

# IoT no Agronegócio

*IoT, Conectividade e a Quarta  
Revolução Agrícola*

— AUTOR —

**WALDO RUSSO**

# Índice

## 1. Introdução

## 2. A Pressão Agrícola e Objetivos do Trabalho

## 3. Principais Aspectos do Ambiente Agro e Impacto Esperado pelo Emprego de IoT

3.1. Semeadura

3.2. Manutenção das Plantações

3.3. Colheita

3.4. Armazenamento

3.5. Distribuição de Produtos

## 4. Novas Aplicações Viabilizadas por IoT

4.1. Agricultura de Precisão

4.1.1. Mapeamento do Solo

4.1.2. Aplicação variável de Insumo (VRA)

4.2. Previsão Climática e Gestão de Riscos

4.2.1. Estações Meteorológicas Inteligentes

4.2.2. Modelagem Climática

4.3. Robótica e Automação

4.3.1. Tratores Autônomos

4.3.2. Robôs de Colheita

## 5. Sustentabilidade e Conservação de Recursos

5.1. Gestão de Resíduos

## 6. Integração com Blockchain

6.1. Rastreabilidade de Produtos

6.2. Contratos Inteligentes

## 7. Arquitetura de IoT na Agricultura Inteligente

7.1. Visão Geral

7.2. Camada 1 - Dispositivos de IoT (Sensores/Atuadores e Gateway)

7.2.1. Arquitetura Padrão dos Dispositivos IoT

7.2.2. Arquitetura em Camadas dos Protocolos dos Dispositivos de IoT

7.2.3. Sensores: Tipos e Aplicações

7.2.3.1. Sensores de Solo

- 7.2.3.2. Sensores Meteorológicos
- 7.2.3.3. Sensores de Saúde nas Culturas
- 7.2.3.4. Sensores de Praga nas Lavouras
- 7.2.3.5. Sensores Ambientais
- 7.2.3.6. Sensores de Máquinas
- 7.2.3.7. Sensores de Localização (GNSS)

#### 7.2.4. Atuadores

- 7.2.4.1. Sistemas de Irrigação
- 7.2.4.2. Sistemas de Fertilização
- 7.2.4.3. Sistemas de Controle de Pragas
- 7.2.4.4. Sistemas de Controle de Clima
- 7.2.4.5. Robôs Agrícolas

### 7.3. Camada 2 – Redes de Comunicações em IoT

#### 7.3.1. Introdução

#### 7.3.2. Tecnologias LAN para Conectividade Sensor ⇔ Gateway

- 7.3.2.1. Tecnologias Celulares Modernas(3GPP):
- 7.3.2.2. Tecnologias Celulares Legadas (3GPP):
- 7.3.2.3. Tecnologias Não-Celulares LPWAN (*Low Power Wide Area Networks*)
- 7.3.2.4. Comparação entre as principais tecnologias LPWAN
- 7.3.2.5. Considerações Finais

#### 7.3.3. Gateway IoT

#### 7.3.4. Rede de Comunicações de Longa Distância (Gateways/Sensores ⇔ Rede de Serviços)

- 7.3.4.1. Redes Terrestres
- 7.3.4.2. Redes Não Terrestres (NTN – Non Terrestrial Networks)
  - 7.3.4.2.1. Introdução
  - 7.3.4.2.2. As Releases 3GPP que definem as redes NTN
  - 7.3.4.2.3. Inovações Recentes em Tecnologia de Satélites para IoT
  - 7.3.4.2.4. HAPS (High Altitude Platform Stations)
  - 7.3.4.2.5. Resumo de Conexões NTN

#### 7.3.5. Infraestrutura de Análise de Dados (Serviços – Camada 4)

## 8. Desafios e Soluções

- 8.1. Desafios técnicos (ex.: conectividade, escalabilidade)
- 8.2. Barreiras econômicas e financeiras
- 8.3. Preocupações regulatórias e de privacidade
- 8.4. Soluções e direções futuras

## **9. Estudos de Caso e Exemplos**

## **10. Conclusão**

### 10.1. Revolução Tecnológica no Agronegócio

10.1.1. Agricultura Digital

10.1.2. Agricultura Inteligente

10.1.3. Agricultura de Precisão

## **11. Resumo Final**

## **12. Bibliografia**

## 1 Introdução <sup>1</sup>

Acredita-se que a agricultura - o cultivo de plantas e animais domésticos - tenha começado efetivamente há cerca de 12.000 anos no chamado Crescente Fértil do Oriente Médio. O manejo e a colheita de plantas provavelmente começaram muito antes, mas as técnicas desenvolvidas nesta região permitiram que os humanos formassem grandes assentamentos que se desenvolveram nos complexos centros urbanos que hoje definem nossa espécie. Esta foi a *primeira de uma série de revoluções agrícolas*.

A crescente sofisticação da agricultura nos séculos seguintes sustentou uma população em constante crescimento. *Uma segunda revolução agrícola* começou na Grã-Bretanha no século XVII e incluiu a introdução de novas técnicas de irrigação, fertilizantes e meios de transporte de produtos agrícolas. E o colapso populacional previsto para o século XX foi evitado pela Revolução Verde ou *terceira revolução agrícola*, iniciada na década de 1940, que viu enormes aumentos na produção de cultivos devido a novos fertilizantes e pesticidas.

Agora, *uma quarta revolução* está acontecendo, alavancada por avanços tecnológicos como a implantação da **Internet das Coisas (IoT)**. IoT consiste em um ecossistema de dispositivos digitais que coletam e transmitem um volume significativo e diverso de informações), tecnologias avançadas de transmissão, armazenagem e análise de grandes quantidades de dados (a denominada "Big Data"<sup>2</sup>) que, apoiado pela inteligência artificial, estão criando eficiências que provavelmente mudarão novamente de forma fundamental a prática que permitiu que nossa espécie dominasse o planeta.

Os principais benefícios do emprego de IoT no agronegócio incluem:

- **Agricultura de Precisão:** Sensores podem monitorar condições do solo, clima, saúde das culturas etc. em tempo real, permitindo aos agricultores tomar decisões baseadas em dados para otimizar o uso de recursos e maximizar a produtividade.
- **Eficiente Uso de Recursos:** Sistemas de irrigação e pulverização inteligentes podem analisar dados de umidade e propriedades químicas do solo e condições ambientais para aplicação hídrica de forma precisa, reduzindo o desperdício.
- **Detecção Precoce de Problemas:** Monitoramento contínuo permite a identificação precoce de problemas como pragas, doenças ou estresse hídrico, permitindo intervenções oportunas.
- **Automação de Processos:** Máquinas agrícolas conectadas e robôs podem realizar tarefas como plantio, pulverização e colheita de forma autônoma e eficiente. Otimização da Cadeia de Suprimentos: rastreamento de sensores de qualidade podem monitorar produtos agrícolas desde a fazenda até o consumidor, reduzindo perdas e melhorando a eficiência logística.
- **Tomada de Decisão Baseada em Dados:** A análise de big data pode revelar insights sobre padrões de crescimento das culturas, rendimentos esperados, demanda do mercado etc., permitindo um planejamento e uma tomada de decisão mais informados.

No geral, IoT tem um enorme potencial para transformar a agricultura, aumentando a produtividade, a eficiência dos recursos e a sustentabilidade para atender às crescentes demandas alimentares globais.

No entanto, apesar dos muitos benefícios, a adoção da IoT na agricultura também apresenta desafios como alto custo inicial, problemas de conectividade em áreas remotas, interoperabilidade entre sistemas e preocupações com segurança e privacidade dos dados.

## 2 A pressão Agrícola e Objetivos do Trabalho

O crescimento previsto para a população mundial é de 2 bilhões de pessoas nos próximos 60 anos, dos atuais 8,2 bilhões em 2024 para o pico de 10,3 bilhões em meados da década de 2080, quando a tendência será revertida, prevendo-se uma queda para 10,2 bilhões no final deste

<sup>1</sup> <https://www.informationweek.com/machine-learning-ai/ai-and-iot-are-reshaping-agriculture;>

<sup>2</sup> O termo big data se refere a dados tão volumosos e complexos que não são mais processáveis por métodos tradicionais.  
<https://www.redhat.com/pt-br/topics/big-data;>

século.<sup>3</sup> Este fato causa uma pressão constante sobre a demanda por produtos agrícolas, agravada pelo declínio de áreas agrícolas (na disputa pela extensão de áreas urbanas) e de recursos naturais, além do aumento crescente de fenômenos imprevisíveis da natureza, tais como o aquecimento global, salinização e enchentes. Tudo isto contribui para tornar a segurança alimentar o mais inquietante problema para todas as nações do mundo.

Sumariando, a agricultura moderna enfrenta inúmeros desafios, incluindo a necessidade de alimentar uma população global crescente, gerenciar restrições de recursos e se adaptar às mudanças climáticas.

A solução é buscar o aumento da eficiência no trato agrícola, através novas soluções e processos viabilizados pela introdução de novas tecnologias no setor agrícola.

Na agricultura, IoT está revolucionando a cultura moderna ao viabilizar a coleta de grandes quantidades de dados, os quais, uma vez apropriadamente analisados, fornecem informações úteis, as quais são aplicadas para otimizar várias operações agrícolas. Através do uso de dispositivos conectados como sensores e atuadores, análise de dados e automação, a IoT está permitindo práticas agrícolas mais inteligentes, eficientes e sustentáveis, através da oferta de soluções inovadoras para desafios elencados acima, permitindo monitoramento em tempo real, controle preciso e tomada de decisão baseada em dados ao longo de toda a cadeia de valor agrícola.

O objetivo deste trabalho é explorar o impacto da IoT no agrobusiness, com foco em aspectos-chave do ambiente agro, como semeadura, manutenção de plantações, colheita, armazenamento e distribuição de produtos. Vamos analisar como a IoT e a análise de dados podem afetar positivamente essas áreas e examinar os aspectos técnicos, incluindo tecnologias de comunicação e infraestrutura de processamento de dados, que sustentam esses avanços.

Ao aproveitar as tecnologias IoT, os agricultores podem otimizar os processos de semeadura, melhorar a manutenção das plantações, aumentar a eficiência da colheita, garantir condições de armazenamento ideais e agilizar a distribuição de produtos. Este trabalho fornecerá uma visão abrangente dessas aplicações, apoiada por estudos de caso e exemplos, e discutirá os desafios e soluções associadas à implementação da IoT na agricultura.

## **3 Principais Aspectos do Ambiente Agro e Impacto Esperado pelo Emprego de IoT**

### **3.1 Semeadura**

A precisão na semeadura é crucial para garantir uma boa colheita. Tradicionalmente, a semeadura dependia da experiência do agricultor e de métodos manuais, que podiam ser imprecisos e ineficientes. Com a IoT, sensores de solo e drones podem analisar a composição do solo, a umidade e outros fatores ambientais para determinar as melhores áreas e profundidades para plantar sementes. Máquinas de semeadura equipadas com IoT podem então plantar as sementes com precisão milimétrica, otimizando o uso de sementes e aumentando a produtividade.

### **3.2 Manutenção das Plantações**

Manter as plantações saudáveis é um desafio constante. Sensores IoT podem monitorar continuamente a umidade do solo, os níveis de nutrientes e detectar a presença de pragas e doenças. Sistemas de irrigação inteligentes, conectados a esses sensores, podem fornecer a quantidade exata de água necessária, evitando o desperdício e garantindo que as plantas recebam a quantidade ideal de água. Além disso, drones equipados com câmeras e sensores podem sobrevoar as plantações, identificando áreas que necessitam de atenção especial, como infestação de pragas ou doenças.

### **3.3 Colheita**

A colheita é um dos momentos mais críticos na agricultura. Determinar o momento ideal para colher pode ser a diferença entre um produto de alta qualidade e perdas significativas. Sensores IoT podem monitorar fatores como maturação das plantas, níveis de umidade e condições

<sup>3</sup> <https://news.un.org/pt/story/2024/07/1834411>

climáticas para ajudar os agricultores a decidir o momento exato para a colheita. Máquinas de colheita automatizadas, guiadas por dados IoT, podem colher os produtos de maneira eficiente e com menos desperdício.

### **3.4 Armazenamento**

Após a colheita, garantir que os produtos sejam armazenados nas condições corretas é fundamental para preservar sua qualidade. Sensores IoT podem monitorar a temperatura, umidade e níveis de gás em armazéns e silos, ajustando automaticamente as condições para evitar deterioração. Essas tecnologias ajudam a reduzir perdas pós-colheita e garantir que os produtos cheguem ao mercado em perfeitas condições.

### **3.5 Distribuição de Produtos**

A logística e a distribuição de produtos agrícolas podem ser otimizadas com a IoT. Sensores e dispositivos de rastreamento permitem monitorar a localização e as condições dos produtos durante o transporte. Isso garante que eles sejam entregues frescos e de alta qualidade. Além disso, a IoT pode ajudar na coordenação com revendedores e cooperativas, garantindo que a oferta atenda à demanda de maneira eficiente.

## **4 Novas Aplicações Viabilizadas por IoT**

### **4.1 Agricultura de Precisão**

A agricultura de precisão é um dos principais beneficiários da IoT. Esta abordagem envolve o uso de tecnologias avançadas para monitorar e gerenciar dados agrícolas em tempo real, permitindo decisões mais informadas e precisas.

#### **4.1.1 Mapeamento do Solo**

Sensores IoT são usados para criar mapas detalhados da composição do solo. Informações como pH, níveis de nutrientes e textura do solo são coletadas e analisadas para determinar as melhores práticas de cultivo. Essa precisão ajuda a otimizar a aplicação de fertilizantes e a melhorar a saúde das plantas.

#### **4.1.2 A aplicação variável de insumos (VRA)**

A aplicação variável de insumos (VRA) utiliza dados de sensores IoT para ajustar a quantidade de fertilizantes, pesticidas e herbicidas aplicados em diferentes partes do campo. Isso não apenas reduz o uso excessivo de produtos químicos, mas também melhora a saúde das plantas e a sustentabilidade ambiental.

### **4.2 Previsão Climática e Gestão de Riscos**

Com a IoT, os agricultores podem acessar previsões climáticas detalhadas e em tempo real, permitindo uma melhor gestão dos riscos associados às condições climáticas adversas.

#### **4.2.1 Estações Meteorológicas Inteligentes**

Estações meteorológicas equipadas com sensores IoT podem monitorar temperatura, umidade, velocidade do vento e precipitação em tempo real. Essas informações são cruciais para planejar a irrigação, semeadura e colheita, e para tomar medidas preventivas contra eventos climáticos extremos.

#### **4.2.2 Modelagem Climática**

A integração de dados climáticos com modelos preditivos avançados permite que os agricultores antecipem eventos como geadas, tempestades ou secas. Isso possibilita uma resposta proativa, como a proteção de culturas vulneráveis ou o ajuste de cronogramas de plantio.

#### **4.2.3 Robótica e Automação**

A combinação de IoT com robótica está revolucionando as operações agrícolas, tornando-as mais eficientes e menos dependentes de mão-de-obra manual.

#### 4.2.4 Tratores Autônomos

Tratores e outras máquinas agrícolas autônomas equipadas com sensores IoT podem realizar tarefas como aragem, plantio e colheita com precisão e eficiência. Esses veículos são capazes de operar 24 horas por dia, aumentando significativamente a produtividade.

#### 4.2.5 Robôs de Colheita

Robôs de colheita são projetados para colher frutas e vegetais com delicadeza, minimizando danos e perdas. Equipados com visão computacional e sensores de proximidade, esses robôs podem identificar produtos maduros e colhê-los de maneira eficiente.

## 5 Sustentabilidade e Conservação de Recursos

A sustentabilidade é uma preocupação crescente na agricultura. A IoT pode ajudar a promover práticas agrícolas mais sustentáveis e a conservar recursos naturais.

### 5.1 Irrigação Inteligente

Sistemas de irrigação inteligente usam sensores de umidade do solo e dados climáticos para ajustar automaticamente a quantidade de água fornecida às plantas. Isso reduz o desperdício de água e garante que as plantas recebam a quantidade ideal de irrigação.

### 5.2 Gestão de Resíduos

Sensores IoT podem monitorar a produção de resíduos agrícolas e ajudar a otimizar processos de compostagem e reciclagem. Além disso, sistemas de monitoramento de resíduos podem alertar os agricultores sobre práticas de descarte inadequadas, promovendo uma gestão mais sustentável dos resíduos.

## 6 Integração com Blockchain

A integração da IoT com blockchain traz transparência e rastreabilidade para a cadeia de suprimentos agrícolas.

### 6.1 Rastreabilidade de Produtos

Com a IoT, cada etapa do ciclo de vida de um produto agrícola pode ser registrada em um blockchain. Isso inclui dados de semeadura, crescimento, colheita, armazenamento e transporte. A rastreabilidade completa ajuda a garantir a qualidade e a segurança dos alimentos, além de fortalecer a confiança dos consumidores.

### 6.2 Contratos Inteligentes

Contratos inteligentes, executados em uma blockchain, podem automatizar transações comerciais e acordos entre agricultores, distribuidores e varejistas. Isso reduz a necessidade de intermediários, acelera os pagamentos e melhora a eficiência da cadeia de suprimentos.

## 7 Arquitetura de IoT na Agricultura Inteligente

### 7.1 Visão Geral

A implementação da IoT na agricultura começa com a implantação de uma rede de dispositivos interconectados e sensores em todo o ecossistema agrícola. Esses dispositivos, equipados com vários sensores, coletam dados em tempo real sobre as condições ambientais, níveis de umidade, PH e nutrientes do solo, temperatura, umidade e saúde das culturas. Esses dados são então transmitidos para um hub central, onde são processados e analisados.

Neste trabalho consideramos que a rede de suporte a sistemas IoT na agricultura segue uma arquitetura de seis camadas, como mostrado na [figura 1](#).

**A primeira camada (Dispositivos)** consiste nos dispositivos IoT físicos e sensores/atuadores implantados no campo. Os dispositivos IoT são responsáveis pela coleta de dados, como sensores para determinar as características físico/químicas do solo, estações meteorológicas e rastreadores GPS, bem como atuadores para irrigação (água) e dispersão (fertilizantes/pesticidas).

