Contudo, diferente da proposta deste artigo, estes trabalhos desconsideram os aspectos de cobertura de transmissão do ambiente agrícola e taxa de transmissão necessários para atender os requisitos de QoS necessários. Este aspecto é tratado neste trabalho integrando a coleta de dados em uma estrutura de rede em malha IoT, que além de expandir a cobertura, consegue manter a taxa de transmissão necessária. Adicionalmente, a integração com ambiente de nuvem permite o tratamento e análise dos dados de forma escalável e precisa para os serviços da Agricultura 4.0. Portanto, percebe-se que nenhuma proposta recente encontrada na literatura desenvolve uma solução para agricultura de precisão que aplique redes em malha IoT com Wifi e integradas com computação em nuvem, o qual é o objetivo deste trabalho.

## III. PROPOSTA

Redes IoT na agricultura estão se tornando cada vez mais complexas, incorporando uma variedade de dispositivos como sensores de umidade do solo, controladores de irrigação e outros instrumentos de monitoramento. Cada dispositivo tem uma funcionalidade específica e, portanto, um comportamento de rede único. Por exemplo, sensores de umidade do solo em nossa rede enviam dados periodicamente para um servidor central, enquanto outros dispositivos podem operar de maneira

diferente. Essa diversidade de dispositivos e comportamentos aumenta a complexidade do gerenciamento da rede e das soluções de otimização de recursos, como economia de energia e processamento de dados.

Este trabalho propõe uma solução para fazenda inteligente e agricultura de precisão utilizando Redes em Malha IoT com o microcontrolador ESP32 [19], onde a Figura 1 ilustra a esquematização definida. A solução é projetada para permitir a comunicação entre os dispositivos através da Rede em Malha, com um dos ESP32 atuando como nó central (raiz ou *root*). Este nó central é responsável pela interconexão entre a rede Rede em Malha interna e a conexão externa, facilitando a transmissão de dados para um servidor AWS. Os nós que não são o nó central enviam periodicamente informações, incluindo a umidade do solo, o MAC do dispositivo e um marco temporal (*timestamp*), para o nó raiz. O nó raiz, por sua vez, repassa essas informações para um servidor AWS. Uma rotina AWS recebe esses dados e os armazena em um banco de dados DynamoDB. Cada nó tem sua própria tabela no DynamoDB, permitindo um mapeamento preciso da fazenda.

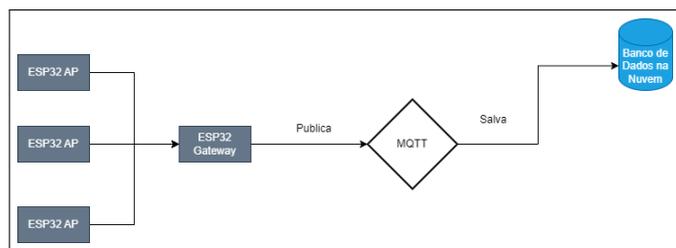


Figura 1. Visão Geral da Solução.

Assim, o fluxo de dados segue uma arquitetura clara: (I) Monitoramento e Coleta de Dados pelos sensores nos nós da rede; (II) Transmissão de dados para o nó raiz; (III) Comunicação do nó raiz com o servidor AWS; e (IV) Armazenamento e Organização dos Dados no DynamoDB. Esse fluxo assegura que os dados coletados sejam processualmente organizados e facilmente acessíveis para análise e tomada de decisão na gestão da fazenda.

Em uma topologia de rede em malha formada por dispositivos ESP, o roteamento de dados entre os nós é alcançado por meio de mecanismos distribuídos e auto-organizados. Cada nó dentro da rede possui a capacidade de encaminhar dados para outros nós, estabelecendo assim uma malha de comunicação na qual os nós funcionam como roteadores para a propagação do tráfego de dados. Quando um dispositivo ESP-32 precisa transmitir dados para outra entidade dentro da rede, ele realiza uma análise da tabela de roteamento interna para determinar o próximo salto a ser realizado. Esta tabela contém dados sobre os nós interconectados e a qualidade intrínseca de suas conexões. Utilizando esses dados, o dispositivo escolhe um caminho otimizado para encaminhar efetivamente os dados [19].

