

Agricultura Inteligente: Viabilização por meio de Power Line Communication e Redes Mesh

Caio Bonani Carvalho¹
Luiz Fernando de Cristo Moloni¹

¹Bacharelado em Ciência e Tecnologia
Departamento de Ciência e Tecnologia
Instituto de Ciência e Tecnologia
Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)
Campus São José dos Campos

Resumo. *O trabalho apresenta um estudo sobre a possibilidade de viabilizar a Agricultura Inteligente por meio da utilização da tecnologia Power Line Communication (PLC) e das redes Mesh, no contexto da Internet das Coisas (IoT). O objetivo principal é propor um sistema inovador que abranja desde a oferta de conexão à Internet em áreas remotas até a criação de uma malha de sensores e dispositivos IoT que trabalhem em conjunto para aplicação na agricultura. Para isso, foram realizados estudos das tecnologias, seu funcionamento em casos de aplicação real e a viabilidade do sistema proposto.*

1. Introdução

O setor agropecuário é um dos principais setores da economia brasileira, responsável por cerca de 20% do PIB do país. No entanto, a produtividade das lavouras brasileiras ainda está abaixo da média mundial.

Uma das causas dessa baixa produtividade é a falta de adoção de tecnologias modernas no campo. A agricultura inteligente pode ajudar a aumentar a produtividade, eficiência e sustentabilidade das operações agrícolas, por meio da coleta e análise de dados em tempo real.

No entanto, a conexão à internet em áreas rurais ainda é um desafio, pois muitas vezes essas regiões não são atendidas por redes de banda larga tradicionais. Uma solução para esse problema é o uso da tecnologia PLC, que permite a transmissão de dados por meio de redes elétricas existentes.

A agricultura inteligente é uma tendência crescente no setor agropecuário, com o objetivo de aumentar a produtividade, eficiência e sustentabilidade das operações agrícolas. Para isso, é necessário o uso de tecnologias que permitam a coleta e análise de dados em tempo real, como sensores IoT.

A tecnologia Mesh permite a criação de redes de sensores IoT interconectadas, que podem ser usadas para coletar dados de diferentes pontos de uma fazenda. Esses dados podem ser transmitidos para a internet por meio da rede PLC.

A combinação da tecnologia PLC com a tecnologia Mesh com sensores IoT pode oferecer uma solução eficiente e econômica para levar internet a áreas rurais e apoiar a agricultura inteligente.

2. Objetivos

Como objetivo principal deste trabalho, temos: estudar, de forma separada, a utilização da rede elétrica para a transmissão de dados em áreas remotas e das redes Mesh no contexto de IoT-Agricultura Inteligente. Após esse estudo e evidenciando a total viabilidade dessas duas tecnologias para o fim que as duas foram prpostas, propor um sistema híbrido, que engloba tanto a disponibilidade de internet para as áreas remotas, quanto a malha de sensores e outros dispositivos IoT que trabalham em conjunto para constituir uma experiência *Smart Farm*.

Já no que se diz a objetivos específicos, podemos citar:

- O estudo das duas tecnologias;
- Entender o funcionamento das duas em casos de aplicações reais;
- Analisar a viabilidade delas;
- Entender a viabilidade do sistema proposto.

3. Power Line Communication

Power Line, ou redes elétricas, foram desenvolvidas, originalmente, para a transmissão de energia elétrica para os consumidores através de uma frequência entre 50-60Hz.[1] Entretanto, essas redes foram utilizadas para a transmissão de dados, com o objetivo de fornecer uma rápida comunicação entre Usinas, Subestações e Centros de Distribuição em caso de falhas, conhecidas como Power Line Communication (PLC).

Atualmente, os PLC não possuem o restrito à comunicação entre elementos de toda a rede de distribuição de energia. Existem duas abordagens para essas redes:

- **Last Inch:** Diz respeito à rede dentro de casa.
- **Last Mile:** Refere-se a toda implementação que torna viável e possibilita a transmissão de dados, por meio da rede elétrica, até as casas.