**A segunda camada (Rede de Comunicações)** é formada de duas sub-redes: **(2.1)** uma infraestrutura de rede local que conecta sensores e atuadores a um ou mais gateways que agregam e processam os dados recebidos dos sensores, bem como enviam comandos para os atuadores e **(2.2)** uma rede de transmissão de longa distância WAN que conecta o(s) gateway(s) à plataforma (nuvem) da terceira camada, a camada de serviços. Essa rede pode ser com ou sem fio, dependendo da localização e dos requisitos específicos da fazenda.

Observe que a figura 1 também destaca a recente possibilidade de conexão tanto das gateways integradoras como dos diversos tipos de dispositivos IoT diretamente à uma rede não-terrestre (no desenho é retratado um satélite de órbita baixa, mas podem ser outro dispositivo NTN).

**A terceira camada (Serviços)** consiste na plataforma de armazenagem, processamento e análise de dados, que recebe e processa e analisa os dados coletados. Esta plataforma utiliza técnicas analíticas avançadas, como algoritmos de aprendizado de máquina, para derivar insights acionáveis e recomendações para os agricultores.

**A quarta camada (Aplicação)** permite que os usuários interajam com o sistema IoT. A partir desta camada os usuários podem receber alarmes, visualizar os dados coletados em tempo real ou ativar os atuadores ou ações que não forem programadas automaticamente. Em suma, trata-se de uma rede de difusão aos produtores rurais dos resultados das análises dos dados obtidos em sua plantação, com recomendações capazes de aumentar a eficiência de sua produção e minimizar o impacto ambiental de sua cultura.

**A quinta camada (Gerência do Sistema IoT)** consiste em dois blocos, **Gestão e Segurança**, que atuam tanto na camada de comunicação quanto nas camadas de serviços e aplicações descritas anteriormente. O bloco de gerenciamento é baseado no modelo e framework de falha, configuração, contabilidade, desempenho e segurança (FCAPS<sup>4</sup>). Este é um modelo da Rede de Gerenciamento de Telecomunicações da ISO.

O bloco de segurança garante tanto a segurança quanto a privacidade dos sistemas e é usualmente composto por quatro camadas:

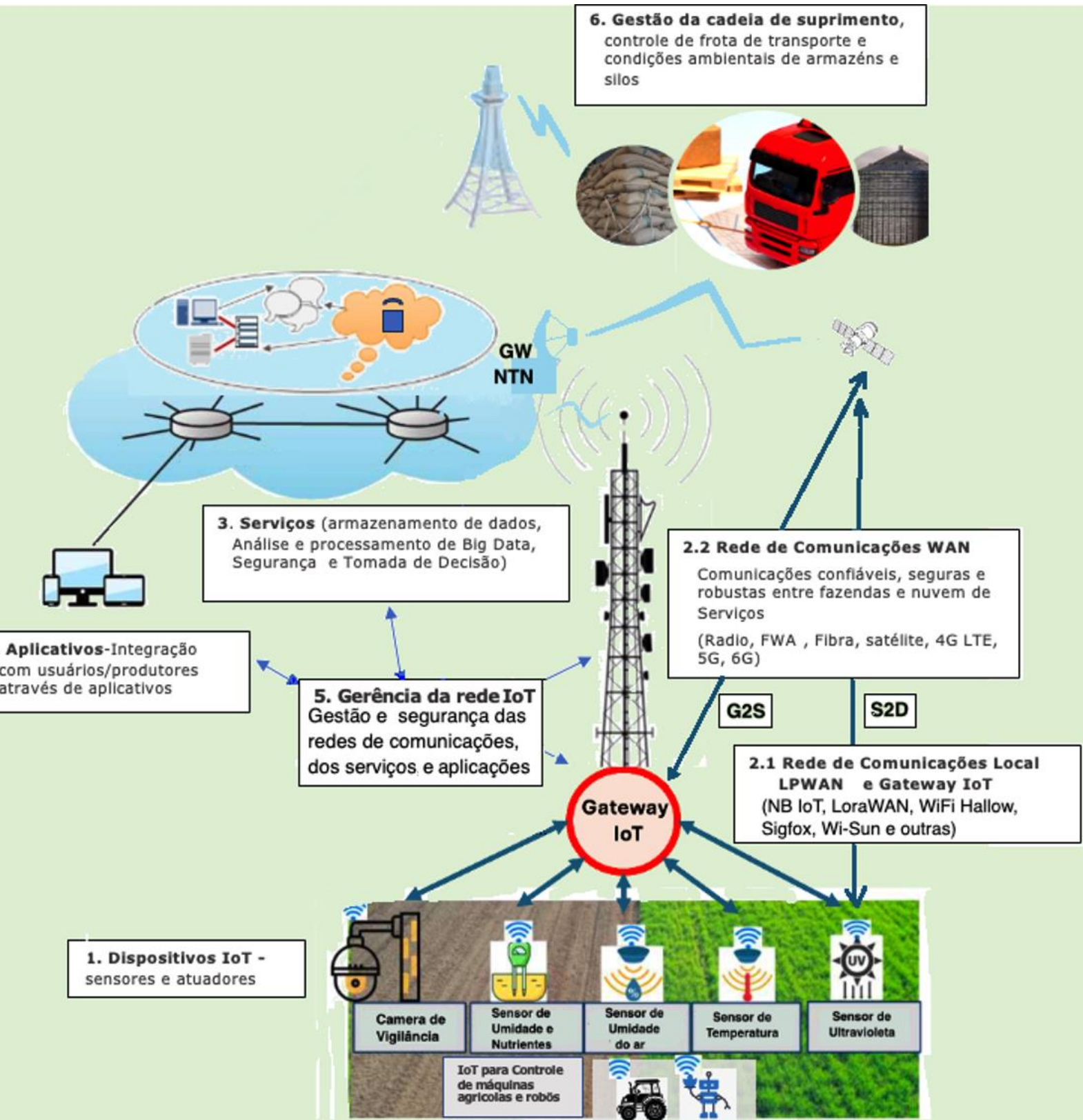
- *Autenticação*, responsável pela autenticação de usuários e serviços;
- *Autorização*, que gerencia as políticas de controle de acesso;
- *Troca e Gerenciamento de chaves*, responsável por assegurar comunicações seguras entre pares;
- *Confiança e Reputação*, responsável por pontuar o usuário e calcular o nível de confiança do serviço.

**A sexta camada (Gestão da Cadeia de Suprimentos)** é aquela relacionada à otimização da Cadeia de Suprimentos da produção agrícola. Rastreamento de IoT e sensores de qualidade podem monitorar produtos agrícolas desde o local de estocagem ou armazenagem (silos ou estruturas de armazenagem porta-paletes, *drive-in*, *drive-thru*, *flow rack* ou dinâmicas)<sup>5</sup> na fazenda até o consumidor, reduzindo perdas e melhorando a eficiência logística.

Deve ser observado que a figura 1 não mostra integração da camada de *Gerência do Sistema IoT* com a camada de *Gestão da Cadeia de Suprimentos*, uma vez que esta última não está diretamente relacionada com o sistema de produção agrícola em si, possuindo normalmente sistemas de gestão e segurança próprios

<sup>4</sup> Fault, Configuration, Accounting, Performance and Security

<sup>5</sup><https://blog.ciser.com.br/agricola/estruturas-de-armazenagem-agricolas-tipos-recomendados/>



**GW NTN:** Gateway da Rede Não Terrestre; **G2S:** GW-to-Satellite; **S2D:** Satellite-to-Device

Figura 1 - Ilustração da topologia de agricultura inteligente baseada em IoT.

## 7.2 Camada 1 - Dispositivos de IoT (Sensores/Atuadores)

### 7.2.1 Arquitetura Padrão dos Dispositivos IoT

A figura 4 mostra o diagrama em blocos típico de dispositivos IoT empregados no ambiente agrícola. Basicamente o dispositivo integra os seguintes elementos:

- Sensores para coletar informações do ambiente e do solo;
- Atuadores baseados em conexões com ou sem fio com módulos de irrigação ou de aspersão de nutrientes e/ou defensivos agrícolas;
- Sistema embarcado (geralmente um SoC – System-on-a-Chip) que possui um processador, memória, módulos de comunicação, interfaces de entrada e saída, além de software para gerenciar e controlar o dispositivo. [3]

A figura 2 indica a diversidade de tarefas que são possíveis atribuídas a sensores específicos, através de programação customizada, de interfaces específicas e memória adequada.

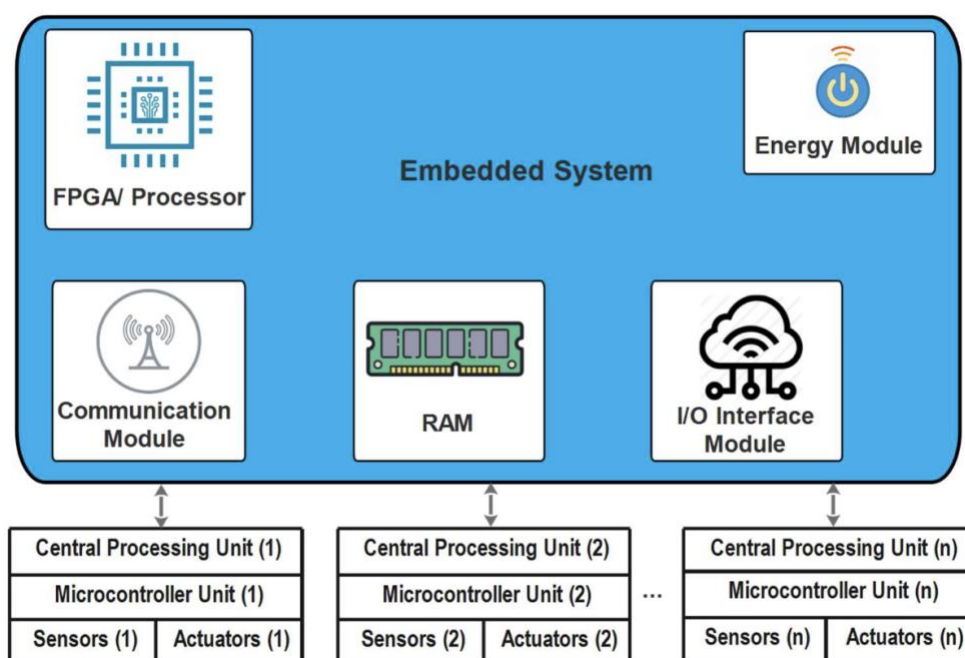


Figura 2 – Ilustração de um dispositivo IoT típico usado em ambiente agrícola. Fonte: [3]

Dispositivos de internet das coisas (IoT) são hardwares de computação não padronizados - como sensores, atuadores e outros aparelhos - que se conectam a uma rede sem fio e podem transmitir dados.<sup>6</sup> Tais dispositivos estendem a conectividade com a internet (ou nuvem IoT) para além dos dispositivos de computação típicos, como desktops, laptops, smartphones e tablets, quando integrados à uma ampla variedade de dispositivos físicos tradicionalmente "burros" ou não habilitados para internet (como sensores ou atuadores tradicionais).

### 7.2.2 Arquitetura em Camadas dos Protocolos dos Dispositivos de IoT

Existem vários protocolos de IoT disponíveis, cada um oferecendo determinados recursos ou combinações de recursos que o tornam preferível a outras opções para implantações específicas de IoT. Cada protocolo IoT permite a comunicação entre dispositivos, entre dispositivos e gateway ou entre dispositivos e nuvem/data center, ou combinações dessas comunicações.

Em [10], é apresentada uma Arquitetura em Pilha (ou camadas) dos protocolos

usualmente empregados em IoT. A pilha é dividida em cinco camadas: física, enlace de dados, rede, transporte e aplicações, conforme apresentado na figura 3.

<sup>6</sup> <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/IoT-device>

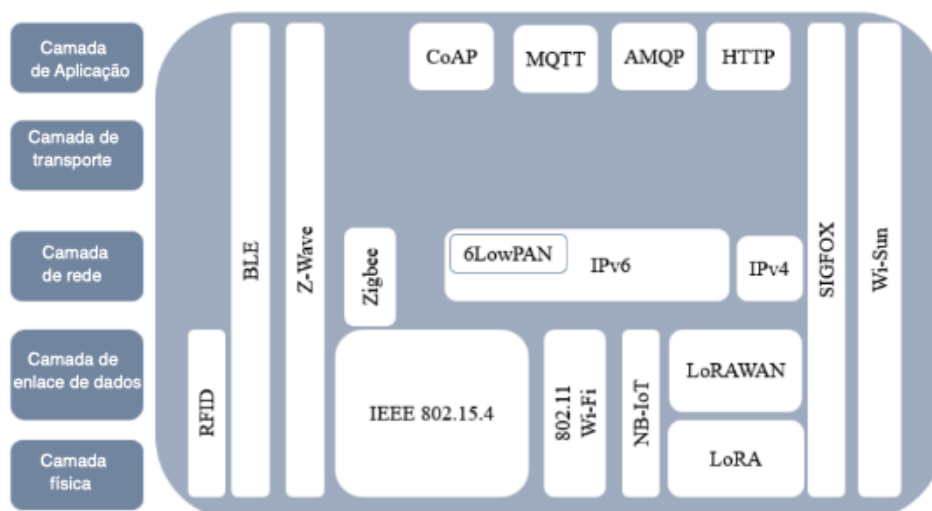


Figura 3 – Arquitetura em pilhas dos protocolos empregados em IoT (10)

#### - Camada Física (Percepção):

- Funcionalidade: Capturar as características físicas do ambiente e convertê-las em sinais digitais. É a interface entre o mundo físico e o digital.
- Tecnologias: Sensores diversos (temperatura, umidade, luminosidade etc.), RFID (Identificação por Radiofrequência), WSN (Redes de Sensores Sem Fio), GPS (Posicionamento Global), nanotecnologias e inteligência embarcada.

#### - Camada de Enlace de Dados (Empacotamento e Entrega Local):

- Funcionalidade: Preparar os dados para transmissão, organizando-os em pacotes, gerenciando endereçamento, detectando erros e prevenindo colisões.
- Tecnologias: Protocolos de comunicação específicos como Wi-Fi, Bluetooth, Ethernet, infravermelho cada um com suas características de controle de acesso à mídia, velocidade, topologia e consumo de energia.

#### - Camada de Rede (Roteamento e Endereçamento Global):

- Funcionalidade: Estabelecer a comunicação entre diferentes redes, encontrar as melhores rotas para os dados e gerenciar o endereçamento global dos dispositivos.
- Tecnologias: Protocolos de roteamento como IP (Internet Protocol), equipamentos de rede como roteadores e switches, tecnologias de comunicação como 3G/4G/5G, Wi-Fi e Zigbee.

#### - Camada de Transporte (Conexão e Confiabilidade):

- Funcionalidade: Garantir a entrega confiável dos dados entre origem e destino, controlando o fluxo de dados, corrigindo erros e gerenciando a ordem dos pacotes.
- Tecnologias: Protocolos de transporte como TCP (*Transmission Control Protocol*) - orientado à conexão - e UDP (*User Datagram Protocol*) - sem conexão, cada um adequado a diferentes tipos de aplicação.

#### - Camada de Aplicação (Interface e Interação):

- Funcionalidade: Ponto de contato com o usuário, onde as aplicações e serviços acessam os dados da rede e interagem com o mundo real.
- Tecnologias: Plataformas de desenvolvimento de aplicações IoT, interfaces de programação (APIs), protocolos de aplicação como MQTT (*Message, Queue, Telemetry Transport*), HTTP (*Hypertext Transfer Protocol Secure*), CoAP (*Constrained Application Protocol*), AMQP (*Advanced Message Queuing Protocol*) e XMPP (*Extensible Messaging and Presence Protocol*), além de interfaces de usuário para controle e visualização de dados.

Esta última, a camada de aplicações, serve como a interface da arquitetura IoT, onde a maior parte do potencial da tecnologia é realizado. Ela fornece aos desenvolvedores de IoT acesso às

plataformas, interfaces e ferramentas necessárias para construir aplicações IoT, como aquelas aplicadas ao agronegócio e detalhadas nos próximos itens.

As aplicações de IoT frequentemente enfrentam limitações em relação a capacidades de hardware, consumo de energia e custo-benefício. O baixo consumo de energia é crucial para a longevidade dos dispositivos IoT. Além do consumo de energia, outros fatores como custo da tecnologia, segurança, facilidade de uso e gerenciamento, taxas de dados sem fio e alcance de comunicação são igualmente importantes na escolha de uma tecnologia adequada.

Diversas tecnologias sem fio estão sendo desenvolvidas e aprimoradas para atender às necessidades específicas da IoT, principalmente aquelas essenciais para transmitir os dados coletados pelos dispositivos IoT para uma plataforma centralizada (Gateway IoT) onde podem ser processados e preparados para serem encaminhados à rede WAN de longa distância. Uma tentativa de classificá-las em função de alcance, capacidade de transmissão de dados e eficiência energética seria:

- ◇ **Redes WiFi, Bluetooth, Zigbee, Z-Wave:** Adequados para comunicação de curto alcance e alta largura de banda.
- ◇ **Redes de Rádio de Baixa Potência (LPWAN):** Tecnologias como LoRaWAN, NB-IoT e Sigfox, usadas para comunicação de longa distância com baixo consumo de energia e baixa taxa de dados.
- ◇ **Redes Celulares (de alta capacidade e potência):** 3G, 4G, 5G, 6G são usados para transmitir grandes volumes de dados em tempo real.
- ◇ **Comunicações via Satélite:** Utilizada em áreas remotas onde outras formas de conectividade não estão disponíveis ou para complementar outras tecnologias. As constelações de satélites em diversas órbitas apresentam características de capacidade, latência e cobertura diferentes, em consonância com as necessidades da aplicação IoT

O módulo de comunicação embarcado no sensor pode ser integrado como rádio para comunicação com quaisquer dessas redes ou mesmo direto com um satélite de baixa órbita.