Assim que o dispositivo de origem dos dados estabelece o próximo passo na sequência, ele prossegue para enviar os dados ao nó selecionado. Este nó, por sua vez, ao consultar

sua própria tabela de roteamento, encaminha os dados para o próximo nó situado ao longo do caminho em direção ao destino final. Esse processo continua operacional até que os dados alcancem efetivamente o ponto de extremidade desejado. A importância do conceito de rede em malha é enfatizada neste contexto, onde cada nó participa colaborativamente da função de roteamento de dados, resultando em maior robustez e expansibilidade da rede. No caso de um nó encontrar uma falha ou ser removido da rede, os nós restantes podem discernir automaticamente rotas alternativas, garantindo assim comunicação ininterrupta.

Essa metodologia permite não apenas a coleta eficiente de dados relevantes para a agricultura de precisão, mas também oferece uma estrutura escalável e adaptável para diferentes tipos de sensores e dispositivos IoT. A integração com serviços de nuvem, como o AWS e o DynamoDB, oferece robustez e flexibilidade para o processamento e armazenamento de grandes volumes de dados.

#### A. Monitoramento e Coleta de dados

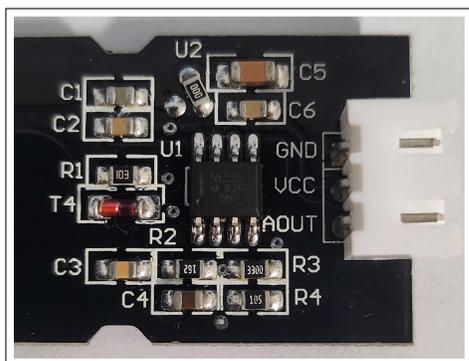
A realização da coleta de dados foi feita a partir de um sensor de umidade do solo, utilizado como prova de conceito para verificar se é viável para o microcontrolador fazer a coleta de dados direto de um sensor enquanto realiza as operações de conexão com a rede. O sensor de umidade do solo, ilustrado na Figura 2, foi escolhido para garantir precisão nos dados. Durante a pesquisa, vários sensores semelhantes foram encontrados, mas com variações significativas nas leituras, devido a diferenças em componentes como capacitores e resistores, essenciais para a estabilidade dos dados. Além disso, a compatibilidade do chip medidor é crucial, pois alguns modelos exigem mais energia, o que é problemático para microcontroladores como o ESP32, não funcionam com a tensão de 5 volts.

Na Figura 2, a posição marcada como U2 indica um componente que requer um capacitor para estabilizar a tensão e evitar oscilações. Quanto ao oscilador integrado em U1, recomenda-se o uso do circuito integrado (CI) 555C, capaz de suportar tensões de 2 a 15 volts. Em contraste, o 555M utilizado só é compatível com tensões de 5 a 15 volts, limitando sua aplicabilidade em muitos microcontroladores que operam em torno de 3.3 volts, como o ESP32. Por fim é necessário fazer um teste de continuidade entre o GND e R4, pois caso esta trilha não exista a mudança dos valores medidos é feita de maneira gradual quando realmente houver mudanças no ambiente, o que é necessário que seja uma mudança imediata durante a medição, pois isso pode interferir na coleta de dados. Para este caso ambos sensores possuem, porém é algo que tem de ser verificado.

Por fim, uma vez que esse tipo de sensor está com seus componentes validados e verificados, os dados retornados por ele são um sinal analógico que variam de 260 a 510 e são classificados na análise como mostrado na tabela 2, sendo 260 o valor onde o solo se encontra mais úmido e 510 o valor mais seco.



(a) Sensor de Umidade.



(b) Capacitores do Sensor.

Figura 2. Sensores avaliados.