A transmissão de dados por meio de toda infraestrutura de cabos elétricos passa por algumas etapas importantes, por exemplo, é absolutamente necessário a modulação dos dados para que eles possam viajar pelo mesmo meio físico que a corrente elétrica, e uma das principais técnica de modulação/multiplexação OFDM.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing, ou OFDM, consiste na divisão da largura de banda em diferentes subportadoras ortogonais, chamadas de canais. Inicialmente, serializados, os dados passam por um conversor Serial-Paralelo, e depois, cada canal, é submetido a um processo de modulação, um dos mais utilizados é o Frequency Shift Keying (FSK), que converte os bits 0 e 1 em frequências menores e maiores, respectivamente.

Na Camada de Enlace, o PLC, sofre com a escolha de protocolos MACs, a escolha de um protocolo que o atenda de forma proveitosa tende a ser um problema, entretanto, a escolha do CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance parece ser a mais eficiente. A ideia geral desse protocolo consiste em ficar “escutando”o canal até que ele esteja parado (*away*) e, assim, aguardar respostas (CTS - *Clear to Send*) do seu *Request to Send* (RTS) enviado. O CSMA/CD consegue garantir menos retransmissões, resultando em mais *throughput*. É a escolha do padrão Homeplug, um dos padrões para utilização do PLC em casas.

Como um dos principais objetivos do trabalho é permitir que áreas remotas, que possuem dificuldade de acesso à internet, desfrutem desse acesso de uma forma simplificada, o enfoque da próxima seção é o “problema” do *Last Mile*.

4. PLC Last Mile

Existem variados tipos de tecnologias PLC¹, que se diferenciam em frequência da banda, faixa de frequência, distância de transmissão e taxas de velocidade.

A banda larga, para efeitos deste projeto, será a estudada. *Broadband*, em inglês, é a frequência de banda escolhida, pois é a que dispõe de maiores velocidades de transmissão e, paralelamente, é a frequência que as outras principais tecnologias operam.

A tecnologia de banda larga da PLC, conhecida como BPL – Broadband over Power Line, transforma a infraestrutura de rede elétrica existente em uma rota de comunicação[2]. O padrão Homeplug opera na faixa de banda larga. Como estamos falando do cenário de levar a internet até as casas, e se aproveitar do meio de transmissão já presente, é necessário conhecer estes meios.

Para que a eletricidade flua no meio (normalmente cabos) é necessário que haja uma Diferença De Potencial (DDP), ou seja, há de existir a tensão elétrica. Para cada faixa de tensão existem redes específicas²:

- **Alta Tensão:** Acima de 36kV, utilizada para o transporte da eletricidade entre longas distâncias, dos centros de geração para as subestações;
- **Média Tensão:** Entre 1kV e 36kV, utilizada para transportar a eletricidade entre as subestações às estações transformadoras;
- **Baixa Tensão:** Como o nome já diz, a tensão nessa faixa é baixa, mas os valores variam entre os países, aqui no Brasil, por exemplo, pode ser 127V ou 220V. É utilizada para transportar a eletricidade para dentro das casas.

A BPL só é viável nas redes de Média Tensão (MV – *Low Voltage*) e Baixa Tensão (LV – *Low Voltage*), visto que, nas redes de Alta Tensão (HV – *High Voltage*), os altos números de tensão podem causar interferência. Então, para propor um sistema que entregue dados através da rede elétrica utilizando o BPL, é necessário que toda a arquitetura desse sistema seja construída nas linhas MV e LV. Além disso, o BPL utiliza OFDM e faixas de frequência entre 1 a 80MHz.

4.1. Arquitetura BPL

A estrutura do BPL consiste de vários componentes, como o *Injector*, *Coupler*, *Extractor* e o Repetidor.[2].

O primeiro componente da arquitetura é o *Injector*. Consiste em um receptor, transmissor e um conversor de sinal. Ele tem a função de converter os sinais de dados recebidos para os sinais que serão enviados na linha MV. Cria uma transmissão *full-duplex*.