### 7.2.3 Sensores: Tipos e Aplicações

A seguir é apresentada uma lista não exaustiva de tipos de sensores e atuadores comumente empregada em agricultura de precisão, indicando sua função [4]

#### 7.2.3.1 Sensores de Solo:

- Sensores de Temperatura e Umidade do Solo: Medem o teor de água no solo e/ou sua temperatura. Exemplo:
  - Sensores de Solo Campbell Scientific: Medem temperatura e umidade do solo em diferentes profundidades.<sup>7</sup>
  - Sensores de umidade do solo Decagon Devices: Oferecem diferentes tecnologias, como TDR e capacitivos.<sup>8</sup>
- Sensores de Nutrientes do Solo: Medem a concentração de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio. Exemplos
  - Sensores de Nutrientes do Solo Veris Technologies: Utilizam tecnologia de espectroscopia para análise rápida do solo.<sup>9</sup>
  - Sensores de Nutrientes do Solo NPK: Medem a concentração de nutrientes específicos.<sup>10</sup>
- Sensores de pH e Condutividade Elétrica (CE) do Solo: Medem a acidez e a salinidade do solo, fatores importantes para o desenvolvimento das plantas. Exemplos:

<sup>7</sup><https://www.campbellsci.com/soil-moisture-sensors>

<sup>8</sup> <https://metergroup.com>

<sup>9</sup> [www.veristech.com](http://www.veristech.com)

<sup>10</sup> <https://www.amazon.com/Fdit-Temperature-Humidity-Conductivity-Detector/dp/B09VJYH3KV>

- Sensores de pH e CE Hanna Instruments: Oferecem diferentes modelos para diferentes aplicações.<sup>11</sup>
- Sensores de pH e CE YSI: Conhecidos por sua precisão e confiabilidade.<sup>12</sup>
- Sensores de Compactação do Solo: Medem a densidade e a compactação do solo. Exemplo:
  - Medidor digital de compactação Falker PenetroLOG. Equipamento portátil, capaz de gerar o perfil de compactação até 60 cm de profundidade, permitindo avaliar o adensamento em camadas mais profundas.<sup>13</sup>
- Tecnologia de Sensoriamento de Nêutrons por Raios Cósmicos (CRNS -Cosmic Ray Neutron Sensing)
  - CRNS (Sensoriamento de Nêutrons por Raios Cósmicos) é uma técnica que mede a umidade do solo e neve através da detecção de nêutrons. Raios cósmicos geram nêutrons rápidos que, ao interagir com a água, produzem nêutrons lentos. Uma sonda conta ambos os tipos: menos nêutrons detectados indicam mais água presente no solo. A técnica oferece medições representativas de grandes áreas (5-20 hectares), sendo mais abrangente em altitudes elevadas.
  - Exemplo: Sonda Finapp da CAE<sup>14</sup>

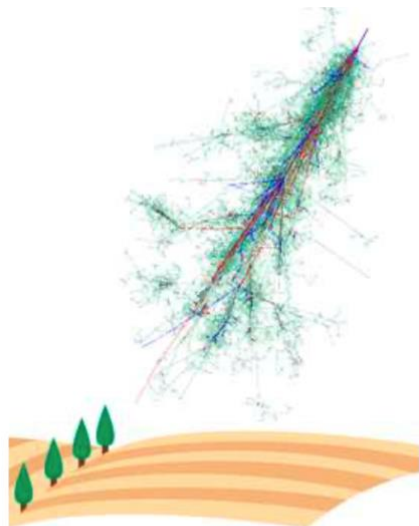


Figura 6. Raios cósmicos chegam à superfície da terra após interação com a atmosfera



Figura 7. A sonda mede os nêutrons formados pela interação entre água e raios cósmicos

- Sensores de Pressão Barométrica: Medem a pressão atmosférica.
- Sensores de Velocidade do Vento: Monitoram a velocidade do vento.
- Sensores de Luminosidade: Medem a intensidade da luz solar, importante para o crescimento das plantas. Exemplos:
  - Sensores de Luminosidade LI-COR LI-190R: Medem a radiação solar em diferentes faixas de espectro.<sup>16</sup>
  - Sensores de Luminosidade Apogee Instruments: Oferecem alta precisão e durabilidade.<sup>17</sup>

<sup>11</sup> <https://hannainst.com.br/>

<sup>12</sup> <https://www.ysi.com/>

<sup>13</sup> <https://www.falker.com.br/br/penetrolog>

<sup>14</sup> <https://www.finapptech.com/en/finapp-probe/>

<sup>15</sup> <https://weenat.com/pt/>

<sup>16</sup> <https://www.licor.com/env/products/light/>

<sup>17</sup> <https://www.apogeeinstruments.com/daily-light-integral-measurement/>

### 7.2.3.2 Sensores de Sole;

#### Sensores de Saúde das Culturas [6]

- Sensores Ópticos: Usam a reflexão da luz para avaliar a saúde das culturas.
- Sensores Ópticos Baseados em Fluorescência: Monitoram o amadurecimento de frutas como uvas.



Figura 4 - Um agricultor operando um sensor óptico portátil ao lado de um drone que também é equipado com sensores ópticos e pára acima das plantações [6]

#### Exemplos:

- Drones com Câmeras Multiespectrais: Capturam imagens em diferentes faixas de espectro, permitindo análise detalhada da saúde das plantas.
- Câmeras de Visão Artificial: Utilizadas em robôs agrícolas para detecção de pragas e ervas daninhas.

### 7.2.3.3 Sensores de Pragas nas Lavouras [14][15]

A detecção e monitoramento de pragas de insetos são cruciais para a agricultura inteligente. Existem vários dispositivos e métodos utilizados para essa finalidade, cada um com suas vantagens e desvantagens:

- Armadilhas Luminosas: Atraem insetos noturnos por meio da luz, geralmente UV.
  - Vantagens: Simples, relativamente barato, eficaz para algumas pragas.
  - Desvantagens: Podem capturar insetos benéficos, não são eficazes para todas as pragas.
  - Exemplos: Armadilhas luminosas para controle de mariposas, besouros e outros insetos noturnos.
- Armadilhas de Feromônios: Atraem insetos específicos por meio de feromônios sexuais.
  - Vantagens: Alta especificidade, eficaz para controle de pragas específicas.
  - Desvantagens: Necessidade de identificar o feromônio correto para cada praga, custo relativamente alto.
  - Exemplos: Armadilhas de feromônios para controle de brocas do milho, mariposas da soja, etc.
- Armadilhas de Isca: Atraem insetos por meio de iscas alimentares, geralmente com veneno.
  - Vantagens: Eficaz para controle de pragas que se alimentam de determinadas substâncias.

- Desvantagens: Podem contaminar o ambiente, risco de intoxicação para outros animais.
- Exemplos: Armadilhas de isca para controle de formigas, baratas, etc.
- Sensores de Imagem e Visão: Utilizam Drones com câmeras multiespectrais, câmeras de visão artificial em robôs e algoritmos de inteligência artificial para detectar pragas em imagens.
  - Vantagens: Alta precisão, detecção rápida e eficiente de pragas, análise em tempo real.
  - Desvantagens: Custo elevado, necessidade de treinamento dos algoritmos, dependência de condições climáticas.
  - Exemplos: Sistemas de detecção de pragas em plantações de frutas, hortaliças, etc.
- Coleta de Amostras de Insetos: Coleta de insetos para identificação e análise em laboratório.
  - Vantagens: Permite identificar o tipo de praga e sua abundância, análise de resistência a pesticidas.
  - Desvantagens: Requer conhecimento técnico, tempo de análise em laboratório.
  - Exemplos: Coleta de amostras de insetos em plantações de soja, milho, etc.
- Monitoramento Acústico: Utiliza microfones (sensores acústicos em drones e estações de monitoramento acústico) para detectar o som de insetos, como o barulho de asas ou de mordidas.
  - Vantagens: Detecção precoce de pragas, monitoramento em tempo real, sem o uso de armadilhas.
  - Desvantagens: Necessidade de identificar o som específico de cada praga, interferência de outros ruídos.
  - Exemplos: Monitoramento acústico de pragas em plantações de arroz, cana-de-açúcar, etc.

#### 7.2.3.4 Sensores Ambientais

- Sensores de Intensidade de Luz: Medem a quantidade de luz em uma determinada área.
- Sensores de Metabolismo de Carbono: Medem os níveis de carbono em ambientes específicos, como turfeiras.

#### 7.2.3.5 Sensores de Máquinas

- Sensores de Precisão de Plantio: Monitoram a precisão com que uma máquina está plantando sementes.
- Sensores de Aplicação de Herbicidas: Acompanham a quantidade de herbicida pulverizado.

#### 7.2.3.6 Sensores de Localização (GNSS)

- Sistemas de Navegação por Satélite (GNSS): Utilizados em tratores para navegação precisa e aplicação de insumos.
- Sistemas de Posicionamento por Satélite (GPS): Utilizados em drones para mapeamento e monitoramento do campo.

## 7.2.4 Atuadores

**7.2.4.1 Sistemas de Irrigação:** Controlam a aplicação de água de acordo com as necessidades do solo e das plantas. Exemplos:

- Sistemas de Irrigação por Gotejamento: Aplicam água diretamente na raiz das plantas, minimizando perdas por evaporação.
- Sistemas de Irrigação por Aspersão: Utilizam aspersores para distribuir água de forma uniforme no campo.

**7.2.4.2 Sistemas de Fertilização:** Controlam a aplicação de fertilizantes de acordo com as necessidades do solo e das plantas. Exemplos:

- Sistemas de Fertilização por Gotejamento: Aplicam fertilizantes juntamente com a água de irrigação.
- Sistemas de Fertilização por Pulverização: Utilizam pulverizadores para aplicar fertilizantes líquidos ou granulados.

**7.2.4.3 Sistemas de Controle de Pragas:** Utilizam métodos como pulverização de pesticidas e controle biológico para combater pragas. Exemplos:

- Drones com Pulverizadores: Aplicam pesticidas de forma precisa e eficiente.
- Sistemas de Controle Biológico: Utilizam inimigos naturais das pragas para controlá-las.

**7.2.4.4 Sistemas de Controle de Clima:** Controlam a temperatura e a umidade do ambiente, especialmente em estufas. Exemplos:

- Sistemas de Ventilação: Controlam a temperatura e a umidade do ar dentro da estufa.
- Sistemas de Aquecimento e Resfriamento: Mantêm a temperatura ideal para o crescimento das plantas.

**7.2.4.5 Robôs Agrícolas; Realizam tarefas como plantio, colheita, pulverização e monitoramento do campo.** Exemplos:

- Robôs Agrícolas Autônomos: Realizam tarefas agrícolas de forma independente, sem a necessidade de intervenção humana.
- Robôs Agrícolas Controlados Remotamente: Operados por humanos através de interfaces remotas.

## 7.3 Camada 2 - Rede de Comunicações em IoT

### 7.3.1 Introdução

Em [5], é colocado que a agricultura, um dos setores mais antigos do mundo, precisa passar por uma transformação digital impulsionada pela conectividade para atender à crescente demanda por alimentos e enfrentar desafios como a mudança climática e a pressão por práticas mais sustentáveis.

É certo que os dados coletados pelos dispositivos IoT objeto do item anterior, nada valem se não forem coletados e transmitidos de forma confiável e com elevada disponibilidade, para o local de armazenagem, análise e tomada de decisão.

Na grande maioria das vezes, aplicações de IoT, geralmente sensíveis a custos e caracterizadas por transmissões infrequentes de pequenos pacotes de dados, requerem muitos dispositivos, frequentemente espalhados por áreas extensas. Tais dispositivos devem ser resilientes, operando muitas vezes sob condições climáticas extremas, energeticamente eficientes, capazes de operar de forma autônoma por muitos anos.

Tais requisitos físicos, operacionais e econômicos logicamente também se aplicam aos dispositivos de comunicações associados aos sensores, em particular a sensibilidade aos custos, não só de hardware como também da conectividade em si.

Assim, as soluções sem fio tradicionais, como celular legadas (2G ou 3G) e atuais, 4G e 5G, são aplicáveis em poucos casos na zona rural pelo alto custo de extensão do seu alcance em zonas de baixa densidade populacional, ainda que atuem em um nicho de fazendas industriais de grande extensão que necessitam de alta capacidade de conexão.

### 7.3.2 Tecnologias LAN para Conectividade Sensor ↔ Gateway (Camada 2.1)

Conectividade na fazenda, do sensor ao gateway, pode ser implementada utilizando diferentes tecnologias, cada uma com suas características e ideal para cenários específicos. Vamos detalhar as opções, separando-as em tecnologias celulares (como definidas pelo 3GPP<sup>18</sup>) e as tecnologias não-celulares.

#### 7.3.2.1 Tecnologias Celulares Modernas(3GPP):

- **NB-IoT (Narrowband Internet of Things) - LTE Cat NB2:**

- *Funcionamento:* Utiliza a infraestrutura existente de redes celulares 4G/5G, ocupando uma banda estreita do espectro para comunicação. É também considerada uma tecnologia LPWAN. NB-IoT tem 3 modos operacionais distintos: na opção de banda interna, compartilha banda de uma operadora LTE; no modo Guardband, NB-IoT aproveita a largura de banda sobressalente do LTE. Finalmente, na configuração autônoma, NB-IoT sua banda de frequência alocada [12].

Com o Release 14, o 3GPP introduziu o **LTE Cat NB2**, uma versão atualizada do NB-IoT. O padrão mais novo fornece velocidades máximas de uplink de 159 kbps e velocidades de downlink de 127 kbps, um aumento significativo em relação à versão mais antiga.

- *Vantagens:* Boa cobertura, baixo consumo de energia, penetração em ambientes fechados, segurança de dados, alta capacidade de dispositivos conectados.
  - *Desvantagens:* Velocidade de dados limitada, latência pode ser um fator limitante para aplicações em tempo real, dependência de operadora de celular.
  - *Aplicações:* Monitoramento remoto de sensores de solo, temperatura, umidade, nível de água em reservatórios, detecção de intrusão, rastreamento de animais.
- **LTE Cat-1bis**
    - *Funcionamento:* LTE Cat 1bis é um padrão de comunicação celular para casos de uso de Internet das Coisas (IoT) e Máquina-a-Máquina (M2M). Fruto da release 13 do 3GPP, tem uma taxa máxima de uplink de 10 Mbps e de downlink de 5Mbps. Não é compatível com 5G.
    - Similar ao NB-IoT, utiliza redes celulares 4G/5G com uma banda dedicada.
    - *Vantagens:* Maior velocidade de dados que o NB-IoT, baixo consumo de energia, mobilidade (ideal para rastreamento), boa cobertura.
    - *Desvantagens:* Latência maior que outras tecnologias celulares, dependência de operadora de celular e por não ser compatível com 5G, deve desaparecer junto com o 4G.
    - *Aplicações:* Rastreamento de máquinas agrícolas, monitoramento de colheitadeiras em tempo real, controle remoto de sistemas de irrigação.

#### 7.3.2.2 Tecnologias Celulares Legadas (3GPP):

- **EC-GSM-IoT (Extended Coverage-GSM Internet of Things):**

---

<sup>18</sup> 3GPP, sigla para “3rd Generation Partnership Project”, é um projeto global que reúne organizações e empresas de telecomunicações com o objetivo de definir os padrões técnicos das redes móveis celulares, tanto de alta como baixa capacidade de transmissão de dados.

- *Funcionamento:* Utiliza uma versão otimizada do GSM (2G/3G) para comunicação de dados, ocupando uma banda estreita do espectro e permitindo a reutilização da infraestrutura GSM existente.
- *Vantagens:* Amplo alcance em áreas com cobertura GSM, baixo consumo de energia, baixo custo de implementação, segurança de dados inerente ao GSM
- *Desvantagens:* Velocidade de dados limitada (semelhante a 2G), latência pode ser um fator limitante para aplicações em tempo real, dependência de operadora de celular.
- *Aplicações:* Monitoramento remoto de sensores em áreas com cobertura GSM limitada, controle de irrigação em áreas remotas, rastreamento de gado em larga escala.
- **LTE-M2:**
  - *Funcionamento:* Uma evolução do LTE-M apresentada no release 14, utiliza uma parte dedicada do espectro LTE (4G) para comunicação de dados de alta velocidade. Pode com taxas até 7 Mbps no uplink e até 4 Mbps no downlink. Compatível com 5G.
  - *Vantagens:* Boa cobertura em áreas com 4G, menor consumo de energia que o LTE tradicional, mobilidade (ideal para rastreamento), segurança de dados inerente ao LTE. Como LTE, em evolução para 5G.
  - *Desvantagens:* Dependência de operadora de celular e menor range (MCL – Minimum Range Loss) do que Cat NB2.
  - *Aplicações:* Rastreamento de veículos e equipamentos agrícolas, monitoramento remoto de sistemas de irrigação, controle de drones para pulverização, operação com câmeras de alta resolução.

### 7.3.2.3 Tecnologias Não-Celulares LPWAN (Low Power Wide Area Networks)

- **LoRaWAN (Long Range Wide Area Network:**
  - *Funcionamento:* Utiliza frequências de rádio não licenciadas para comunicação de longa distância e baixo consumo de energia. A arquitetura de rede LoRaWAN pode ser implementada como uma topologia em estrela com comunicação bidirecional entre nós finais e gateways. Sua técnica de modulação é derivada da tecnologia de Espalhamento Espectral por Chirp (CSS), pois utiliza pulsos chirp para codificar informações através de ondas de rádio. O LoRa fornece até cinco quilômetros de cobertura em regiões urbanas e até 15 quilômetros ou mais (em linha de visão) em áreas rurais.  
  
Essa tecnologia é apoiada por grandes empresas como Cisco ou Semtech, que se uniram através da LoRa Alliance. O LoRaWAN fornece uma arquitetura bem definida de duas camadas: a camada mais baixa, LoRa, define o nível físico (PHY), e acima dessa camada, o nível de controle de acesso ao meio (MAC) é definido pelo LoRaWAN.
  - *Vantagens:* Longo alcance (vários quilômetros), baixo custo de implementação, baixo consumo de energia, não depende de operadora móvel.
  - *Desvantagens:* Baixa taxa de dados, limitações para envio de grandes volumes de dados, interferência em áreas com muitas redes LoRaWAN.
  - *Aplicações:* Monitoramento de sensores em áreas extensas, controle de irrigação inteligente, detecção de incêndio em plantações.
- **Sigfox:**
  - *Funcionamento:* Rede global de baixa potência e longo alcance, operando em frequências de rádio não licenciadas.