Tabela I  
RELAÇÃO DOS DADOS DE UMIDADE DO SENSOR

Condição	Valor mínimo	Valor máximo
Muito Úmido	260	343
Úmido	343	427
Seco	427	510

### B. Transmissão de dados através da Rede em Malha IoT

Uma vez que os dados estão sendo coletados pelo sensor pelo microcontrolador *ESP32* eles precisam ser enviados para algum lugar. A transmissão dos dados é feita utilizando *Wi-Fi* como protocolo de comunicação da camada física em conjunto com a topologia de Malha e com protocolo da camada de aplicação é utilizado *MQTT*. A topologia de malha implementada pelo *Framework* oficial do *ESP32*<sup>1</sup>. O *ESP-IDF* funciona da seguinte forma: a construção de uma rede *Wi-Fi Mesh* no *ESP-IDF* inicia com a configuração uniforme de cada nó, incluindo ID da rede *Mesh*, configurações do roteador e *softAP*. O processo prossegue com a seleção de um nó raiz, que pode ser designado manualmente ou eleito automaticamente com base na força do sinal. Após a conexão do nó raiz ao roteador, nós ociosos próximos formam a segunda camada da rede, tornando-se nós pais intermediários. As camadas subsequentes são formadas por nós ociosos que se conectam a estes nós pais. Para evitar a superação do número máximo de camadas, os nós na camada limite tornam-se nós folha. O processo inclui também mecanismos de seleção automática ou designação do nó raiz pelo usuário e considera a influência da reinicialização assíncrona dos nós na estrutura final da rede.

<sup>1</sup><https://github.com/espressif/esp-mesh-lite>

O nó raiz na rede *Mesh* é essencial para conectar a rede interna com a externa. Mensagens dos nós da rede são enviadas primeiro ao nó raiz, que então as redireciona para o destino externo. Da mesma forma, a rede externa comunica com um nó específico enviando mensagens através do nó raiz. Este nó identifica cada ponto da rede pelo endereço MAC, tornando-se crucial armazenar esses endereços para permitir comunicação bidirecional e mapeamento eficaz da rede.

### C. Comunicação com a Nuvem

Para realizar a comunicação com *AWS*, primeiro foi necessário escolher o serviço necessário para a comunicação, sendo no caso o *IoT Hub* que é um serviço ofertado pela empresa para a realização de comunicação e gerenciamento de dispositivos IoT, dentro do serviço as principais maneiras de comunicação com o servidor são *MQTT* e *HTTP* que são ofertados, com o detalhe que o primeiro protocolo é ofertado em duas modalidades, sendo o primeiro a maneira convencional do mesmo e para o segundo uma versão dele construída com base no protocolo *Websocket*. Foi optado pelo primeiro protocolo, uma vez que ele foi projetado para ser utilizado por dispositivos IoT e trazendo mais benefícios quando comparado com o segundo. A tabela 3 mostra um comparativo entre ambos protocolos, levando em consideração as principais características em cada um que são necessárias para a viabilidade de projetos voltados para dispositivos IoT.

Tabela II  
MQTT X HTTP

Critério	MQTT	HTTP
Uso de Banda	Baixo	Alto
Consumo de Energia	Baixo	Alto
Latência	Baixa	Relativamente Alta
Modelo de Comunicação	Push	Pull
Retenção de Mensagens	Possui	Não possui
Qualidade de Serviço	Suporta diferentes níveis	Não específico (do protocolo)
Keep Alive	Possui	Não possui
Segurança	Suporta <i>TTL/SSL</i> com menor <i>overhead</i>	Suporta <i>SSL/TLS</i>

Uma vez que o protocolo foi escolhido é necessário fazer a configuração do acesso ao microcontrolador para que seja possível a comunicação com a rede, uma vez que a mesma é uma conexão via *MQTT*. Para tal, é necessário ir até o *IoT Hub* da *AWS* e cadastrar manualmente o dispositivo, para que, então, seja gerado os certificados e credenciais que devem ser embarcados em cada dispositivo para que na hora de realizar a conexão o servidor aceite o dispositivo e seja possível realizar a troca de dados. Como a rede *Mesh* do *ESP32* só possui um nó que comunica com a rede externa, foi necessário fazer este processo apenas uma vez.

### D. Armazenamento e organização dos dados

Após a configuração e estabelecimento da conexão com o servidor, tornou-se imperativo armazenar os dados coletados. No âmbito deste processo, utilizou-se o *DynamoDB*,

um serviço de banco de dados não relacional disponibilizado pela nuvem da *Amazon Web Services (AWS)*. A integração com o *DynamoDB* é realizada através da definição de uma regras específicas definidas dentro do *IoT Hub* que, neste caso, será responsável por dizer o que acontece com a mensagem recebida que deve ser tratada e inserida no banco de dados. Neste projeto em particular, as informações são enviadas para a subscrição do servidor MQTT da AWS em formato JSON.