Muitas vezes as distâncias percorridas são muito maiores do que a distância suportada pela tecnologia, dessa forma a utilização de um **repetidor** se dá necessária. Basicamente, este componente, recebe o sinal e o retransmite, para manter sua qualidade.

¹<https://nessum.org/media/technology-blog/what-is-power-line-communication>

²<https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/smart-grids/diferenca-alta-media-baixa-tensao-eletrica>

O **Coupler** tem a função de garantir que não haja nenhum tipo de degradação dos dados quando o sinal passar pelo transformador MV-LV.

Finalmente, o **Extractor** recupera os dados do transformador LV e transporta para um modem, para que a rede possa ser utilizada, por meio de LAN ou até mesmo Wi-Fi.

5. Mesh Network

É uma alternativa de protocolo ao padrão 802.11, projetada para orientar o tráfego de dados e voz em redes que vão além das tradicionais conexões com fio ou infraestrutura *wireless*. Esse protocolo permite a criação de um sistema Wi-Fi constituído por um ou vários dispositivos (módulos) que se intercomunicam, e estabelecem uma rede unificada.

Geralmente, uma infraestrutura de rede é composta por *APs* (*Access Point* = Ponto de Acesso) e clientes, os quais se conectam a um AP específico para trafegarem na rede. Por outro lado, uma rede mesh é constituída por vários nós/roteadores, que se comportam como uma ampla e única rede. Esta configuração, permite que os clientes se conectem a qualquer um desses nós, funcionando como repetidores interconectados (cada nó se conecta a um ou mais nós), oferecendo a possibilidade de transmissão de mensagens por diferentes caminhos, e como consequência, a rede se torna altamente resiliente a falhas.

Resumidamente, uma rede mesh(“*mesh network*”, ou “*meshnet*”) é representada por uma configuração descentralizada de rede, em que um grupo de dispositivos opera coletivamente como uma única rede Wi-Fi.

Atualmente, o *Wi-Fi 5* com *dual band* (5GHz e 2,4GHz) é a tecnologia mais utilizada em roteadores mesh, apesar de existirem modelos com suporte ao *Wi-Fi 4* e *Wi-Fi 6*. O sistema mesh permite que o usuário sempre se conecte ao melhor sinal disponível, criando uma única rede para as duas frequências. Logo, os usuários podem locomover-se pelo ambiente entre diferentes pontos sem perder a conexão, sendo imperceptível a mudança de frequência e de pontos de acesso, já que a transição é realizada de maneira inteligente.

Assim que o sistema identifica a movimentação, este faz a transição entre seus nós de forma sincronizada. Além disso, também é realizada, de forma instantânea, a análise das diversas possíveis rotas de fluxo de informações. Este processo define sempre o melhor caminho - o mais rápido e o que possui menor perda de pacotes - para chegar até o cliente.

Nos protocolos de roteamento em que está o segredo do funcionamento deste sistema. Estes realizam uma varredura das diversas possibilidades de rotas de fluxo de dados, com base em uma tabela dinâmica, selecionam a rota mais eficiente que será implementado para chegar ao seu destino. A seleção é baseada no caminho que possui a maior rapidez, com menor perda de pacotes, ou o acesso mais rápido à Internet, com menor tráfego de usuários.

Vale ressaltar que esta varredura é feita diversas vezes por segundo ou por intervalos de tempo, sendo transparente ao usuário, mesmo quando ocorre alteração de rota de acesso aos gateways, que são os nós que possuem acesso direto à internet.

Como exemplo de necessidade alteração de rota de acesso aos gateways ocorre quando o nó que estava sendo utilizado para esta finalidade pára de funcionar, então o sis-

tema se rearranja automaticamente, desviando o nó defeituoso, sem que o usuário perceba ou perca a conexão.

Outra importante característica das redes mesh é o roaming, também conhecido como "fast handoff", que permite o usuário transitar entre os nós da rede sem perder a conexão no momento da troca. Adquirindo como consequência prática a mobilidade geográfica que o sistema permite.