- *Vantagens:* Cobertura global, simplicidade de implementação, baixo custo dos dispositivos.
- *Desvantagens:* Taxa de dados extremamente baixa, limitado a pequenas mensagens, dependência da rede Sigfox.
- *Aplicações:* Monitoramento básico de sensores, envio de alertas simples (ex: detecção de geadas), rastreamento de ativos de baixo valor, controle de áreas restritas
- **Weightless:**
  - *Funcionamento:* Utiliza frequências sub-GHz não licenciadas (como 868 MHz) para comunicação de longa distância e baixo consumo de energia. Opera com um protocolo simplificado para reduzir a complexidade dos dispositivos.
  - *Vantagens:* Longo alcance (vários quilômetros em áreas rurais), baixo custo de implementação e dos dispositivos, segurança de dados integrada ao protocolo, baixo consumo de energia.
  - *Desvantagens:* Taxa de dados muito baixa, limitado a pequenas mensagens, ecossistema de fornecedores ainda em desenvolvimento.
  - *Aplicações:* Monitoramento remoto de sensores em áreas extensas, envio de alertas de eventos (ex: intrusão, incêndio), controle de irrigação em áreas remotas.
- **Ingenu:**
  - *Funcionamento:* Utiliza tecnologia de rádio cognitiva (RPMA - Random Phase Multiple Access) para acessar o espectro de forma dinâmica, evitando interferências e otimizando a comunicação. Opera em frequências não licenciadas.
  - *Vantagens:* Longo alcance (semelhante ao LoRaWAN) baixo consumo de energia, alta capacidade de dispositivos conectados, robustez a interferências.
  - *Desvantagens:* Tecnologia relativamente nova, ecossistema de fornecedores ainda em desenvolvimento, disponibilidade limitada em algumas regiões.
  - *Aplicações:* Monitoramento ambiental, redes de sensores na agricultura de precisão.
- **Mioty**
  - *Funcionamento:* Baseado em um padrão aberto, utiliza uma técnica de rádio inovadora chamada *Telegram Splitting* para garantir comunicação confiável em ambientes com interferências. Opera em frequências não licenciadas.
  - *Vantagens:* Longo alcance (até 15 km em áreas rurais), baixo consumo de energia, alta capacidade de dispositivos conectados, robustez a interferências, baixa latência para LPWAN.
  - *Desvantagens:* relativamente nova, ecossistema de fornecedores em crescimento, pode exigir gateways mais sofisticados.
  - *Aplicações:* Redes de sensores críticas, monitoramento de infraestrutura, controle industrial, agricultura de precisão.
- **Wi-SUN**
  - *Funcionamento:* Wi-SUN (Wireless Smart Ubiquitous Network) é uma tecnologia de rede LPWAN baseada em padrões abertos IEEE 802.15.4g, projetada para aplicações de IoT em larga escala. Opera no espectro de rádio sub-GHz (tipicamente 900 MHz) e utiliza uma topologia de rede mesh, permitindo que os dispositivos se conectem entre si e encaminhem dados, expandindo o alcance da rede.
  - *Vantagens:*
    - Longo Alcance e Confiabilidade: O uso de frequências sub-GHz e a topologia mesh garantem comunicação confiável a longas distâncias, mesmo em áreas

- com obstáculos. Essa característica a torna robusta a interferências e ideal para ambientes desafiadores, como áreas rurais com obstáculos.
  - Baixo Consumo de Energia: Projetada para dispositivos alimentados por bateria, com vida útil de vários anos.
  - Comunicação Bidirecional: Permite o envio e recebimento de dados de forma eficiente, ideal para monitoramento e controle em tempo real.
  - Segurança: Oferece mecanismos robustos de segurança, como criptografia e autenticação, para proteger os dados da rede.
  - Escalabilidade: Suporta muitos dispositivos em uma única rede, ideal para fazendas de grande porte.
- **Desvantagens:**
  - Custo de Hardware: O custo dos dispositivos e gateways Wi-SUN pode ser mais elevado em comparação com algumas tecnologias LPWAN, especialmente em pequena escala.
  - Complexidade de Implementação: A configuração e o gerenciamento de redes Wi-SUN podem ser mais complexos, exigindo expertise técnica.
  - Ecossistema em Desenvolvimento: Embora em crescimento, o ecossistema de dispositivos e fornecedores Wi-SUN ainda é menor em comparação com LoRaWAN.
- **Aplicações:**
  - Monitoramento e Controle de Irrigação: Gerenciamento preciso da irrigação com base em dados de sensores de umidade do solo e condições climáticas.
  - Automação de Estufas: Controle automatizado de temperatura, umidade, iluminação e ventilação em estufas.
  - Monitoramento de Condições Ambientais: Coleta de dados de temperatura, umidade, luminosidade, vento e chuva para tomada de decisão.
  - Gestão de Energia: Monitoramento e controle do consumo de energia em sistemas de irrigação, iluminação e outras infraestruturas.
- **WiFi Hi-Low**
  - **Funcionamento:** O Wi-Fi HaLow, baseado no padrão IEEE 802.11ah, foi desenvolvido para atender às necessidades de ambientes IoT, oferecendo conexões de longo alcance e maior duração de bateria.
    - Operando na faixa de frequência sub-1 GHz, Wi-Fi HaLow aumenta a ubiquidade e segurança do Wi-Fi para ambientes IoT, sendo especialmente útil para a conectividade de sensores agrícolas em áreas rurais.
    - O padrão trabalha em faixas de frequência específicas, que variam de acordo com regulamentações locais, como 902-928 MHz nos EUA e 915-928 MHz na Austrália e Nova Zelândia.
    - A tecnologia utiliza diversos Esquemas de Modulação e Codificação (MCS) que se ajustam automaticamente para otimizar a taxa de transferência de dados. No limite máximo de alcance, cerca de 1 km, pode operar no modo MCS 10, com taxa de transmissão de 300bps e taxa efetiva de 150 kbps, proporcionando redundância para correção de erros. Para dispositivos próximos, taxas mais altas, de dezenas de megabits por segundo, estão disponíveis.
    - Sua capacidade de penetrar obstáculos e operar com baixo consumo de energia o torna ideal para aplicações agrícolas e outros ambientes IoT desafiadores.
  - **Vantagens:**

- Uma vantagem significativa do Wi-Fi HaLow é seu suporte nativo a IP, que facilita o acesso à internet e aplicações em nuvem sem necessidade de infraestrutura adicional como hubs ou gateways.
- O Wi-Fi HaLow se mostra uma tecnologia promissora para IoT e agricultura em áreas rurais, oferecendo longo alcance, eficiência energética e flexibilidade de taxas de dados.
- Adicionalmente, a tecnologia facilita atualizações de firmware e manutenção remota de dispositivos, contribuindo para a eficiência operacional em áreas rurais.
- Complexidade de implantação relativamente baixa, uma vez que se beneficia da ampla adoção do padrão Wi-Fi.
- *Desvantagens:*
  - Adoção limitada: A baixa disponibilidade de dispositivos e chips compatíveis no mercado dificulta a adoção generalizada. Isso cria um ciclo em que a falta de produtos desencoraja investimentos, que por sua vez limita o desenvolvimento de novos produtos.
  - Custo inicial: Como é uma tecnologia relativamente nova, os custos de implementação e dos dispositivos compatíveis podem ser mais altos em comparação com tecnologias mais estabelecidas.
  - Interferência potencial: Operar na faixa sub-1 GHz pode levar a interferências com outros serviços que usam frequências similares, como rádio amador ou certos sistemas de comunicação industrial.
  - Complexidade regulatória: As regulamentações para o uso do espectro sub-1 GHz variam significativamente entre países, o que pode complicar o desenvolvimento de produtos globais e a implementação em larga escala.
- *Aplicações:*
  - Monitoramento de umidade do solo e condições climáticas
  - Sistemas de irrigação automatizados
  - Rastreamento de gado e gerenciamento de pastagens
  - Monitoramento de frotas de veículos e máquinas agrícolas
  - Monitoramento de silos e armazéns agrícolas
  - Monitoramento de florestas para prevenção de incêndios
  - Rastreamento de vida selvagem em reservas naturais
  - Sistemas de alerta precoce para inundações ou deslizamentos de terra
- **DECT 2020 (WIREPASS)**
  - *Funcionamento:*

Na rede mesh DECT-2020, os dispositivos podem se comunicar diretamente entre si, estendendo o alcance da rede e aumentando a confiabilidade da comunicação. O modo dos dispositivos de rádio envolvidos pode mudar autonomamente dependendo do contexto da comunicação. Cada dispositivo de rádio pode atuar como um nó transmitindo uma mensagem, como um nó encaminhando qualquer mensagem de outro dispositivo de rádio ou como um nó sendo o destino de uma mensagem. Cada dispositivo de rádio pode se comunicar diretamente (dispositivo para dispositivo) ou, se não estiver ao alcance, indiretamente - via outros dispositivos de rádio estabelecendo uma rota de comunicação - entre si, o que minimiza a probabilidade de falha.

A topologia mesh pode suportar altas densidades de dispositivos, e o roteamento autônomo proporciona a capacidade de se adaptar dinamicamente a usuários móveis e interferências.

A operação mesh suporta roteamento autônomo. Para alcançar uma operação mMTC eficiente, o sistema mesh é escalável para um número muito alto de dispositivos em uma rede, e o roteamento é baseado em valor de custo, sem a necessidade de manter tabelas de roteamento em cada dispositivo [12][13].

o *Vantagens*

- o Conectividade Estendida e Confiável: A topologia mesh do DECT-2020 permite que os dispositivos se comuniquem diretamente entre si ou através de outros dispositivos, estendendo o alcance da rede e aumentando a confiabilidade da comunicação. Isso é particularmente útil em grandes áreas agrícolas, onde a cobertura uniforme pode ser um desafio.
- o Alta Escalabilidade: O sistema é escalável para suportar muitos dispositivos (até um milhão de dispositivos por quilômetro quadrado), o que é essencial para a agricultura de precisão, onde muitos sensores e dispositivos são usados para monitorar condições do solo, clima, crescimento das plantas, entre outros.
- o Baixo Consumo de Energia: A eficiência energética do DECT-2020 é uma vantagem significativa, uma vez que muitos dispositivos em áreas agrícolas podem estar localizados em locais remotos e dependem de baterias ou outras fontes de energia limitadas.
- o Flexibilidade na Configuração: os dispositivos de rádio podem mudar autonomamente entre os modos de terminação fixa (FT) e portátil (PT), adaptando-se dinamicamente às necessidades de comunicação e minimizando a necessidade de infraestrutura fixa.
- o Redução de Pontos Únicos de Falha: A topologia mesh elimina pontos únicos de falha, tornando a rede mais resiliente a falhas e interrupções, o que é crucial para operações agrícolas contínuas e confiáveis.
- o Adaptação a Interferências e Mobilidade: O roteamento autônomo permite que a rede se adapte dinamicamente a interferências e usuários móveis, como máquinas agrícolas em movimento.

o *Desvantagens:*

- o Complexidade de Implementação: A configuração e o gerenciamento de uma rede mesh podem ser complexos, especialmente em áreas agrícolas extensas e variáveis. Isso pode exigir habilidades técnicas avançadas e maior investimento inicial.
- o Custo Inicial: Embora a operação do sistema possa ser eficiente em termos de custo a longo prazo, o custo inicial de instalação de uma rede DECT-2020 pode ser elevado, particularmente para pequenos agricultores.
- o Limitações de Banda Larga: Embora o DECT-2020 seja adequado para comunicação de baixa largura de banda, pode não ser ideal para aplicações que exigem transmissão de dados em alta velocidade, como vídeos de monitoramento em tempo real.
- o Dependência de Conectividade Externa: A conectividade externa à internet não é parte do padrão DECT-2020, o que significa que os agricultores precisam garantir uma solução de conectividade externa confiável, o que pode ser desafiador em áreas rurais com infraestrutura limitada.
- o Interferência em Ambientes Densos: Em áreas com alta densidade de dispositivos e possíveis interferências de outras tecnologias de comunicação, o desempenho do DECT-2020 pode ser comprometido.

- Manutenção e Suporte: A manutenção de uma rede mesh pode ser mais complexa do que redes tradicionais, exigindo suporte contínuo e possível atualização de dispositivos e software.
- *Aplicações*
  - Monitoramento de Solo e Clima: Sensores distribuídos em campos agrícolas para monitorar a umidade do solo, temperatura e outras condições ambientais.
  - Controle de Irrigação: Sistemas automatizados que ajustam a irrigação com base nos dados dos sensores, otimizando o uso de água.
  - Monitoramento de Culturas: Uso de sensores para acompanhar o crescimento das plantas e identificar problemas de saúde das culturas precoce.

Em resumo, o DECT-2020 é particularmente adequado para aplicações que requerem a conexão de muitos dispositivos com baixa largura de banda e alta confiabilidade, em ambientes onde a infraestrutura de rede pode ser limitada ou onde a flexibilidade e escalabilidade são essenciais.

- **6LoWPAN**

- *Funcionamento:* Adapta o protocolo IPv6 para redes sem fio de baixa potência e curto alcance, como redes de sensores sem fio (WSN – Wireless Sensor Network). 6LoWPAN é uma tecnologia fundamental para a comunicação em redes de sensores sem fio (WSN), mas não é uma tecnologia LPWAN em si. Ele é usado em conjunto com outras tecnologias LPWAN, como LoRaWAN, Sigfox, Bluetooth Low Energy, etc., para permitir a comunicação entre dispositivos com recursos limitados utilizando o protocolo IP, além de criar redes de sensores sem fio mais complexas e robustas.
- *Vantagens:* Permite a comunicação entre dispositivos com recursos limitados utilizando o protocolo IP, que é amplamente utilizado na internet.
- *Desvantagens:* Exige um gateway para traduzir os pacotes IPv6 para outros protocolos, como LoRaWAN ou Sigfox.

- **Amazon Sidewalk**

- *Funcionamento:* A Amazon Sidewalk é uma tecnologia de rede LPWAN emergente que utiliza o espectro de rádio sub-GHz (Bluetooth Low Energy e frequências de rádio de 900 MHz) para criar uma rede mesh utilizando gateways (roteadores Wi-Fi da Amazon e dispositivos Echo) de usuários para estender a cobertura e conectar dispositivos a longas distâncias. Os dispositivos se comunicam com o gateway mais próximo, que retransmite os dados até a nuvem da Amazon.
- *Vantagens:* Baixo Consumo de Energia, comunicação Bidirecional, fácil Instalação e Configuração. A tecnologia possui um ecossistema maduro de dispositivos, incluindo sensores, atuadores, controladores e gateways. Outra significativa vantagem é a Segurança: Oferece criptografia de 128 bits para proteger a comunicação entre os dispositivos.
- *Desvantagens:* A tecnologia foi projetada para uso em ambientes internos apresentando, portanto, um alcance limitado, tipicamente até 100 metros em ambientes abertos, tornando-a menos adequada para grandes áreas em ambientes externos, onde pode enfrentar desafios com interferências. Suporta taxas de dados relativamente baixas, limitando sua aplicação para transmissão de grandes volumes de dados.
- *Aplicações em Fazenda*  
Embora ainda esteja em fase inicial de desenvolvimento, principalmente voltada para aplicações residenciais, a Sidewalk apresenta potencial para uso em fazendas, especialmente em cenários específicos.

- Automação de Estufas: Controle de temperatura, umidade, iluminação e irrigação em estufas de pequeno a médio porte.
- Monitoramento de Estoque: Rastreamento de níveis de estoque em silos, depósitos e câmaras frigoríficas.
- Controle de Acesso e Segurança: Gerenciamento de acesso a áreas restritas e monitoramento de segurança em instalações agrícolas.

#### 7.3.2.4 Comparação entre as principais tecnologias LPWAN

Cada tecnologia tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha ideal dependerá das necessidades específicas de cada aplicação dentro do ecossistema de agricultura inteligente.

Em uma avaliação básica, com ênfase em máximo alcance e capacidade (não disponíveis, de modo geral, simultaneamente), pode-se gerar a tabela abaixo, que de maneira alguma indica um ranking definitivo entre as tecnologias.

Tecnologia	Capacidade	Abstrangência	Latência	Custo
<b>LoRaWAN</b>	Baixa	Até 15 km	Baixa a moderada	Baixo
<b>Sigfox</b>	Muita baixa	Até 50 km	Alta	Baixo
<b>NB-IoT</b>	Baixa	Até 10 km	Moderada a alta	Moderado
<b>Cat-1 bis</b>	Baixa	Até 10 km	Baixa	Moderado
<b>EC-GSM-IoT</b>	Alta	Até 15 km	Moderada	Moderado
<b>LTE-M</b>	Alta	Até 10 km	Baixa	Moderado
<b>Weightless</b>	Alta	Até 10 km	Baixa a moderada	Baixo
<b>Ingenu</b>	Alta	Até 20 km	Moderada	Moderado
<b>Mioty</b>	Muito Alta	Até 15 km	Baixa a moderada	Moderado
<b>WI-SUN</b>	Alta	Até 10 km por salto	Baixa	Moderado
<b>Wi-Fi HaLow</b>	Alta	Até 1 km	Baixa	Moderado
<b>DECT-2020 NR</b>	Muito Alta	Até 10 km	Baixa a moderada	Moderado

#### 7.3.2.5 Considerações Finais

A escolha da tecnologia LPWAN adequada depende de diversos fatores específicos do caso de uso na agricultura inteligente, como a necessidade de cobertura de área, quantidade de dispositivos, requisitos de latência e orçamento disponível. Cada tecnologia oferece um conjunto único de vantagens e desvantagens que devem ser considerados para otimizar a implementação e operação da rede IoT.

#### 7.3.3 Gateway IoT

Os gateways de agregação dos dados gerados pelos sensores desempenham um papel crucial no ecossistema LPWAN, atuando como intermediários entre os sensores/dispositivos e os sistemas de backend (servidores e plataformas de análise de dados). Eles possuem várias funções básicas essenciais para garantir a eficiência e a confiabilidade da transmissão de dados, dentre as quais se destacam:

##### b) Recepção de Dados

- Função:
  - Captura de Sinais: O gateway recebe sinais de rádio enviados pelos sensores e dispositivos LPWAN em sua área de cobertura.
  - Decodificação: Ele decodifica os sinais recebidos para extrair os dados úteis enviados pelos sensores.
- Importância:
  - Precisão: Garantir que os dados recebidos sejam precisos e completos é fundamental para a integridade do sistema.