Antes de proceder com o armazenamento destes dados no banco, a mensagem JSON sofre uma transformação essencial: a adição de um campo denominado *timestamp*. Este campo registra o momento exato do envio da mensagem, funcionando como um identificador único para a entrada no banco de dados. Este procedimento não apenas assegura a unicidade de cada registro, mas também facilita a organização e recuperação dos dados.

Posteriormente, as informações contidas no JSON, que neste caso incluem dados provenientes da leitura de um sensor de umidade do solo, são utilizadas para criar colunas individuais no banco de dados. Esta estruturação permite uma análise detalhada e eficiente dos dados coletados, essencial para a gestão eficaz de uma fazenda inteligente.

#### IV. EXPERIMENTOS

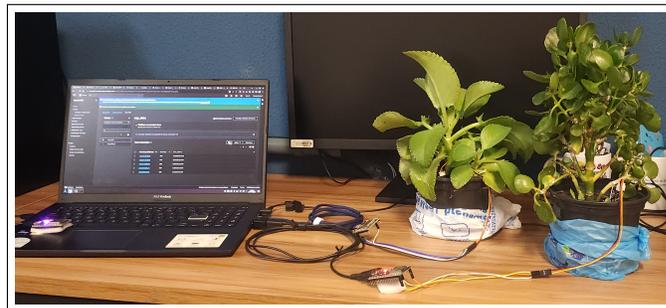
O foco principal está na avaliação da coleta de dados via rede Mesh de WiFi com a integração desses dispositivos com um servidor AWS para armazenamento de dados e a capacidade de transmissão da rede em malha IoT. Assim, a Figura 3(a) apresenta o cenário dos experimentos de coleta de dados, enquanto que a Figura 3(b) ilustra o cenário utilizado para a análise de transmissão de dados.

Foi dada atenção à funcionalidade do nó central na comunicação entre a rede Mesh interna e a conexão externa, bem como à eficiência no processo de coleta e transmissão de dados, incluindo valores de umidade do solo, identificação de MAC e timestamps, para armazenamento no banco de dados DynamoDB da AWS. Cada nó, representando uma parte distinta da fazenda, contribui para um rastreamento detalhado do ambiente agrícola, demonstrando a viabilidade e as implicações práticas do sistema proposto.

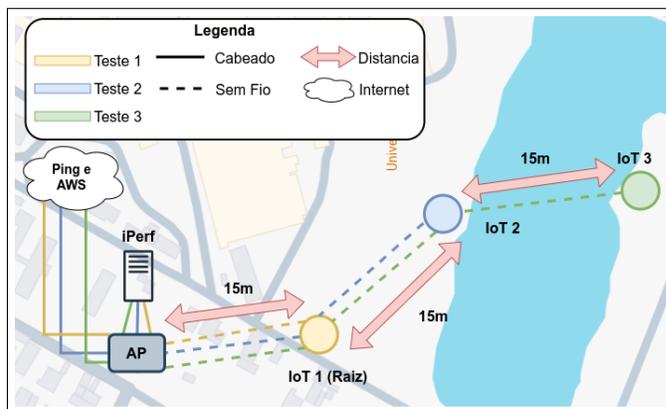
Durante os experimentos foram avaliadas as seguintes configurações de rede: variação no número de nós, sendo 1 a 3 nós com os sensores e um só para repassar os dados, diferentes intervalos de coleta de dados (30 segundos a 5 minutos, intercalando a cada 30 segundos) e diferentes distâncias com paredes e sem paredes (5 a 30 metros). A Tabela III apresentada abaixo exemplifica a configuração dos experimentos.

Para fazer a medição e validação dos dados, foram medidas as variações do tempo de resposta entre a mensagem ser enviada e sua chegada ao servidor, além da validação da qualidade dos dados medidos pelo sensor de umidade do solo e se os dados estavam chegando corretamente no servidor.