O maior problema que as redes mesh enfrentam atualmente é a sobrecarga de informações referentes ao roteamento que deve ser transportada junto com os pacotes de dados. Essa situação é chamada de "*overhead*" e leva a uma redução no desempenho das redes.

A realização de saltos em uma rede acarreta em um custo computacional, e à medida em que mais saltos são executados, o custo total da comunicação aumenta. Na prática, não existe um limite para a quantidade de saltos que uma informação pode realizar em uma rede mesh. No entanto, observa-se uma degradação de desempenho que se intensifica à medida que o número de saltos aumenta.

Essencialmente, existem duas abordagens de desenvolvimento de protocolos mesh: reativa e pró-ativa. Na abordagem reativa, o sistema reage apenas quando surge um evento que exige ajuste no roteamento. Já na abordagem pró-ativa, buscas periódicas são realizadas e se antecipa aos problemas, respondendo de maneira mais rápida. Como resultado, obtemos uma maior eficiência, porém o sistema pró-ativo também apresenta um *overhead* maior.

Com o objetivo de facilitar a compreensão das duas abordagens que foram recentemente apresentadas, segue um breve resumo:

- Protocolos Reativos:
 - Descubrem as rotas apenas quando necessário, ou seja, se baseiam na demanda
 - ***DSR (Dynamic Source Routing), AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing)***
 - Prós: Baixo *overhead* de roteamento
 - Contras: Latência extra para se descobrir novas rotas
- Protocolos Pró-Ativos
 - Determinam as rotas independentemente da criação de fluxo de tráfego, buscam novas rotas periodicamente
 - ***OLSR (Optimized Link State Routing), DSDV (Destination Sequenced Distance Vector)***
 - Prós: Baixa Latência na descoberta de novas rotas
 - Contras: Alto *overhead* para se manter as informações de roteamento, principalmente quando alterações na topologia ocorrem constantemente.

5.1. Padrões e Protocolos Adotados

Para que fosse possível a implementação das redes mesh de forma eficaz, foi necessário o desenvolvimento de alguns padrões e protocolos. Estes garantem a operabilidade da rede.

- **IEEE 802.11s** : É uma extensão do padrão **IEEE 802.11 (Wi-Fi)** para oferecer suporte a redes mesh. Basicamente, este padrão define como os nós se intercomunicam e estabelece a topologia de rede auto-organizada, permitindo que os dispositivos sem fio configurem uma topologia de rede de forma autônoma, dispensando a necessidade de um planejamento prévio. Na configuração de uma rede mesh, os dispositivos possuem a capacidade de se comunicar entre si, determinando a rota mais eficiente para o tráfego de dados, garantindo assim resiliência à rede contra falhas. No entanto, o 802.11s depende de outros padrões de comunicação sem fio, como 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac ou 802.11ax, para o transporte efetivo do tráfego. Por fim, é crucial o uso de um ou mais protocolos de roteamento adequados à topologia física da rede.
- **Protocolos de Roteamento** : Para que ocorra a determinação de rotas, em que os pacotes devem trafegar em uma rede mesh, faz-se necessário o uso de protocolos de roteamento. Atualmente, existem diversos destes protocolos, porém serão abordados apenas dois: **B.A.T.M.A.N (Better Approach To Mobile Ad-Hoc Networking)**, **OLSR (Optimized Link State Routing)**
 - **OLSR**: É um protocolo de roteamento proativo, que utiliza mensagens de hello e *TC (topology control)* para descobrir e disseminar informações por toda a rede. Os nós individuais utilizam as informações topológicas para determinar os destinos do próximo salto para todos os nós da rede, utilizando os caminhos de encaminhamento de salto mais curtos possível. Além disso, o caminho de encaminhamento não é compartilhado entre todos os nós. Portanto, este protocolo, realiza o gerenciamento do tráfego de pacotes de controle entre os nós, sempre buscando o caminho mais curto.
 - **B.A.T.M.A.N** : Pretende substituir o **OLSR**, o principal ponto é a descentralização do conhecimento sobre a rota mais eficiente na rede, assegurando que nenhum nó detenha todas as informações. Essa técnica elimina a necessidade de disseminar informações sobre mudanças na rede para todos os nós. Cada nó individualmente armazena apenas informações sobre a origem dos dados e os retransmite. Os dados circulam entre os nós, formando rotas dinâmicas para cada pacote, resultando em uma rede de inteligência coletiva. Além disso, também existe o acompanhamento de novos nós, e informa aos seus vizinhos sobre sua existência. O protocolo não tenta estabelecer a rota completa, em vez disso, utilizando as mensagens do originador, foca apenas no primeiro passo do pacote na direção certa. Cada nó percebe e retém apenas as informações sobre o melhor próximo salto em direção aos demais nós.
- **IEEE 802.15.5** : Um padrão da IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) com enfoque para redes mesh de baixo consumo de energia, usualmente usadas em redes de sensores sem fio com recursos limitados, e para automação residencial. Vale ressaltar, que ao associar endereços lógicos à configuração da rede, o 802.15.5 elimina a necessidade de descoberta de rotas, reduzindo a latência inicial de identificação de rotas, economizando espaço de armazenamento e minimizando a sobrecarga de comunicação, o que contribui para a eficiência energética.
- **6LoWPAN** : É um padrão que foi desenvolvido com o objetivo de permitir que dispositivos compatíveis com o IPv6 se comuniquem em redes mesh de baixa potência