- **Confiabilidade:** A capacidade de capturar sinais fracos de sensores distantes aumenta a confiabilidade da rede.

#### c) *Filtragem de Dados*

- **Função:**
  - **Filtragem de Pacotes:** O gateway pode filtrar pacotes de dados para remover duplicatas e descartar pacotes corrompidos ou irrelevantes.
  - **Agregação:** Consolida dados recebidos de múltiplos sensores para reduzir o volume de dados transmitidos para o servidor central.
- **Importância:**
  - **Eficiência:** Reduz a quantidade de dados transmitidos, economizando largura de banda e recursos de processamento no backend.
  - **Qualidade dos Dados:** Assegura que apenas dados válidos e relevantes sejam processados posteriormente.

#### d) *Conversão de Protocolos*

- **Função:**
  - **Tradução de Dados:** Converte os dados recebidos dos sensores no formato de protocolo LPWAN para um formato compreensível pelos sistemas de backend (por exemplo, JSON, MQTT).
  - **Interoperabilidade:** Garante que diferentes tipos de sensores e dispositivos possam se comunicar com o backend independentemente do protocolo específico que utilizam.
- **Importância:**
  - **Flexibilidade:** Permite a integração de uma variedade de dispositivos e sensores de diferentes fabricantes.
  - **Compatibilidade:** Facilita a comunicação com diferentes plataformas de IoT e sistemas de análise de dados.

#### e) *Transmissão de Dados*

- **Função:**
  - **Envio de Dados:** Transmite os dados processados e filtrados para servidores backend ou plataformas de nuvem através de redes IP (como Ethernet, Wi-Fi, 4G/5G).
  - **Redundância e Backup:** Pode utilizar múltiplos canais de comunicação para garantir a transmissão dos dados, mesmo em caso de falha em um dos canais.
- **Importância:**
  - **Confiabilidade:** Garante que os dados coletados cheguem ao destino sem perdas.
  - **Escalabilidade:** Suporta a transmissão de grandes volumes de dados de maneira eficiente.

#### f) *Segurança*

- **Função:**
  - **Criptografia:** Implementa criptografia para proteger os dados durante a transmissão.
  - **Autenticação:** Verifica a autenticidade dos dispositivos e sensores conectados ao gateway.
  - **Firewall e Controle de Acesso:** Protege contra acessos não autorizados e ataques cibernéticos.

- Importância:
  - Proteção de Dados: Assegura que dados sensíveis não sejam interceptados ou adulterados.
  - Integridade do Sistema: Mantém a rede segura contra intrusões e malwares.

*g) Gerenciamento de Dispositivos*

- Função:
  - Configuração Remota: Permite a configuração e atualização remota dos sensores e dispositivos conectados.
  - Monitoramento e Diagnóstico: Monitora o status dos dispositivos e sensores, detectando falhas ou problemas de desempenho.
- Importância:
  - Manutenção Proativa: Facilita a manutenção preventiva e corretiva, reduzindo o tempo de inatividade.
  - Eficiência Operacional: Permite ajustes e otimizações sem a necessidade de intervenção física.

*h) Localização e Sincronização de Tempo*

- Função:
  - GPS/GLONASS: Alguns gateways incluem módulos de localização para fornecer dados de localização dos dispositivos.
  - Sincronização de Tempo: Sincroniza os dados coletados com um relógio de tempo padrão (NTP) para garantir a precisão temporal dos dados.
- Importância:
  - Rastreamento de Ativos: Permite o rastreamento preciso de dispositivos móveis, como gado ou veículos agrícolas.
  - Precisão de Dados: Assegura que os dados coletados sejam temporalmente precisos e sincronizados.

*i) Interface de Usuário e APIs*

- Função:
  - Interface Web: Oferece uma interface web para configuração, monitoramento e gerenciamento do gateway.
  - APIs: Disponibiliza APIs para integração com sistemas de terceiros e plataformas de IoT.
- Importância:
  - Facilidade de Uso: Simplifica a configuração e o gerenciamento do gateway.
  - Integração: Facilita a integração com outros sistemas e plataformas, permitindo a criação de soluções personalizadas.

*Conclusões:*

Os gateways de agregação LPWAN são componentes essenciais na infraestrutura de IoT agrícola. Eles garantem que os dados coletados pelos sensores sejam transmitidos de forma eficiente, segura e confiável para os sistemas de backend.

Essas funções básicas – recepção, filtragem, conversão, transmissão, segurança, gerenciamento, localização e interfaces – asseguram uma operação fluida e otimizada, permitindo que os agricultores tomem decisões informadas e melhorem a eficiência de suas operações.

## 7.3.4 Rede de Comunicações de Longa Distância (Camada 2.2 Gateways/Sensores/Atuadores ↔ Rede de Serviços)

### 7.3.4.1 Redes Terrestres

Embora grande parte da área rural no Brasil seja desprovida de infraestrutura de telecomunicações de qualidade, existem opções terrestres capazes de prover solução de conectividade IoT com custo/benefício atraente, principalmente se aplicações de alta e baixa capacidade combinadas são economicamente viáveis. Exemplos são:

- **Implementação de redes celulares 4G/5G rurais:**

- Uso de frequências mais baixas (600-700 MHz) para maior alcance.
- Instalação de pequenas células para cobertura localizada.
- Backhaul empregando Tecnologia de TV White Space (TVWS):
  - Utiliza frequências de TV não utilizadas para transmissão de dados.
  - Oferece boa penetração e alcance em áreas rurais.
- Rede celular privada: Empresas agrícolas podem instalar redes privadas 4G/5G para garantir cobertura e controle total sobre a rede.
- Uso de rede via satélite como backhaul:
  - Melhoria nas tecnologias existentes para oferecer maior velocidade e menor latência, empregando redes de satélites geoestacionários ou não-geoestacionários.
  - Ideal para áreas onde outras soluções não são viáveis.
- Uso de tecnologia 5G RedCap (Reduced Capability): A classe de dispositivos 5G NR RedCap (abreviação de "capacidade reduzida") é um padrão relativamente novo projetado para suportar uma nova classe de dispositivos que podem se beneficiar de algumas vantagens do 5G (como alta velocidade, latência ultrabaixa e alta confiabilidade), mas que simplesmente não requerem as capacidades do 5G completo. O 5G completo é impraticável e desnecessariamente caro para muitos casos de uso IoT, de forma que 5G NR RedCap substitui o padrão LTE Cat 4 suportando dispositivos de média capacidade, para aplicações como IoT mais exigentes, como controle de máquinas complexas com imagens em tempo real.

Esta tecnologia 5G NR RedCap foi introduzida na *Release 17* do 3GPP com o objetivo de incrementar o uso de NR. Opera apenas com uma banda de 20 MHz, sem agregação de portadoras, apresentando capacidade semelhante ao LTE Cat 4, i.e., capacidade de download (estação rádio base para usuário) próximo a 150 Mbps e 50 Mbps no sentido inverso (upload).

Em sequência, no *Release 18*, foram definidos dispositivos eRedCap (de *Enhanced RedCap*), os quais simplificam ainda mais a complexidade de dispositivos com desempenho reduzido, com banda de apenas 5 MHz e desempenho em paridade com LTE Cat 1: cerca de 10 MHz de banda e capacidade de 10Mbps para download e de 5 Mbps para upload.

Como indicado na figura 5, os novos dispositivos criados pelas Releases 17 e 18 cobrem um gap entre as três pontas do conhecido triângulo de aplicações do 5G, viabilizando o uso de terminais de menor custo para aplicações IoT que requerem uma taxa média de dados, superior às aplicações típicas de comunicações massivas entre máquinas (5GmMTC) e inferiores as aplicações móveis de banda larga de alta vazão (5GeMBB), porém ainda apresentando uma baixa latência e boa confiabilidade, ainda que não adequada a aplicações críticas de Ultra Confiabilidade e Baixa Latência (5G URLLC).



Figura 5 – 5G NR RedCap no Rel. 17 do 3GPP e evolução futura para NR eRedCap no Rel. 18

- **Redes mesh sem fio:**
  - Cria uma rede interconectada de pontos de acesso.
  - Permite que comunidades rurais compartilhem e estendam a conectividade.
- **Redes rádio em microondas Ponto-a-Ponto (P2P) ou Ponto-Multiponto**
  - *P2P (Ponto a Ponto) de rádio em micro-ondas:* Consiste em links diretos entre dois pontos fixos, utilizada principalmente para backhaul de redes, links corporativos dedicados ou interconexão entre locais distantes, com antenas altamente direcionais.
  - Geralmente opera em frequências mais altas (6-86 GHz), com topologia linear ou em forma de estrela, onde cada conexão é independente e dedicada entre dois pontos específicos.
  - Cada novo ponto requer equipamento dedicado e novo link
- **FWA (Fixed Wireless Access)**
  - O 5G FWA é a primeira tecnologia sem fio capaz de oferecer baixa latência e altas velocidades comparáveis às conexões de fibra óptica. Portanto, oferece uma alternativa competitiva e econômica para consumidores em ambientes urbanos onde xDSL, cabo ou fibra anteriormente monopolizavam o mercado. A ausência de cabos também torna o FWA ideal para conectar locais remotos ou mal atendidos onde a instalação de cabos seria muito cara ou difícil, tornando-o uma tecnologia fundamental para reduzir a exclusão digital.
- **Fibra óptica rural:**
  - Investimento em infraestrutura de fibra óptica para comunidades rurais.
  - Parcerias público-privadas para financiar a expansão.
- **Tecnologias de linha de energia (PLC):**
  - Utiliza linhas de energia existentes para transmissão de dados.
  - Aproveita a infraestrutura elétrica já presente em áreas rurais.

A implementação eficaz dessas soluções geralmente requer uma combinação de abordagens, adaptadas às necessidades e condições específicas de cada região rural. Além disso, o sucesso dessas iniciativas muitas vezes depende de políticas governamentais de apoio, investimentos em infraestrutura e colaboração entre setores público e privado.

A tabela a seguir mostra um comparação geral entre as tecnologias consideradas:

Tecnologia	Velocidade	Latência	Cobertura	Custo	Confiabilidade
LTE (4G)	Até 100 Mbps	~30-50 ms	Alta (urbana / suburbana)	Moderado	Alta
5G	Até 10 Gbps	<10 ms	Média (expansão contínua)	Alto	Alta
6G (Futuro)	Esperada >10 Gbps	<1 ms (esperada)	Planejada global	Alto (no início)	Alta (esperada)
Rádio Micro-ondas	Alta (depende da configuração)	Baixa	Limitada (linha de visão)	Alto	Alta
Satélite	Moderada a Alta	500ms (GEO) 150ms (MEO) 10-30ms (LEO)	Global, Nacional ou Regional	Baixo a moderado	Moderada (clima dependente)

### 7.3.4.2 Redes Não Terrestres (NTN – Non-Terrestrial Networks)

#### 7.3.4.2.1 Introdução

As redes terrestres tradicionais nem sempre são capazes de atender a demanda de conectividade requerida pelo agronegócio, especialmente em áreas remotas e de difícil acesso. Mesmo em locais aonde conectividade celular pode ser acessada de forma econômica, áreas de sombra podem ser inevitáveis devido a topologia do terreno ou algum outro fator de bloqueio de sinal.

Nesse contexto, as **Redes Não-Terrestres (NTN)** surgem como uma solução promissora, oferecendo uma alternativa robusta para garantir a conectividade em regiões onde a infraestrutura terrestre é limitada.

As redes NTN incluem as seguintes redes:

- **Redes espaciais**, englobando as constelações geossíncronas (em órbita GEO ou GSO<sup>19</sup>), constelações de satélites de baixa órbita (LEO) e de órbita média (MEO);
- **Redes Aéreas** emergentes, tanto de **elevada altitude** com balões estratosféricos e aviões autônomos de propulsão elétrica, como de **baixa altitude**, basicamente usando drones,

A importância dessa tecnologia foi reconhecida pelo 3GPP, o principal órgão de padronização de comunicações móveis, nos releases 16, 17, 18 e subsequentes. Esses releases introduziram e aprimoraram funcionalidades para integrar NTN ao sistema 5G, adaptando procedimentos de camada física e arquiteturas de rede para lidar com desafios específicos, como longos atrasos de propagação e deslocamentos Doppler.

Entre os benefícios dessa integração estão a rapidez de implantação, a ampla cobertura e a resiliência das redes. Essas vantagens são especialmente relevantes para o agronegócio, que necessita de comunicações confiáveis para monitorar e gerenciar suas operações em tempo real, mesmo em áreas remotas.

No entanto, a integração de redes NTN e terrestres não está isenta de desafios. Questões técnicas, como latência, *handover* e interferência, bem como padronização e interoperabilidade, representam barreiras significativas. Além disso, marcos regulatórios e modelos de negócios precisam ser desenvolvidos para viabilizar essa integração.

A figura 6 apresenta constelações NTN típicas existentes e emergentes, enfatizando sua integração com as redes terrestres para uma oferta de conectividade ubíqua, a visão futura da ITU.

<sup>19</sup>A órbita GEO(Geoestacionária) é um subconjunto da órbita GSO(geossíncrona). As diferenças fundamentais estão na inclinação (*i*) e excentricidade (*e*) dos seus planos orbitais. Enquanto na GEO  $i = e = 0$ , na GSO, ambos podem ser = ou  $\neq$  de 0.

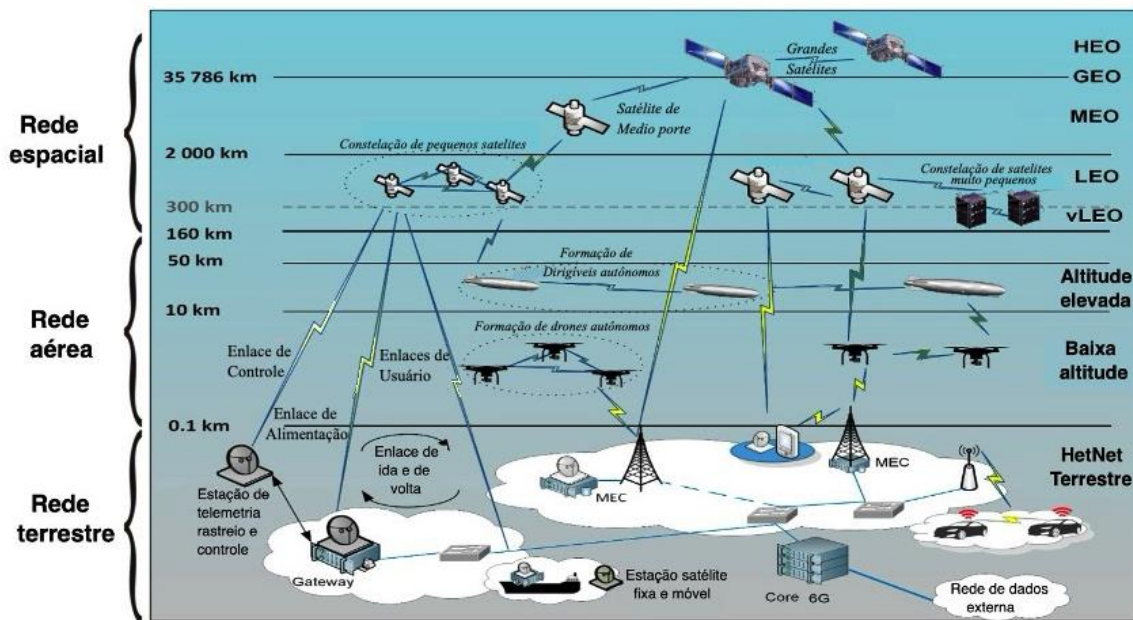


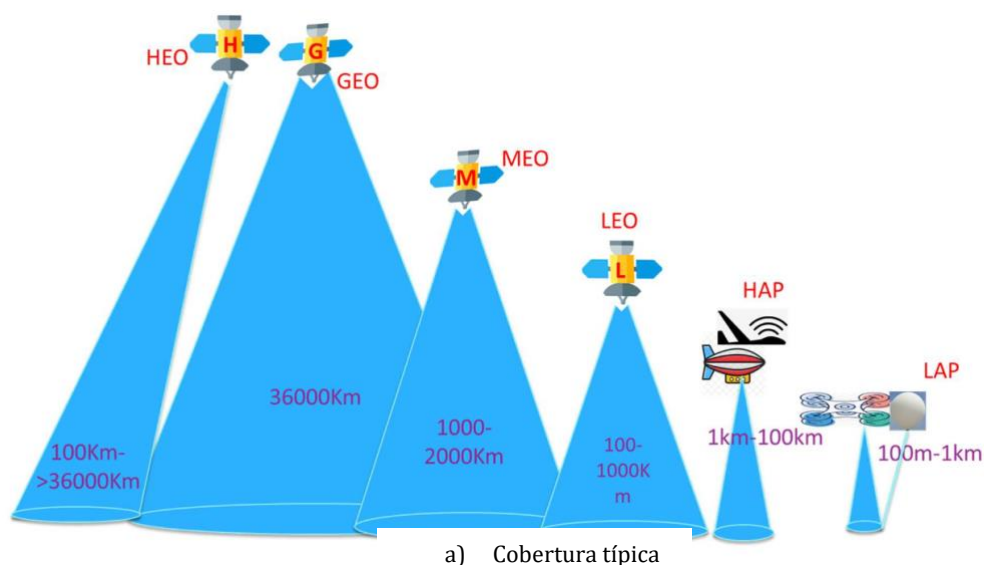
Figura 6 – Redes Não-Terrestres

- **GEO**- Órbita Terrestre Geoestacionária
- **MEO**- Órbita Terrestre Média;
- **LEO**- Órbita Terrestre Baixa;
- **HeTNet** – Redes Heterogêneas
- **HTS/VHTS**-Satélite de Alta Vazão/Satélite de Vazão Muito Alta;
- **HAPS** - Plataforma de Estação de Elevada Altitude;
- **LAPS** - Plataforma de Estação de Baixa Altitude
- - Enlaces entre dispositivos NTN
- - Enlaces entre Dispositivos NTN e TN

Cada uma das redes Não-Terrestres apresentadas na figura 6 tem suas vantagens e limitações em termos de cobertura, latência, capacidade, disponibilidade e custo, como exemplificado na figura 7.