Esta configuração específica foi selecionada para os testes devido ao seu ambiente controlável, o que é essencial para a condução eficaz dos experimentos. Essa escolha facilitou o



(a) Cenário dos Experimentos de Coleta.



(b) Cenário dos Experimentos de Transmissão.

Figura 3. Cenários de Avaliação Definidos.

Tabela III  
CONFIGURAÇÕES DO EXPERIMENTO

Configuração dos dados	Detalhes
Numero de nós	1 a 3 nós (sensores) + 1 nó (Ponto de Acesso - AP)
Intervalos de coleta	30 segundos a 5 minutos (pulando entre intervalos de 30 segundos)
Distância	15 metros

monitoramento preciso e a verificação do funcionamento do sistema conforme planejado. O foco é garantir que a coleta de dados refletisse adequadamente as condições do solo e que a transmissão desses dados ocorresse sem falhas.

#### A. Resultado dos Experimentos

1) *Coleta de Dados*: A Figura 4 mostra o comportamento da umidade do solo durante um intervalo de aproximadamente seis horas. Ambas as plantas foram testadas com o mesmo estado de umidade intermediária do solo. É possível visualizar que a umidade do solo varia consideravelmente com o passar do tempo, onde a Planta 1 apresenta variação em um intervalo diferente da Planta 2.

Dentro do banco de dados na nuvem, cada planta tem sua tabela, organizando os dados com base no tópico *MQTT* de onde a mensagem foi enviada [20]. Isso facilitou a separação dos dados para análise. Além disso, o uso do endereço *MAC* do dispositivo aumentou a segurança na distinção entre diferentes plantas. Esse sistema é particularmente benéfico

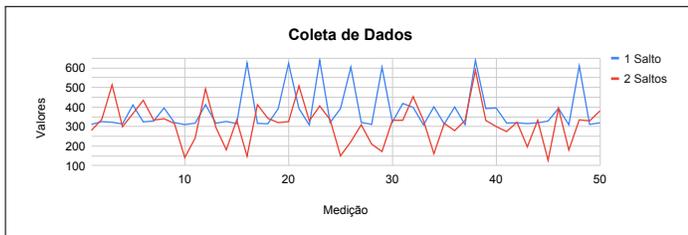


Figura 4. Coleta de dados.

para mapeamento em fazendas de grande escala. O endereço MAC também é essencial para enviar mensagens específicas aos dispositivos corretos na rede interna *Mesh*. A solução demonstrou ser eficaz para Fazendas Inteligentes e Agricultura de Precisão, mantendo a consistência na coleta de dados. Ele oferece segurança de dados, monitoramento em tempo real, e autoadaptação, reorganizando-se automaticamente para encontrar um novo nó central se necessário. Além disso, permite tomadas de decisão inteligentes através do envio de comandos para nós específicos.

#### 2) Capacidade de Transmissão em Redes IoT em Malha:

Os experimentos de transmissão realizados têm como objetivo identificar o desempenho da Rede em Malha IoT em ambientes de fazenda inteligente práticos, onde duas análises foram realizadas: (I) Taxa de transferência com iPerf, apresentado na Figura 5; e, (II) Atraso com a ferramenta Ping, ilustrado na Figura 6. Para cada caso, realizamos 3 testes: Teste 1 com um salto (Nó de Transmissão e Gateway IoT); Teste 2 com dois saltos (Nó de Transmissão, Nó Intermediário e Gateway IoT); e, Teste 3 com três saltos (Nó de Transmissão, Dois Nós Intermediários e Gateway IoT), conforme mostrado na Figura 3(b). Além disso, executamos 20 vezes para cada teste, a fim de obter a média das medições obtidas.