6. Redes Mesh e IoT

Um dispositivo IoT necessita de quatro itens[3]:

1. **Unidade(s) de Processamento/Memória:** Inclui memória interna, microcontrolador e conversor analógico-digital. Nesse tipo de dispositivo, os microcontroladores geralmente não possuem alta capacidade computacional e são frequentemente acompanhados de memória externa. A memória interna é usada para armazenar dados e programas. O conversor analógico-digital é essencial para receber sinais de sensores;
2. **Unidade(s) de Comunicação:** Estabelece um canal de comunicação, seja com ou sem fio. Comumente, os meios sem fio têm limitações devido à sua baixa potência, o que reduz o alcance do dispositivo;
3. **Fonte de Energia:** Responsável por fornecer energia a todos os componentes do dispositivo. Isso pode ser feito por meio de uma conexão à rede elétrica, baterias ou até mesmo utilizando fontes alternativas, como energia solar;
4. **Unidade(s) de Sensor(es)/Atuador(es):** Permitem o monitoramento de um ambiente. Sensores podem medir grandezas físicas como temperatura, umidade e luminosidade. Atuadores são dispositivos que executam ações com base em instruções manuais, elétricas ou mecânicas.

Dessa forma, é perceptível que os sensores devem, obrigatoriamente, possuir acesso à internet. Para diminuir a dependência de outras fontes, as redes Mesh são uma escolha inteligente.

A estrutura de uma rede Mesh consiste em basicamente dois tipos de nós[4]:

- **Roteador Mesh:** Este dispositivo incorpora capacidades de roteador, gateway e bridge, permitindo a comunicação com diversos tipos de redes por meio das interfaces disponíveis, como a integração com redes cabeadas. Para desempenhar essas funções, é necessário um maior poder de processamento, o que geralmente leva à designação de um computador para essa finalidade.
- **Cliente Mesh:** Também conhecido como "nó", este dispositivo pode enviar pacotes para outros membros da rede, mas não tem a capacidade de desempenhar funções típicas de roteadores Mesh, como bridge ou gateway, devido à presença de uma única interface de rede.

Além disso, uma das principais características da rede Mesh é sua capacidade de compatibilidade e interoperabilidade com outras redes sem fio, como o ZigBee³ e LoRa⁴. A flexibilidade proporcionada pela rede Mesh permite que dispositivos IoT se comuniquem eficientemente com uma variedade de padrões, possibilitando a integração em ecossistemas heterogêneos.