Tais características definem as classes de aplicações para as quais cada uma delas apresenta o melhor custo/benefício, não havendo uma rede única capaz de atender com a mesma eficiência qualquer tipo de aplicação.

Portanto, embora já existam exemplos de uso de redes NTN em vários ecossistemas, tais redes são baseadas em soluções proprietárias e, de modo geral, dedicadas a aplicações específicas sem interação com os outros tipos de rede.



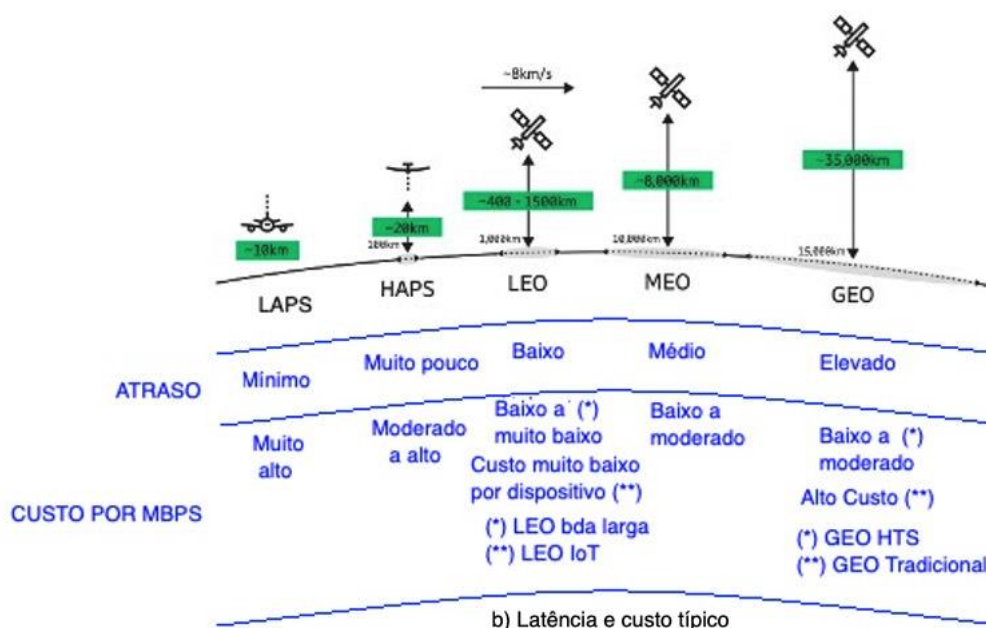


Figura 7 : Características típicas das redes NTN; (a) cobertura; (b) atraso e custo

Este cenário, no entanto, está em processo de mutação, pois estamos entrando na próxima geração da IoT via redes não-terrestres com protocolos padronizados, viabilizando integração multirredes.

Os avanços na tecnologia espacial (naves espaciais e lançadores) e em HAPS e LAPS (e.g., Drones) estão capacitando os novos dispositivos não terrestres para complementar as redes terrestres naturais, expandindo sua abrangência e contribuindo para aumentar sua resiliência e disponibilidade.

### 7.3.4.2.2 As Releases 3GPP que definem as redes NTN

Nas Releases 17 e 18, o NTN é baseado em uma arquitetura transparente (bent-pipe), onde o gNB, em um exemplo clássico, está localizado no solo e o satélite atua como um repetidor de rádio, conforme mostrado em (a) na Figura 8. A arquitetura transparente foi adotada porque limita a complexidade da carga útil e permite uma implantação antecipada. Em princípio, até mesmo uma carga útil transparente já implantada anteriormente poderá ser reaproveitada para o NR NTN das Releases 17/18, desde que atenda aos requisitos corretos de RF nas faixas apropriadas.

A definição de "Nó de Acesso por Satélite" adotada na Release 17 pelo 3GPP RAN4 (o grupo de trabalho responsável pelos requisitos de RF e especificações de desempenho), na prática, foi além da arquitetura transparente clássica e possibilitou a distribuição de certas funções do gNB entre a Terra e o espaço, mantendo a aplicabilidade das especificações do RAN4. Veja figura 8 (b).

O trabalho contínuo do 3GPP na Release 19 é, por si só, um marco na integração das tecnologias via satélite (NTN, Redes Não Terrestres) ao 5G. A Release 19 incluirá NTN com uma carga útil regenerativa, ou de processamento de pacotes, na qual um gNB completo é colocado no satélite, arquitetura indicada na figura 8 (c).

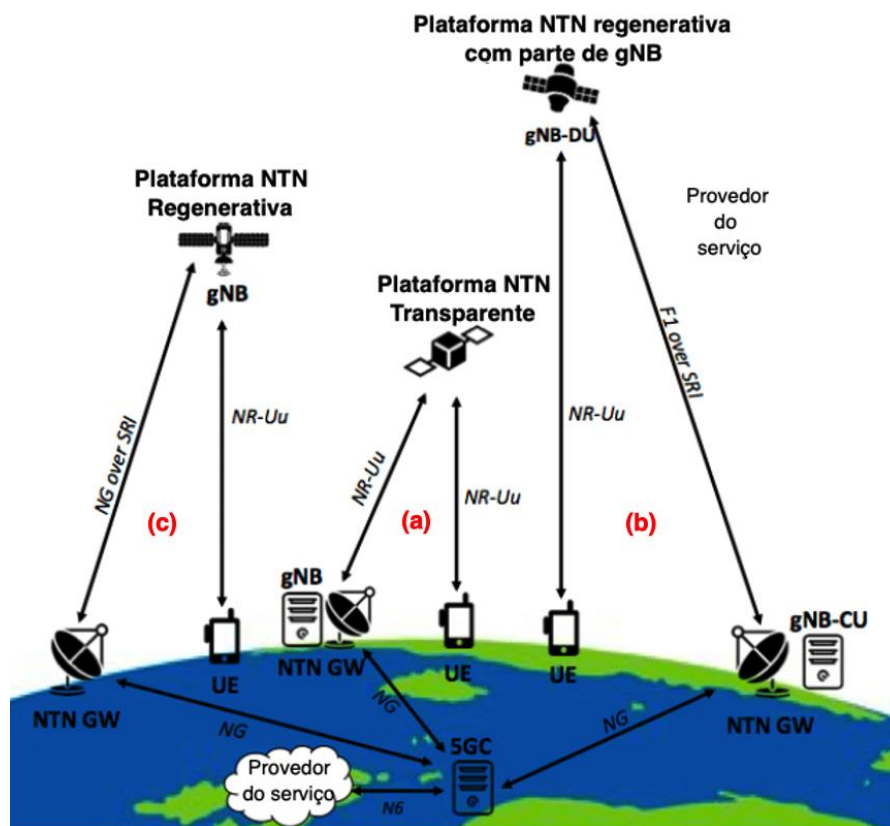


Figura 8 – Arquiteturas planejadas nas releases 17(a), 18(b) e 19(c)<sup>20</sup>

Significado das siglas na figura:

- **NG**: Interface entre o **5GC** (**5G Core**) e uma **gNB** (**5G new generation Node Base**);
- **NR-Uu**: **New Radio Uu**, Interface entre um **UE** (**User Equipment**) e uma gNB;
- **NG over SRI**: Interface NG adaptada à **Satellite Radio Interface**, interface entre a Gateway NTN e a gNB no satélite;
- **gNB-DU** e **gNB-CU**: O 5G NR (New Radio) separa as funções da gNB, além da Unidade de Rádio (RU) em **Unidades Distribuídas** (DU) e **Unidades Centralizadas** (CU);
- **F1**: É a Interface de conexão entre uma DU e uma CU;
- **F1 over SRI**: Interface F1 adaptada à SRI, interligando uma gNB-DU no satélite à uma gNB-CU na terra.

As três principais arquiteturas em consideração são:

#### a) Arquitetura NG-RAN baseada em satélite transparente.

Neste caso, o Satélite/NTN atua como um repetidor, realizando a conversão de frequência e amplificação de RF, funcionando como um repetidor analógico de RF, deixando toda a inteligência no gNodeB no solo.

Uma implementação mais avançada também pode fazer uso de múltiplos gNodeBs conectando-se a um único Satélite/NTN. Como a lógica está no gNodeB no solo, é possível atualizá-lo com novos softwares e funcionalidades sem problemas.

#### b) Arquitetura NG-RAN baseada em satélite regenerativo com gNB-DU a bordo.

Essa arquitetura aproveita a arquitetura lógica do NG-RAN com a separação CU/DU. A Unidade Central (CU) está localizada no solo, enquanto a Unidade Distribuída (DU) está a bordo do

<sup>20</sup> Fonte: Technology Development CTIO - Architecture & Technology Evolution – TIM- 2022

Satélite/NTN. Essa arquitetura também permite que DUs em diferentes Satélites/NTNs sejam conectadas à mesma CU no solo.

Como os DUs no Satélite/NTN precisam de conexão com a CU no solo, essa arquitetura não funcionaria muito bem para satélites em órbita baixa (LEO). Por outro lado, a flexibilidade de conectar múltiplos DUs a uma única CU significa que o processamento pode ser distribuído e a conectividade com o 5GC pode ser simplificada.

### c) Arquitetura NG-RAN baseada em satélite regenerativo com gNB a bordo.

Neste caso, todo o gNodeB está localizado no Satélite/NTN. A Interface de Rádio via Satélite (SRI) carrega a interface NG.

A figura 8 é mostrada sem nenhum Link Inter-Satélite (ISL) com espaçonaves vizinhas, porém essa facilidade é prevista nesta arquitetura, através da interface **Xn**.

Na verdade, a arquitetura pode ser estendida para que gNodeBs terrestres e não-terrestres se comuniquem entre si. Embora essa arquitetura possa introduzir desafios significativos de implantação, ela também pode oferecer liberdade para que diferentes NTN se conectem de forma independente entre si. Ela pode funcionar bem com satélites LEO.

Soluções NTN, baseadas no Release 17 do 3GPP, já estão sendo empregadas diretamente terminais móveis existentes e dispositivos IoT sem a necessidade de infraestrutura terrestre (modelo "towerless")

A principal distinção entre as releases é que a Release 17 estabelece as bases fundamentais para NTN, enquanto a Release 18 traz otimizações e funcionalidades mais avançadas para melhorar a integração e o desempenho do sistema, tarefa acelerada na release 19 e seguintes.

#### 7.3.4.2.3 Inovações recentes em tecnologia de satélites para IoT

Por conta das mencionadas novas especificações introduzidas pelo Release 17 do 3GPP, viabilizando o emprego da conectividade satélite nas órbitas GEO, MEO e LEO, houve uma reação imediata dos provedores de soluções espaciais, principalmente nas constelações de satélite LEO:

- **Constelações de satélites LEO de alta capacidade**, como **Starlink**, **OneWeb** e **Amazon LEO (antiga Kuiper)**, oferecem cobertura global com menor latência.
- Com relação ao uso dessas redes em aplicações IoT de baixa capacidade, pelo menos a Starlink já anunciou que está adaptando futuras gerações de sua constelação e terminais associados de baixo dedicados a IoT. A previsão de entrada em operação comercial desta solução é no segundo semestre de 2025.
- **Outras constelações de nanosatélites LEO emergentes, mais simples e menor custo, dedicadas a aplicações IoT** com transmissão de mensagens curtas (e.g., **SatelIoT**, **Myriota**, **Knéis**, **OQ technology**, **Swarm Technologies** (adquirida pela Space X), **Fleet Space Technologies**, **Lacuna Space** (compatível com LoRaWAN), **Astrocast** e outros).
- Tendo em vista a grande penetração de celular 4G/5G no Brasil (a maioria dos dispositivos IoT no país possui interface rádio NB-IoT, ou CAT-1 /CAT1-Bis), as constelações LEO para IoT mais atraentes são as que utilizam **soluções de conectividade compatíveis com a Res 17 do 3GPP na aplicação de conectividade direta de Satélite a Dispositivos IoT (S2D – Satellite-to-Device)**. Exemplos de constelações LEO com tais características, normalmente sistemas que combinam infraestrutura terrestre e espacial, com o rádio NB-IoT sendo capaz de se comunicar com qualquer dispositivo móvel padrão tanto via rede terrestre como via rede satélite IoT são:
  - OQ Technology - uma empresa que oferece conectividade IoT via satélite LEO usando tecnologia 5G NB-IoT híbrida, conforme indicado na figura 9:

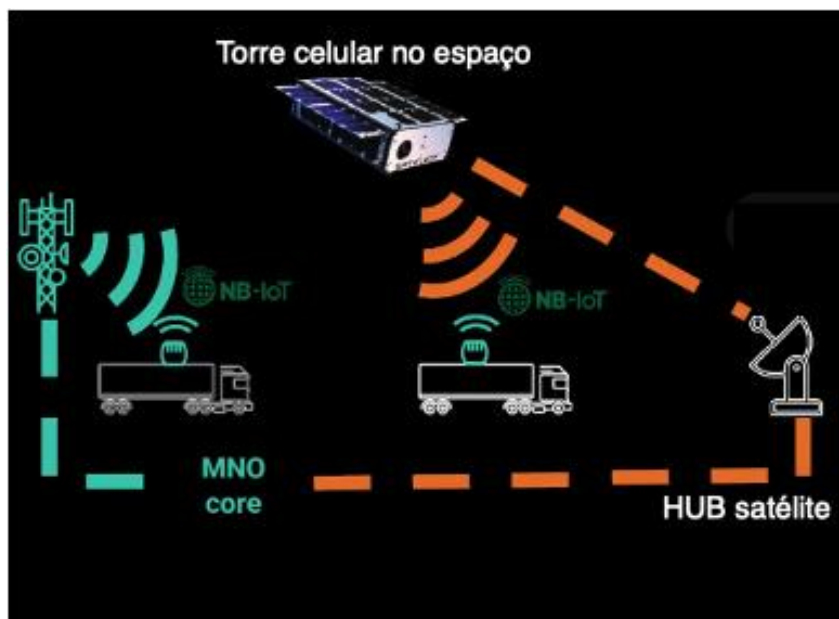


Figura 9 – Arquitetura S2D: o mesmo modem se conecta a uma radio base terrestre ou espacial. Fonte: OQ Technology

- Myriota, que se define como uma empresa de telecomunicações para inteligência global de campo, anunciou no primeiro semestre de 2025 o lançamento do Myriota HyperPulse, um serviço de Rede Não Terrestre de Banda Estreita (NB-NTN) baseado no padrão 3GPP 5G, desenvolvido em parceria com a Viasat / Inmarsat.

O Myriota HyperPulse é a primeira solução desse tipo alimentada pela capacidade de *leasing dinâmico* da Viasat, que permite que parceiros como a Myriota aumentem ou diminuam a sua conectividade por satélite de forma dinâmica, conforme a demanda. Os clientes do Myriota HyperPulse se beneficiarão da rede global altamente confiável de banda L geoestacionária da Viasat (satélites Inmarsat) e do espectro compatível com 3GPP, juntamente com a plataforma híbrida de gerenciamento de rede da Myriota e tecnologia de conectividade por satélite LPWA (baixa potência, ampla área).

Outros sistemas, como Iridium Next, ORBCOMM, Globalstar, Thuraya IoT e outros, oferecem diferentes características em termos de latência, cobertura global, consumo energético e custo, adaptando-se a diferentes necessidades de aplicações IoT em áreas remotas ou com infraestrutura terrestre limitada.

#### 7.3.4.2.4 HAPS (High Altitude Platform Station)

HAPS são plataformas estratosféricas que operam entre 17 e 25km de altitude, viabilizando acesso fixo ou móvel à banda larga com infraestrutura mínima, utilizando as mesmas frequências e dispositivos de usuário das redes móveis IMT<sup>21</sup>, ou seja, operando como estações base IMT e por isso denominadas HIBS (High Altitude Platform Stations as IMT Base Stations).

Tais "estações base voadoras" fornecem serviços de comunicação a partir de aeronaves que permanecem na estratosfera, onde os ventos são relativamente calmos durante todo o ano, como indicado na figura 10.

Isso permite a comunicação direta com dispositivos móveis, como os smartphones que usamos diariamente, e sua maior proximidade com o solo, em comparação com os satélites GEO e LEO, possibilita uma comunicação de baixa latência.

<sup>21</sup> International Mobile Telecommunications. Na WRC-23 (Word Radio Conference de 2023), as discussões principais sobre os HAPS se concentraram no estabelecimento de requisitos regulatórios que permitam que os HAPS operem como estações-base IMT (HIBS) em faixas destinadas ao serviço móvel.

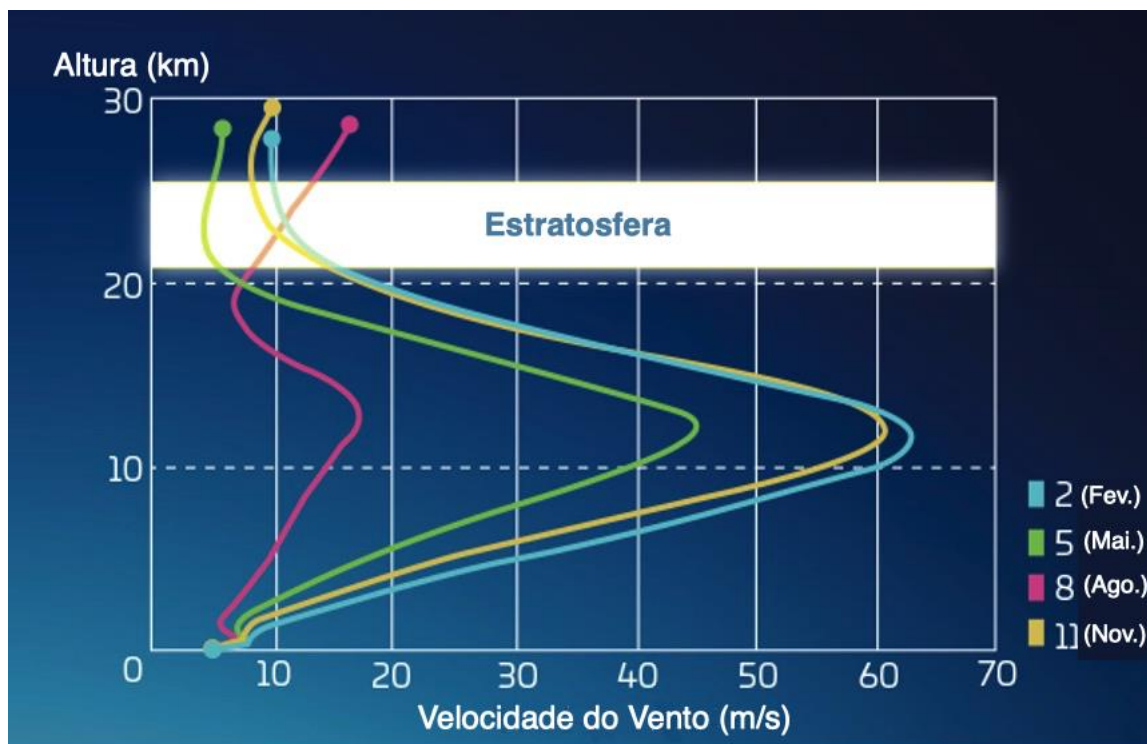


Figura 10 – Faixa de altitude típica dos HAPS <sup>22</sup>

Existem dois tipos de sistemas de aeronaves para o HAPS. O tipo LTA (Lighter Than Air), que é mais leve que o ar e usa flutuabilidade para manter o voo, e o tipo HTA (Heavier Than Air) de asa fixa, que permanece no ar com sustentação como um avião.