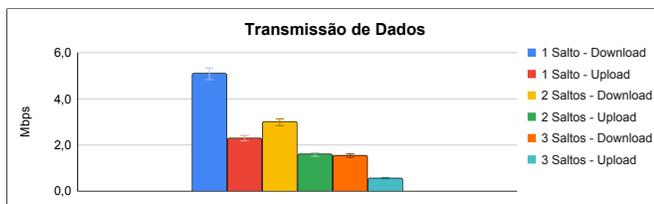


Figura 5. Resultados de Taxa de Transferência

O resultado do experimento com iPerf indica que a taxa de transferência diminuem à medida que os dados passam por mais saltos na Rede em Malha IoT. Essa perda de desempenho deve ser levada em consideração ao planejar a configuração e dimensionamento da rede. De forma mais detalhada, podemos discutir as seguintes afirmações sobre os testes: O caso de um único salto obteve uma média de 4,4 Mbits/s de taxa de transferência, onde ocorre uma queda de 53% na taxa de transferência quando um salto adicional é aplicado. Por fim, o caso de dois saltos alcançou um valor médio de 0,66 Mbits/s de taxa de transferência, representando uma queda de 60% e 82% na taxa de transferência em comparação com os testes anteriores de um e dois saltos, respectivamente.

A ferramenta Ping é um utilitário de rede usado para testar a acessibilidade e responsividade de um host ou dispositivo de rede em uma rede baseada em IP. A ferramenta Ping envia um número especificado de pacotes ICMP para o dispositivo alvo e registra o tempo necessário para cada pacote viajar até o destino e retornar. Essas informações ajudam os administradores de rede a diagnosticar problemas de conectividade de rede, medir o desempenho da rede e analisar problemas de tempo de resposta. Além disso, o ping pode revelar perda de pacotes e variações na latência, que são fatores críticos na avaliação da qualidade de uma conexão de rede. Nos experimentos realizados, o endereço alvo do ping foi definido como o endereço do website da universidade, que está hospedado na AWS Cloud, e variamos o tamanho do pacote (100 bytes, 500 bytes e 1000 bytes) para realizar uma análise mais detalhada. Estes resultados são apresentados na Figura 6.

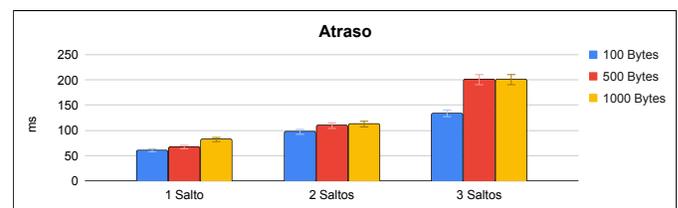


Figura 6. Resultados de Atraso

No caso de 100 Bytes, o caso de Um Salto, Dois Saltos e Três Saltos obtiveram uma média de atraso de 61 ms, 113 ms e 200 ms, respectivamente. Assim, do salto único para dois saltos, houve um aumento de 85% no atraso em comparação com o teste anterior. Da mesma forma, o caso de três saltos teve um aumento de 227% em relação ao primeiro teste. Por outro lado, o caso de 1000 Bytes ocorreu um atraso de 82 ms, 133 ms e 218 ms para os cenários de Um Salto, Dois Saltos e Três Saltos, respectivamente. Estes resultados corroboram com os experimentos anteriores onde o aumento no atraso com o aumento de saltos seguiu uma proporção semelhante.

Os resultados apresentados sublinham a complexidade inerente à transmissão de dados em uma topologia de Rede em Malha IoT, onde a variabilidade na latência é um fator crítico. Essa variabilidade é em parte consequência do dimensionamento dos pacotes de dados, que pode afetar diretamente a latência média observada ao longo da rede. A latência flutua conforme os pacotes são transmitidos por múltiplos nós, sendo influenciada por fatores como a heterogeneidade dos nós da rede, que podem possuir capacidades diferentes de processamento e comunicação, e possíveis anomalias durante as transmissões, como interferências ou congestionamento temporário em certos nós. Esse comportamento é típico em redes com múltiplos pontos de transmissão e recepção, onde as características de cada nó podem introduzir inconsistências na performance global.

Apesar dessas flutuações na latência, os testes demonstraram uma excelente confiabilidade na entrega dos pacotes, com uma taxa de perda de pacotes insignificante ao longo das avaliações realizadas. Mesmo em cenários onde os pacotes

foram encaminhados por diversos nós antes de alcançar o nó de destino, a taxa de transferência de dados se manteve alta o suficiente para suportar aplicações exigentes, como a transmissão de vídeos em 720p no YouTube e transmissões ao vivo. Esse resultado é particularmente relevante, pois indica que, apesar da latência variável, a Rede em Malha IoT pode sustentar um fluxo de dados contínuo e de alta qualidade, o que é essencial para aplicações que dependem de tempo real e alta capacidade de banda.