Ao adotar uma arquitetura de rede Mesh, os dispositivos IoT podem formar uma malha autossustentável, onde cada nó atua como um ponto de roteamento para os dados, criando assim uma rede distribuída e resiliente. A principal vantagem da utilização de

³https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2017_2/802154/zigbee.html

⁴<https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2018-1/trabalhos-vf/lor/>

redes Mesh na IoT é a capacidade de estender o alcance da comunicação. Os dispositivos podem se comunicar entre si, formando uma cadeia de transmissão de dados que ultrapassa as limitações de distância. Isso é especialmente crucial em ambientes extensos ou complexos, nos quais a infraestrutura de comunicação tradicional pode ser inadequada. Além disso, a redundância na malha Mesh aumenta a confiabilidade da comunicação, uma vez que a falha de um nó específico não compromete a conectividade geral.

7. Agricultura Inteligente

A agricultura, atualmente, é uma das principais áreas que se aproveita desse universo[5]. Os objetos do IoT tem um papel importante, integrando poder computacional com sensores, temos uma coleta de dados servindo como munição para mecanismos de tomadas de decisões mais inteligentes[6], promovendo melhoria, precisão e automação dos atuais processos produtivos.[7]

A produção em ambientes controlados já é uma necessidade há mais de um século[8], estufas agrícolas, por exemplo, conseguem aumentar a produtividade, visto que, proporcionam um maior controle dos fatores necessários para seu crescimento. Nestes ambientes, o controle de características como exaustão e ventilação, temperatura, umidade e luminosidade se dão necessários para que haja essa maior produtividade esperada.[8]

Entretanto, realizar todo esse controle de forma manual se torna um processo difícil, à medida que a área de produção aumenta. Monitorar os sensores e aplicar ajustes necessários para manter os níveis desejados é um procedimento que está sendo cada vez mais automatizado, visto que o conceito de Internet das Coisas viabiliza esse gerenciamento.

Mas como podemos garantir o funcionamento de uma estrutura de sensores e outros objetos IoT em uma área maior? Quando falamos de ambientes controlados pequenos, este, talvez, não seja um problema recorrente, entretanto, quando pensamos em áreas de colheitas de vários hectares isso se torna uma preocupação, como assegurar a comunicação de todos os objetos?

As redes Mesh entram nesta lacuna, com cada sensor sendo um nó da malha, e comunicando entre si, cria-se uma rede que não depende de outros meios para se munir da rede necessária.

8. Proposta Final

Em 2022, mais de 70% de casas localizadas nas áreas rurais não possuíam acesso à internet[9], no Brasil. Uma das principais causas é a infraestrutura, criar toda uma infraestrutura de rede dedicada para a internet, para atravessar áreas de milhares de quilômetros é, muitas vezes, inviável. Em um estudo de 2018[2], na Malásia, 1km de fibra ótica na região de Sarawak custava 30.000 Ringgits malaaios – que equivale a, atualmente, 31.332 reais.

Se a criação de uma nova infraestrutura é um grande problema, aproveitar uma estrutura existente é uma forma de contornar este problema. Sarawak, na Malásia[2], áreas no Norte dos Estados Unidos[10] e Larissa, na Grécia[11], são alguns dos lugares onde a tecnologia do PLC/BPL foram implementados para trazer internet que antes não chegava.

Para a criação de uma malha de sensores que auxiliam na agricultura (chamada de Agricultura Inteligente) e necessitam de conexão com internet para se comunicarem entre si e externamente. É proposto a utilização de infraestrutura BPL para entregar a internet necessária a essas áreas remotas, para serem utilizadas em conjunto com a tecnologia Mesh e, dessa forma, suprir a necessidade de rede dos sensores IoT.

Utilizando-se da rede de internet provida pelo sistema PLC, uma malha de rede Mesh conectada a uma rede sensores seria utilizada para monitorar diferentes variáveis importantes do processo de produção agrícola.