- *Lighter Than Air HAPS System*

A Plataforma LTA (figura 11) é um dirigível não tripulado de estrutura rígida, sustentado pelo hélio, que é mais leve que o ar, podendo permanecer na estratosfera por longos períodos de tempo.

A grande variedade de cargas úteis que podem ser transportadas pelo sistema HAPS permite seu uso em uma ampla gama de situações no futuro.

O serviço pré-comercial do HAPS está programado para começar no Japão em 2027 para a restauração das áreas de serviço em caso de desastre e para fornecer serviços de comunicação estáveis.



Figura 11 – Plataforma HAPS tipo LTA

Exemplos são os projetos da AALTO (spin-off da Airbus) “Zephyr” e da HAPSMobile (SoftBank) “Sunlider”, mostrados nas figuras 12 e 13 abaixo.

<sup>22</sup> Fonte: <https://www.softbank.jp/en/corp/philosophy/technology/special/ntn-solution/haps/>  
[www.union.eng.br](http://www.union.eng.br)



Figura 12 - AALTO HAPS ZEPHYR HAPS. Fonte: Airbus



Figura 13 – HAPSMobile (Softbank) SUNGLIDER HAPS. Fonte: Softbank

Algumas empresas estão testando o fornecimento de acesso de banda larga via HAPS utilizando aeronaves leves e dirigíveis movidos a energia solar, a uma altitude de 20 a 25 quilômetros, operando continuamente por vários meses.

- Na WRC-23, as principais discussões sobre HAPS concentraram-se no estabelecimento de requisitos regulatórios que permitiriam que as HAPS operassem como estações base IMT (HIBS) em faixas alocadas ao serviço móvel.
- A tecnologia HAPS oferece uma nova plataforma para fornecer acesso de banda larga móvel com infraestrutura mínima, utilizando as mesmas frequências e dispositivos de usuário das redes móveis IMT. As HIBS podem contribuir para reduzir a exclusão digital em áreas remotas e rurais e manter a conectividade durante desastres.

#### 7.3.4.2.5 Resumo de Conexões NTN

##### I – Espaciais e Híbridas

###### a) Constelações de nanossatélites dedicadas para IoT:

- o SatelIot
- o Astrocast
- o Swarm Technologies (adquirida pela SpaceX)
- o Lacuna Space (compatível com LoRaWAN)
- o Myriota
- o Fleet Space Technologies

**b) Sistemas de comunicação direta IoT-satélite:**

- o Iridium IoT
- o Inmarsat IoT
- o ORBCOMM
- o Globalstar
- o Thuraya IoT

**c) Sistemas híbridos terrestres-espaciais:**

- o LoRaWAN com extensão satelital
- o OQ Technology
- o SatelIoT

## **II - Aéreas**

**d) Infraestrutura baseada em aeronaves ou dirigíveis** - Sistemas que utilizam aeronaves como plataformas de comunicação para dispositivos IoT em terra. Tais sistemas oferecem diferentes características em termos de latência, cobertura global, consumo energético e custo, adaptando-se a diferentes necessidades de aplicações IoT em áreas remotas ou com infraestrutura terrestre limitada.

### **7.3.5 Infraestrutura de Análise de Dados**

- Computação em nuvem para armazenamento e análise de dados
- Computação de borda para processamento em tempo real
- Aplicações de aprendizado de máquina e IA no agrobusiness, por exemplo:
  - o *Previsão de safra*: Combinando dados históricos com informações em tempo real, é possível fazer previsões mais precisas de rendimento das safras, ajudando no planejamento de colheita, armazenamento e logística.
  - o *Aplicação precisa de insumos*: Dados detalhados permitem a aplicação localizada de fertilizantes, pesticidas e outros insumos, reduzindo custos, minimizando o impacto ambiental e aumentando a eficácia dos tratamentos.

## **8 Desafios e Soluções**

### **8.1 Desafios técnicos (ex.: conectividade, escalabilidade)**

A implantação de soluções de Internet das Coisas (IoT) no meio rural brasileiro esbarra, antes de tudo, em um obstáculo estrutural: a desigualdade de cobertura de telecomunicações entre áreas urbanas e rurais. Segundo dados consolidados pela Conexis Brasil Digital [19], aproximadamente 25% do território nacional ainda permanece sem cobertura móvel adequada, concentrando-se justamente em regiões de produção agropecuária extensiva. Esse cenário é corroborado pelos painéis de acompanhamento da Agência Nacional de Telecomunicações [20], que evidenciam baixa densidade de Estações Rádio Base (ERBs) em municípios de vocação agrícola no Centro-Oeste e na Amazônia Legal.

A McKinsey & Company estima que "menos de 25% das fazendas no mundo utilizam atualmente qualquer tipo de conectividade avançada" [21], o que limita drasticamente o potencial econômico já mensurado pela mesma consultoria — ganhos de produtividade entre 5% e 20% e redução de insumos da ordem de 10% a 30%.

No plano das tecnologias de comunicação, a literatura técnica destaca o papel das redes LPWAN (Low-Power Wide-Area Networks) como alternativa econômica para cobertura de longas distâncias com baixo consumo energético. Conforme demonstram Mekki et al. [22], tecnologias como LoRaWAN, Sigfox e NB-IoT apresentam trade-offs distintos entre alcance, taxa de dados e custo, sendo o LoRaWAN particularmente adequado a cenários agrícolas pela operação em faixas não licenciadas. Estudos comparativos em países em desenvolvimento, como o conduzido por

Ugwuanyi, Paul e Irvine [23], reforçam que o NB-IoT supera o LoRaWAN em confiabilidade quando há cobertura celular, mas perde em viabilidade econômica em áreas remotas. Como complemento promissor, Kovalchukov et al. [24] apresentam o DECT-2020 New Radio como evolução para comunicações massivas (mMTC) compatíveis com 5G.

Outro desafio crítico diz respeito à interoperabilidade entre dispositivos e plataformas. A fragmentação de protocolos proprietários é apontada por Yang et al. [25] como um dos principais entraves à escalabilidade de fazendas digitais. Iniciativas como o ADAPT, mantido pela AgGateway [26], e os padrões ISOBUS (ISO 11783) buscam mitigar esse problema mediante a padronização da troca de dados entre máquinas e softwares de gestão.

Por fim, a segurança cibernética emerge como dimensão crítica. Gupta et al. [27] identificam vulnerabilidades específicas da agricultura inteligente, incluindo ataques de envenenamento de dados em modelos de aprendizado de máquina, sequestro de drones e comprometimento de sistemas SCADA em irrigação automatizada. Os autores defendem que "a natureza distribuída e heterogênea dos sistemas agrícolas conectados exige arquiteturas de segurança fundamentalmente distintas das adotadas em ambientes urbanos" [27].

## 8.2 Barreiras econômicas e financeiras

Apesar dos benefícios documentados, a adoção de IoT no campo brasileiro permanece concentrada em grandes propriedades empresariais. O Censo Apesar dos benefícios documentados, a adoção de IoT no campo brasileiro permanece concentrada em grandes propriedades empresariais. O Censo Agropecuário 2017 [28] revela que aproximadamente 77% dos estabelecimentos rurais brasileiros enquadram-se na agricultura familiar, segmento marcado por restrições de capital e acesso a crédito tecnológico. Inamasu e Bernardi [29] já alertavam que a difusão da agricultura de precisão dependeria fortemente de modelos econômicos adaptados à realidade dos pequenos e médios produtores.

A análise de retorno sobre investimento (ROI) das soluções IoT, conforme Goedde et al. [21], indica que ganhos potenciais de até USD 500 bilhões em valor adicional ao PIB agrícola global até 2030 só serão capturados se os custos unitários de sensores, gateways e serviços de dados continuarem em trajetória descendente. A Embrapa [30], em seu documento Visão 2030, projeta que a digitalização será um dos sete megatemas estruturantes para a competitividade do agronegócio brasileiro nas próximas décadas.

No tocante às políticas de financiamento, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social mantém linhas específicas como o Programa Inovagro [31], voltado à incorporação de inovação tecnológica nas propriedades rurais, embora o Manual de Crédito Rural [32] ainda apresente lacunas no enquadramento de ativos intangíveis, como licenças de software e serviços em nuvem.

Quanto aos modelos de negócio, Porter e Heppelmann [33] argumentam que produtos inteligentes e conectados redefinem cadeias de valor inteiras, favorecendo a transição de vendas pontuais para modelos de serviço recorrente (Equipment-as-a-Service e Data-as-a-Service). Esse movimento já se observa no ecossistema brasileiro de agtechs, que, segundo o Radar Agtech Brasil [34], ultrapassou 1.900 startups ativas em 2023, com forte concentração nos segmentos de gestão da propriedade e agricultura de precisão.

## 8.3 Preocupações regulatórias e de privacidade

A explosão de dados gerados em propriedades conectadas levanta questões jurídicas complexas sobre titularidade, finalidade e compartilhamento. No Brasil, a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais — Lei nº 13.709/2018 [35] — estabelece o regime geral de tratamento de dados, com efeitos diretos sobre informações de produtores rurais pessoa física e trabalhadores. A Autoridade Nacional de Proteção de Dados [36] tem publicado guias orientativos que reforçam princípios de minimização e finalidade, aplicáveis também a contextos agrícolas.

Especificamente quanto aos chamados "dados agrícolas", Wiseman et al. [37] observam que "produtores demonstram crescente relutância em compartilhar dados de suas operações por temor de uso adverso por agentes da cadeia, incluindo perda de poder de barganha em mercados

de commodities". Para enfrentar essa tensão, iniciativas internacionais como o *EU Code of Conduct on Agricultural Data Sharing* [38] e o programa *Ag Data Transparent* [39] propõem princípios contratuais voluntários que assegurem transparência, portabilidade e consentimento informado.

Na dimensão do espectro radioelétrico, a operação de redes LPWAN no Brasil é regida pela Resolução nº 680/2017 da ANATEL [40], que define condições para equipamentos de radiação restrita nas faixas sub-GHz. A entrada em operação de constelações de satélites de baixa órbita (LEO), como Starlink, OneWeb e Amazon Kuiper, ocorre mediante outorga específica da ANATEL e tem sido moldada pelas decisões da Conferência Mundial de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações [41], que ampliou o uso de plataformas estratosféricas (HIBS) e novas faixas IMT.

A rastreabilidade ambiental ganhou nova centralidade com a aprovação do Regulamento (UE) 2023/1115 sobre produtos livres de desmatamento [42], que impõe obrigações de georreferenciamento e diligência prévia a exportadores de commodities como soja, café e carne bovina. Esse marco regulatório afeta diretamente o setor produtivo nacional e dialoga com instrumentos brasileiros como o SISBOV [43].

Por fim, a Estratégia Nacional de Segurança Cibernética, instituída pelo Decreto nº 10.222/2020 [44], estabelece diretrizes que, embora generalistas, alcançam infraestruturas críticas do agronegócio, exigindo planos de resposta a incidentes que ainda são pouco difundidos no setor primário.

## 8.4 Soluções e direções futuras

A convergência entre redes terrestres e não terrestres aparece como a principal direção evolutiva para o problema da cobertura rural. As especificações 3GPP Release 17 e 18 [45] já contemplam suporte nativo a Non-Terrestrial Networks (NTN), permitindo que dispositivos NB-IoT e LTE-M se comuniquem diretamente com satélites em órbita baixa. Como destacam Lin et al. [46, p. 24], "a integração entre 5G NR e comunicações satelitais não é mais uma questão de viabilidade técnica, mas de modelos de negócio e regulação espectral".

No mercado, soluções já comercialmente disponíveis ilustram essa transição. A Myriota [47] anunciou o serviço HyperPulse, baseado no padrão NB-NTN, voltado a aplicações de baixíssima largura de banda, como rastreamento de gado e monitoramento de tanques. A OQ Technology [48] opera uma constelação dedicada a IoT satelital sob padrões 3GPP, enquanto a SpaceX, por meio do programa Direct to Cell [49], avança na conectividade direta a smartphones convencionais.

A edge intelligence é outra fronteira promissora. Warden e Situnayake [50] demonstraram a viabilidade de executar modelos de aprendizado de máquina em microcontroladores de baixíssimo consumo (TinyML), abrindo caminho para sensores autônomos capazes de processar dados localmente, reduzindo a dependência de conectividade contínua. Aplicações práticas dessa abordagem em agricultura são discutidas por Verdouw et al. [51], que propõem o conceito de gêmeos digitais (digital twins) como camada integradora entre sensores físicos, modelos preditivos e sistemas de decisão. Pylianidis, Osinga e Athanasiadis [52] complementam essa visão, mapeando casos de uso em sistemas produtivos vegetais e animais.

No horizonte temático da sustentabilidade, a IoT tende a se tornar infraestrutura crítica para a agricultura regenerativa e para a operação de mercados de carbono agropecuário. A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura projeta que "a transição para sistemas alimentares sustentáveis dependerá de saltos significativos em monitoramento, rastreabilidade e tomada de decisão baseada em dados" [53, p. 76]. No Brasil, o Plano ABC+ 2020–2030 [54] explicita metas de mitigação que pressupõem o uso intensivo de tecnologias digitais para mensuração de emissões e estoques de carbono no solo.

Quanto às tecnologias de próxima geração, a recomendação ITU-R M.2160 [41] consolida a visão IMT-2030 (6G), com pilares que incluem inteligência artificial nativa, sensoriamento integrado à comunicação (ISAC) e ubiquidade global. Como sintetizam Saad, Bennis e Chen [55, p. 134], "o 6G não será apenas mais rápido; será uma rede cognitiva, capaz de perceber o ambiente físico

em tempo real". A NGMN Alliance [56] reforça essa visão ao propor sustentabilidade e resiliência como métricas centrais do desenvolvimento das próximas redes.

Por fim, a robótica agrícola surge como locus de aplicação dessas tecnologias convergentes. Kootstra et al. [57] revisam o estado da arte em colheita seletiva robotizada, identificando como gargalos a percepção em ambientes não estruturados e a manipulação de produtos frágeis — desafios que aprendizado profundo embarcado e sensoriamento LiDAR [58] começam a equacionar.

## 9 Estudos de Casos e Exemplos

IoT via satélite permite o monitoramento em tempo real das condições do solo e das culturas por meio de sensores IoT instalados nos campos. Esses sensores coletam dados sobre a umidade do solo, temperatura e nutrientes, fornecendo aos agricultores informações precisas e em tempo hábil. Isso ajuda a otimizar a irrigação, a fertilização e o controle de pragas, aumentando a produtividade e reduzindo o desperdício.

Um dos exemplos pioneiros na implantação desta tecnologia foi incorporada à agricultura de precisão foi por meio de tratores habilitados para GPS da John Deere na década de 1990. A partir desse ponto, as fazendas, de comerciais a familiares, começaram a empregar métodos não tradicionais de mapeamento para otimizar suas operações. A razão para essa entrada de agtech<sup>23</sup> era lidar com os desafios que as técnicas agrícolas existentes estavam enfrentando, como plantio zoneado, gerenciamento do solo e muito mais.



Fig. 15 – Instalação do FarmShield

Por exemplo, o dispositivo FarmShield, da Synnefa (Quênia), é utilizado para coletar parâmetros agrícolas como umidade e temperatura do solo, os quais são retransmitidos pelo transceptor via satélite RockBLOCK 9602 utilizando o serviço Short Burst Data (SBD) da Iridium.

O uso da tecnologia gerou uma economia de mais de 50% no uso de água e uma redução de 41% na aplicação de fertilizantes (Figura 15)

Os dados do FarmShield são expressos no software FarmCloud, que prevê o momento ideal da colheita e a produtividade estimada, e até permite que os agricultores vendam sua produção com base nessas projeções. O sistema também oferece sugestões sobre as culturas mais produtivas para cada fazenda, proporcionando agricultura de precisão por meio de observação e medição.<sup>24</sup>

Ferramentas como essas estão diminuindo de custo à medida que a tecnologia se torna mais comum, e com preços mais baixos vem uma maior taxa de adoção nas fazendas. Isso significa que a agricultura inteligente será capaz de dar mais um passo à frente, e esta é uma ótima notícia para a indústria agrícola e a indústria eletrônica como um todo. A indústria agrícola é um campo de testes perfeito para novos eletrônicos, e ainda há muito potencial para inovação, já que existem alguns métodos para análise do solo que estão em uso há 30 anos.