Outro aspecto crucial destacado é a capacidade de orquestração da conectividade dentro da rede, que não mostrou sinais de restrição, mesmo com a adição de um grande número de dispositivos e sensores. Isso sugere que a infraestrutura da rede é robusta e escalável, permitindo a implementação de tarefas e monitoramentos complexos sem comprometer a performance. Essa característica proporciona uma vantagem significativa em comparação com outros protocolos de comunicação que podem não oferecer o mesmo nível de suporte para a conectividade em larga escala, especialmente em ambientes onde a densidade de dispositivos IoT é alta. Em suma, os resultados indicam que, apesar dos desafios inerentes à latência variável, a topologia de Rede em Malha IoT estudada é altamente eficaz para suportar uma ampla gama de aplicações, tanto em termos de confiabilidade quanto de capacidade de gerenciamento de uma rede densa e heterogênea.

## V. CONCLUSÃO

Com a evolução da Internet das Coisas, é possível implantar Fazendas Inteligentes que conseguem tirar diversas vantagens para ter uma melhora não apenas na qualidade do solo das plantações, como para também ter uma melhora qualidade de alimentos e produtividade dos mesmos. Contudo, ainda existem problemas dentro da literatura que necessitam ser validados e experimentados, onde características de taxa de transmissão e conectividade entre os sensores são consideradas com foco em escalabilidade.

Nesse contexto, este trabalho apresentou uma solução que é capaz de realizar o monitoramento de maneira instantânea, organizada e adaptável de medição em fazendas inteligentes e que pode ser aplicado à diversos tipos de contexto com diversos tamanhos diferentes, podendo atender tanto a fazendas de menor porte quanto de maior porte. Inicialmente, os testes de coleta de dados do solo focaram na umidade, mas com a eficiência comprovada do sistema, é possível aumentar a quantidade de dados coletados sem afetar o desempenho. A precisão dos dados depende agora da qualidade e eficiência dos sensores utilizados. Adicionalmente, os teste de capacidade de transmissão concluíram que o uso de redes em malha IoT é viável para dar suporte a comunicação de dados para diversas aplicações de agricultura de precisão.

Em termos de conectividade o sistema apresentou um bom desempenho de maneira geral no cenário apresentado, garantindo a entrega dos dados em tempo real, com poucas perdas de dados e com a integração da AWS possibilitou a análise dos mesmos em tempo real como proposto.