Já existem cenários onde as redes Mesh são utilizadas em conjunto com dispositivos IoT, utilizando o protocolo ZigBee, como é o caso do SoilNet, uma rede de sensores de umidade do solo que utiliza o ZigBee.[12]

Além da integração dos sensores com a rede Mesh, outra tecnologia seria o LoRA e o LoRaMESH⁵, que permite o aumento de distância entre os nós graças a tecnologia do LoRa, e suas maiores coberturas.[13][14]

9. Considerações finais

Observando, de forma separada para cada tecnologia, os estudos já realizados, pode se observar sucesso na aplicação das tecnologias PLC/BPL e Mesh para o que se propunham. Uma sistema híbrido, inclusive, de BPL com Wi-Fi, já foi concebido[11], então é possível assegurar que a uma malha composta de roteadores Mesh que compartilham uma rede de internet proveniente de um sistema de Power Line Communication é totalmente viável.

Referências

- [1] Anindya Majumder et al. Power line communications. *IEEE potentials*, 23(4):4–8, 2004.
- [2] B Nancy B, CW Gary Loh CW, et al. A case study: Broadband over powerline for rural area deployment in sarawak. 2021.
- [3] Bruno P Santos, Lucas A Silva, CSFS Celes, João B Borges, Bruna S Peres Neto, Marcos Augusto M Vieira, Luiz Filipe M Vieira, Olga N Goussevskaja, and A Loureiro. Internet das coisas: da teoria à prática. *Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 31:16, 2016.
- [4] Rafael Augusto Marques Secco. Desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio em topologia mesh utilizando dispositivos iot. B.S. thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- [5] André Marcos Silva. Agricultura inteligente. *CIMATech*, 1(5), 2018.
- [6] Jerry Kaplan. Artificial intelligence: Think again. *Communications of the ACM*, 60(1):36–38, 2016.
- [7] André Marcos Silva and AAE ARAGÃO. Ambiente facilitador de decisões agrícolas para produtores angolanos baseado em informações geográficas e técnicas de business intelligence. In *XSBI Agro, Congresso Brasileiro de Agro informática e III SBI Agro IC*, 2015.

⁵<https://www.radioenge.com.br/produto/modulo-loramesh/>

- [8] Gabriel Henrique Testa. Automatização de estufas para cultivo controlado utilizando redes mesh. B.S. thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- [9] Agência Brasil. Cerca de 71% dos domicílios rurais têm acesso à internet no brasil. *Rádio Agência Nacional*, junho 2022.
- [10] Badri Varadarajan, Il Han Kim, Anand Dabak, David Rieken, and Gordon Gregg. Empirical measurements of the low-frequency power-line communications channel in rural north america. In *2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, pages 463–467. IEEE, 2011.
- [11] Angeliki M Sarafi, Georgios I Tsiropoulos, and Panayotis G Cottis. Hybrid wireless-broadband over power lines: A promising broadband solution in rural areas. *IEEE Communications Magazine*, 47(11):140–147, 2009.
- [12] Dugar Anurag, Siuli Roy, and Somprakash Bandyopadhyay. Agro-sense: Precision agriculture using sensor-based wireless mesh networks. In *2008 first itu-t kaleidoscope academic conference-innovations in ngn: Future network and services*, pages 383–388. IEEE, 2008.
- [13] VINÍCIUS ÁVILA EICHENBERG and FELIPE DE SOUZA MARQUES. Desenvolvimento e integração de sistemas eletrônicos para a agricultura de precisão utilizando a tecnologia lora.
- [14] Douglas de Farias Medeiros et al. Implementação e análise de protocolos de roteamento para redes mesh sem fio lora. 2021.
- [15] Alexandre Guitton, Jarbas Lopes Cardoso Jr, Silvio E Barbin, Frédéric Andrès, and Kawtrakul Asanee. Inteligência coletiva na antecipação de alertas de doenças na agricultura. In *Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP)*, 2015.
- [16] Tiago Costa, Luís Santos, João MLP Caldeira, Vasco NGJ Soares, and Pedro D Gaspar. Performance assessment of a wireless mesh network for post-harvest food quality traceability of fruit products: a case study. *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, 30(1):66–77, 2023.
- [17] Emerson Navarro, Nuno Costa, and António Pereira. A systematic review of iot solutions for smart farming. *Sensors*, 20(15):4231, 2020.