Como trabalhos futuros pretende-se expandir o contexto analisado usando múltiplos tipos de sensores de coleta simultaneamente e avaliar o uso agregados desses dados com conteúdo multimídia que poderá ser base para soluções de visão computacional para fazendas inteligentes. Adicionalmente, será realizada uma expansão do uso de tecnologias de transmissão, formando um cenário de tecnologia sem fio heterogêneas e integrando as tecnologias Wifi e LoraWan com distintos nós centrais para expansão do *offloading* dos dados do ambiente monitorado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (N<sup>o</sup> 303877/2021-9 e N<sup>o</sup> 405940/2022-0) e a CAPES (N<sup>o</sup> 88887.954253/2024-00) pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- [1] E. Karunathilake, A. T. Le, S. Heo, Y. S. Chung, and S. Mansoor, "The path to smart farming: Innovations and opportunities in precision agriculture," *Agriculture*, vol. 13, no. 8, p. 1593, 2023.
- [2] C. Prakash, L. P. Singh, A. Gupta, and S. K. Lohan, "Advancements in smart farming: A comprehensive review of iot, wireless communication, sensors, and hardware for agricultural automation," *Sensors and Actuators A: Physical*, p. 114605, 2023.
- [3] A. Triantafyllou, D. C. Tsouros, P. Sarigiannidis, and S. Bibi, "An architecture model for smart farming," in *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, 2019, pp. 385–392.
- [4] W. L. Costa, M. M. Silveira, T. de Araujo, and R. L. Gomes, "Improving dds detection in iot networks through analysis of network traffic characteristics," in *2020 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, 2020, pp. 1–6.
- [5] G. Czczot, I. Rojek, and D. Mikołajewski, "Analysis of cyber security aspects of data transmission in large-scale networks based on the lorawan protocol intended for monitoring critical infrastructure sensors," *Electronics*, vol. 12, no. 11, p. 2503, 2023.
- [6] M. V. Silva, E. E. Mosca, and R. L. Gomes, "Green industrial internet of things through data compression," *International Journal of Embedded Systems*, vol. 15, no. 6, pp. 457–466, 2022.
- [7] K. Morman, D. Dexter, A. Costin, and J. Mcnair, "An iot mesh network for a smart refrigeration monitoring system," in *Proceedings of the 8th ACM/IEEE Conference on Internet of Things Design and Implementation*, 2023, pp. 472–473.
- [8] E. S. Aguiar, B. A. Pinheiro, J. F. S. Figueirêdo, E. Cerqueira, A. J. G. Abelém, and R. L. Gomes, "Trends and challenges for quality of service and quality of experience for wireless mesh networks," *Wireless Mesh Networks*, pp. 127–148, 2011.
- [9] R. L. Gomes, J. J. Júnior, A. G. Abelém, and W. M. Júnior, "Qoe and qos support on wireless mesh networks," in *Proceedings of the XV Brazilian Symposium on Multimedia and the Web*, ser. WebMedia '09. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1858477.1858479>
- [10] R. Gomes, W. Junior, E. Cerqueira, and A. Abelem, "A qoe fuzzy routing protocol for wireless mesh networks," in *Future Multimedia Networking*, S. Zeadally, E. Cerqueira, M. Curado, and M. Leszczuk, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 1–12.
- [11] V. Gaikwad, S. Shewale, A. Shikalkar, A. Shilimkar, K. Solanke, and S. Pawar, "Wireless mesh network for smart farming," in *2023 2nd International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking Technologies (ViTECoN)*. IEEE, 2023, pp. 1–5.
- [12] A. V. Turukmane, M. Pradeepa, K. S. S. Reddy, R. Suganthi, Y. M. Riyazuddin, and V. S. Tallapragada, "Smart farming using cloud-based iot data analytics," *Measurement: Sensors*, vol. 27, p. 100806, 2023.
- [13] M. M. Silveira, A. L. Portela, R. A. Menezes, M. S. Souza, D. S. Silva, M. C. Mesquita, and R. L. Gomes, "Data protection based on searchable encryption and anonymization techniques," in *NOMS 2023-2023 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, 2023, pp. 1–5.

- 
- [14] W. L. Costa, A. L. Portela, and R. L. Gomes, "Features-aware ddos detection in heterogeneous smart environments based on fog and cloud computing," *International Journal of Communication Networks and Information Security*, vol. 13, no. 3, pp. 491–498, 2021.
- [15] N. S. Sayem, S. Chowdhury, A. H. M. O. Haque, M. R. Ali, M. S. Alam, S. Ahamed, and C. K. Saha, "Iot-based smart protection system to address agro-farm security challenges in bangladesh," *Smart Agricultural Technology*, vol. 6, p. 100358, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375523001867>
- [16] M. S. H. P. C. A. R. C. S. B. G. A. S. T. P. S. J. Suji Prasad, M. Thangamilan and K. K. Sadasivuni, "An efficient lora-based smart agriculture management and monitoring system using wireless sensor networks," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 5447–5450, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01430750.2021.1953591>
- [17] E. M. Pechlivani, A. Papadimitriou, S. Pemas, G. Ntinias, and D. Tzovaras, "Iot-based agro-toolbox for soil analysis and environmental monitoring," *Micromachines*, vol. 14, no. 9, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-666X/14/9/1698>
- [18] Vineetha, N. N. Bala, V. Sudha, and D. Balakrishnan, "An enhanced automation analysis for structural algorithm in agro-industries using iot," *Engineering Proceedings*, vol. 59, no. 1, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2673-4591/59/1/118>
- [19] E. Datasheet, "Esp32s datasheet," *Espr. Syst. Datasheet*, pp. 1–60, 2021.
- [20] F. Azzedin and T. Alhazmi, "Secure data distribution architecture in iot using mqtt," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 4, p. 2515, 2023.