<sup>23</sup> Agtechs são um modelo de startup focado em buscar soluções inovadoras para o agronegócio, seja através de novas tecnologias e softwares para o setor; alternativas energéticas, reaproveitamento de resíduos, monitoramento e controle ambiental ou biotecnologia

<sup>24</sup><https://www.groundcontrol.com/knowledge/case-studies/empowering-climate-resilience-through-satellite-enabled-precision-farming/>

## 10 Conclusão

### 10.1 Revolução Tecnológica do Agronegócio

As tecnologias de IoT têm o potencial de revolucionar a agricultura, aumentando a produção das culturas, melhorando o gerenciamento de recursos, permitindo o monitoramento em tempo real das condições ambientais, facilitando a agricultura de precisão e otimizando o gerenciamento da cadeia de suprimentos.

As novas tecnologias revolucionam três áreas-chave que compõem a agricultura moderna: agricultura digital, agricultura inteligente e agricultura de precisão. Embora haja, sem dúvida, uma sobreposição entre esses conceitos, cada categoria possui seu próprio valor distinto na agricultura moderna.

#### 10.1.4 Agricultura Digital

A agricultura digital utiliza dispositivos para coletar dados sobre áreas específicas de terra. Essas seções geralmente são de tamanho igual, homogêneas e localizadas com precisão. O processo de agricultura digital exige o uso de etiquetas e sensores embutidos, particularmente com o gado. A identificação eletrônica (EID) de animais de fazenda pode então ser usada para rastrear seus grupos de pastoreio e garantir que as estratégias corretas de pastoreio rotacional sejam implementadas. Os transponders embutidos são digitalizáveis e geralmente são compatíveis com leitores de mão ou plantas de processamento que podem ser conectados a eles.

As etiquetas eletrônicas estão lentamente substituindo as etiquetas impressas que têm sido usadas por muitos anos. Elas são mais caras do que as etiquetas impressas tradicionais, mas permitem um rastreamento muito mais preciso do gado. Isso cria rastreabilidade adicional da cadeia de suprimentos para esses animais destinados ao prato. Por exemplo, para provar que um restaurante ou varejista está usando carne de origem local, ela pode ser rastreada de volta ao animal de onde veio - e até mesmo quais campos, ração e fontes de água o animal entrou em contato durante sua vida útil.

Esse hardware também precisa de software compatível para funcionar corretamente. Esse software vem na forma de vários bancos de dados digitais e software qualitativo que podem armazenar e analisar efetivamente todos os big data coletados.

#### 10.1.5 Agricultura Inteligente

Os agricultores modernos passaram a depender de uma série de sensores distribuídos, que registram dados em tempo real enquanto referenciam as condições do campo. Esses dados são enviados para os aplicativos compatíveis para serem processados. Os pontos de dados são então usados para acionar equipamentos agrícolas usados para fertilização, irrigação e outras funções. Os dados também podem ser usados para sugerir planos de ação personalizados para os agricultores. Nesses processos, é tipicamente a inteligência artificial (IA) que faz a maior parte do processamento pesado.

Os sensores de localização são emparelhados com satélites GPS para funções de precisão e agricultura inteligente. Os sensores eletroquímicos usam seus diodos sensíveis a íons para testar o solo em busca de nutrientes e leituras de acidez. Os sensores ópticos leem as propriedades do solo usando a reflexão da luz, e os sensores mecânicos podem medir a compactação do solo, juntamente com o radar.

#### 10.1.6 Agricultura de Precisão

A agricultura de precisão na agricultura moderna é focada em precisão e otimização. O objetivo da agricultura de precisão e da AgTech envolvida é promover a criação de gado e o crescimento de culturas de forma centralizada e controlada. Várias tecnologias são usadas para alcançar isso:

- Software e hardware automatizados
- Drones autônomos, robótica e veículos
- Sistemas GPS
- Sensores
- Amostragem do solo

- Telemática

Tais tecnologias provocam um impacto significativo na agricultura de precisão, com potencial de aumentar significativamente a produtividade e reduzir custos viabilizando, entre outras, as seguintes aplicações:

- *Monitoramento em tempo real*: Sensores conectados via satélite podem fornecer dados contínuos sobre umidade do solo, temperatura, níveis de nutrientes e condições meteorológicas, permitindo aos agricultores tomar decisões informadas rapidamente, mesmo em áreas remotas sem conectividade terrestre.
- *Mapeamento e análise de culturas*: Imagens de satélite e drones, combinadas com dados de sensores no solo, oferecem uma visão abrangente da saúde das plantações. Agricultores podem identificar áreas problemáticas, como infestações de pragas ou deficiências nutricionais, antes que se tornem visíveis a olho nu.
- *Irrigação inteligente*: Sistemas de irrigação inteligentes baseados em dados de satélite e sensores no solo otimizam o uso da água e reduzem o desperdício de água e previnem a super irrigação, que pode levar à lixiviação<sup>25</sup> de nutrientes.
- *Gestão de frotas e equipamentos*: Rastreamento via satélite de tratores e outras máquinas agrícolas otimiza rotas e operações. Adicionalmente, manutenção preditiva baseada em dados de sensores pode prevenir quebras e reduzir tempo de inatividade.
- *Monitoramento de gado*: Rastreadores conectados por satélite podem monitorar a localização e saúde do gado em grandes pastagens, enviando alertas automáticos em caso de comportamento anormal ou problemas de saúde.
- *Integração de dados climáticos*: Acesso a dados meteorológicos globais permite melhores previsões e planejamento de longo prazo. Agricultores podem se preparar melhor para eventos climáticos extremos.
- *Acesso a mercados e informações*: Conectividade por satélite permite que agricultores em áreas remotas acessem informações de mercado, preços e tendências em tempo real. Isso pode melhorar a tomada de decisões sobre quando e onde vender seus produtos.
- *Automação e controle remoto*: Equipamentos agrícolas podem ser controlados remotamente via NTN, permitindo operações 24/7 e reduzindo a necessidade de mão de obra no campo.
- *Previsão de safra*: Combinando dados históricos com informações em tempo real, é possível fazer previsões mais precisas de rendimento das safras, ajudando no planejamento de colheita, armazenamento e logística.
- *Aplicação precisa de insumos*: Dados detalhados permitem a aplicação localizada de fertilizantes, pesticidas e outros insumos, reduzindo custos, minimizando o impacto ambiental e aumentando a eficácia dos tratamentos.
- *Rastreabilidade da Cadeia de Suprimentos*: Monitoramento via satélite de condições durante o transporte de produtos agrícolas, além da verificação de origem e qualidade dos produtos.

### 10.1.7 Agricultura Sustentável

Além disso, IoT e as novas tecnologias de conectividade possuem a capacidade não menos importante de promover práticas agrícolas mais sustentáveis, tais como:

- Mapas detalhados de variabilidade do solo e saúde das plantas permitem a aplicação localizada de fertilizantes e pesticidas, reduzindo o uso excessivo de produtos químicos, minimizando a contaminação do solo e da água.
- Monitoramento da saúde do solo e níveis de erosão via satélite ajuda a identificar áreas que necessitam de práticas de conservação, permitindo a implementação de técnicas de manejo do solo mais sustentáveis.
- Práticas de agricultura de precisão podem aumentar o sequestro de carbono no solo (Redução da pegada de carbono).

<sup>25</sup> Lixiviação é um processo de retirada de nutrientes do solo por diversos agentes naturais, especialmente a água.

- Monitoramento de habitats naturais e corredores ecológicos dentro de propriedades agrícolas ajuda a equilibrar a produção agrícola com a conservação da vida selvagem, potencializando a preservação da biodiversidade.
- Auxílio no cumprimento de regulamentações ambientais e certificações de sustentabilidade, uma vez que imagens de satélite em tempo real podem detectar atividades de desmatamento ilegal.
- Detecção precoce de infestações permite intervenções mais direcionadas e menos agressivas, reduzindo a dependência de pesticidas de amplo espectro.
- Dados climáticos precisos e previsões de longo prazo ajudam os agricultores a se adaptarem a condições em mudança, viabilizando a seleção de culturas e variedades mais resilientes para cada região.
- Monitoramento e controle remoto de equipamentos agrícolas otimizam o uso de energia e possibilita a integração mais eficiente de fontes de energia renovável nas operações agrícolas.
- Previsões mais eficientes de safra e o monitoramento de condições de armazenamento melhoram o gerenciamento pós-colheita, maximizando a redução de perdas na cadeia de suprimentos agrícola.
- Promoção da **agricultura regenerativa**, através da coleta e análise de dados para avaliar o impacto de práticas regenerativas no solo e no ecossistema local, facilita a implementação e o monitoramento de técnicas como plantio direto e rotação de culturas.
- Dados detalhados sobre práticas agrícolas podem ser usados para certificações de sustentabilidade, além de contribuírem para a melhora da transparência e a rastreabilidade na cadeia de produção de alimentos.

## 11 Resumo Final

Sumariando, ao aproveitar o poder da IoT, a agricultura pode se tornar mais eficiente, sustentável e produtiva.

Estamos na era da geração massiva de dados, diversidade de sensores dos mais variados tipos e das evoluções dos modelos de inteligência artificial (IA)

Para que a IoT seja efetivamente colocada em prática na produção agrícola, o acesso à internet e aos dispositivos como computador, smartphones e tablets são condições necessárias para que o produtor rural possa se beneficiar do uso da tecnologia da informação empregadas no campo. As aplicações para a produção, negócios, comercialização, logística, ensino a distância e a coleta e processamento de dados proporcionados por esses sistemas técnicos fazem circular mais informações e abrem a possibilidade de trabalhos cooperativos entre produtores rurais.

## 12 Bibliografia

- [1] S. Gurpreet, S. Jaspreet. Transformative Potential of IoT for Developing smart Agriculture System: A Systematic Review, 2023 4th International Conference on Communication, Computing and Industry, from IEEE Xplore| DOI: 10.1109/C2I659362.2023.10430789
- [2] Inamasu, Agricultura de Precisão para a sustentabilidade de sistemas produtivos do agronegócio brasileiro, Embrapa.
- [3] Vu Khanh Quy , Nguyen Van Hau , Dang Van Anh, Nguyen Minh Quy , Nguyen Tien Ban , Stefania Lanza , Giovanni Randazzo and Anselme Muzirafuti ; IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges.
- [4] Partha Ray, IOT for smart agriculture: practices Technologies & future direction, Journal of Ambient Intelligence & Smart Environments

- [5] L. Goedde, J. Katz, A. Menard e J. Revellat; Agriculture's connected future: How technology can yield new growth - McKinsey Center for Advanced Connectivity and Agriculture Practice , Mckinsey & Company, Outubro 2020.
- [6] R. Clancy, These sensors empower modern farming, 10/04/2022 - <https://electronics360.globalspec.com/article/17969/these-sensors-empower-modern-farming>
- [7] European Parliament, Directorate-General for Parliamentary Research Services, Daheim, C., Poppe, K., Schrijver, R., Precision agriculture and the future of farming in Europe – Scientific foresight study, European Parliament, 2016, <https://data.europa.eu/doi/10.2861/020809>
- [8] M. Talal, A. Raza, M Safdar, M. S. Al Ansari, S. Kashif Ali, J. Sattar; "Optical Sensing for Precision Agriculture" Muhammad Talal University of Agriculture
- [9] ANDRADE, A. L.; TEIXEIRA, E. F.; BOMFIM, P. F.; BERNARDI, A. C. de C.; VAZ, C. M. P. Caracterização da variabilidade espacial de parâmetros físicos do solo em área de pivô e correlações com a variabilidade da produtividade do milho - Embrapa
- [10] M. Mansour, A. Gamal, A. I. Ahmed, L. A. Sald, A. Elbaz, N. Herencsar e A. Soltan; Internet of Things: A Comprehensive Overview on Protocols, Architectures, Technologies, Simulation Tools, and Future Directions
- [11] H. Kaur, A. Kr Shukla, H. Singh; Review of IoT Technologies used in Agriculture- 2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)
- [12] Ugwuanyi,S; Paul,G.; Irvine,J. Survey of IoT for developing countries: Performance analysis of LoRaWAN and cellular nb-IoT networks. Electronics2021
- [13] R. Kovalchukov (1), D. Moltchanov (1), J Pirskanen (2), J Sae (1), J. Numminen (2), Y. Koucheryav (1), M. Valkama (1); (1) Tampere University, Finland, (2) Wirepas Oy, Finland); "DECT-2020 New Radio: The Next Step Towards 5G Massive Machine-Type Communications " encontrado em <https://arxiv.org/abs/2101.07158>
- [14] Wi-Fi CERTIFIED HaLow Technology Overview, Artigo técnico Técnico elaborado pela Wi-Fi Alliance, 2021 - [https://20524844.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/20524844/WiFi\\_CERTIFIED\\_HaLow\\_Technology\\_Overview\\_20211102.pdf](https://20524844.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/20524844/WiFi_CERTIFIED_HaLow_Technology_Overview_20211102.pdf)
- [15] ETSI Release 1 10 ETSI TS 103 636-1 V1.3.1 DECT-2020 New Radio (NR) [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/103600\\_103699/10363601/01.03.01\\_60/ts\\_10363601v010301p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103600_103699/10363601/01.03.01_60/ts_10363601v010301p.pdf)
- [16] Tarvos - armadilhas automáticas e inteligência artificial para monitorar e identificar pragas agrícolas em tempo real- <https://tarvos.ag>
- [17] Laboratório de Biologia de Insetos do Departamento de Entomologia e Acarologia da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq) da USP <https://www.esalq.usp.br/realizacao-de-evento/departamento-de-entomologia-e-acarologia-lea>
- [18] GARCÍA, L.; PARRA, L.; JIMENEZ, J. M.; LLORET, J.; LORENZ, P. IoT-based smart irrigation systems: an overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. Sensors, v. 20, article 1042, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20041042>.
- [19] CONEXIS BRASIL DIGITAL. **Panorama da Conectividade no Brasil**. São Paulo: Conexis, 2023. Disponível em: <https://conexis.org.br>. Acesso em: 24 maio 2026.
- [20] ANATEL. **Painéis de Acompanhamento de Cobertura Móvel**. Brasília, DF: Agência Nacional de Telecomunicações, 2024. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/paineis/cobertura>. Acesso em: 24 maio 2026.
- [21] GOEDDE, L.; KATZ, J.; MENARD, A.; REVELLAT, J. **Agriculture's connected future**: how technology can yield new growth. New York: McKinsey & Company, 2020.

- [22] MEKKI, K.; BAJIC, E.; CHAXEL, F.; MEYER, F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. **ICT Express**, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2019. DOI: 10.1016/j.icte.2017.12.005.
- [23] UGWUANYI, S.; PAUL, G.; IRVINE, J. Survey of IoT for developing countries: performance analysis of LoRaWAN and cellular NB-IoT networks. **Electronics**, v. 10, n. 18, p. 2224, 2021.
- [24] KOVALCHUKOV, R. *et al.* **DECT-2020 New Radio**: the next step towards 5G massive machine-type communications. arXiv:2101.07158, 2021.
- [25] YANG, X. *et al.* A survey on smart agriculture: development modes, technologies, and security and privacy challenges. **IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica**, v. 8, n. 2, p. 273-302, 2021.
- [26] AGGATEWAY. **ADAPT**: Agricultural Data Application Programming Toolkit. [S. l.]: AgGateway Global Network, 2022. Disponível em: <https://aggateway.org>. Acesso em: 24 maio 2026.
- [27] GUPTA, M.; ABDELSALAM, M.; KHORSANDROO, S.; MITTAL, S. Security and privacy in smart farming: challenges and opportunities. **IEEE Access**, v. 8, p. 34564-34584, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2975142.
- [28] IBGE. **Censo Agropecuário 2017**: resultados definitivos. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019.
- [29] INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. Agricultura de precisão para a sustentabilidade de sistemas produtivos do agronegócio brasileiro. In: BERNARDI, A. C. C. *et al.* (ed.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília: Embrapa, 2014. p. 21-33.
- [30] EMBRAPA. **Visão 2030**: o futuro da agricultura brasileira. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018.
- [31] BNDES. **Programa Inovagro**: condições e resultados. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2024. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br>. Acesso em: 24 maio 2026.
- [32] BCB. **Manual de Crédito Rural (MCR)**. Brasília, DF: Banco Central do Brasil, 2024. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/mcr>. Acesso em: 24 maio 2026.
- [33] PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E. How smart, connected products are transforming companies. **Harvard Business Review**, v. 93, n. 10, p. 96-114, 2015.
- [34] DIAS, C. N.; JARDIM, F.; SAKUDA, L. O. **Radar Agtech Brasil 2023**: mapeamento das startups do setor agro brasileiro. Brasília: Embrapa; SP Ventures; Homo Ludens, 2023.
- [35] BRASIL. **Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018**: Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Brasília, DF: Presidência da República, 2018.
- [36] ANPD. **Guias orientativos sobre aplicação da LGPD**. Brasília, DF: Autoridade Nacional de Proteção de Dados, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anpd>. Acesso em: 24 maio 2026.
- [37] WISEMAN, L.; SANDERSON, J.; ZHANG, A.; JAKKU, E. Farmers and their data: an examination of farmers' reluctance to share their data through the lens of the laws impacting smart farming. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 90-91, p. 100301, 2019.
- [38] COPA-COGECA. **EU Code of Conduct on Agricultural Data Sharing by Contractual Agreement**. Brussels: COPA-COGECA, 2020.
- [39] AMERICAN FARM BUREAU FEDERATION. **Privacy and Security Principles for Farm Data**: Ag Data Transparent. [S. l.]: AFBF, 2024. Disponível em: <https://www.agdatatransparent.com>. Acesso em: 24 maio 2026.

- [40] ANATEL. **Resolução nº 680, de 27 de junho de 2017**: Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita. Brasília, DF: Agência Nacional de Telecomunicações, 2017.
- [41] ITU. **Recommendation ITU-R M.2160**: framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond (IMT-2030). Geneva: International Telecommunication Union, 2023.
- [42] UNIÃO EUROPEIA. **Regulation (EU) 2023/1115 on deforestation-free products (EUDR)**. Brussels: European Parliament and Council, 2023.
- [43] MAPA. **Sistema Brasileiro de Identificação Individual de Bovinos e Bubalinos (SISBOV)**. Brasília: Ministério da Agricultura e Pecuária, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura>. Acesso em: 24 maio 2026.
- [44] BRASIL. **Decreto nº 10.222, de 5 de fevereiro de 2020**: Estratégia Nacional de Segurança Cibernética (E-Ciber). Brasília, DF: Presidência da República, 2020.
- [45] 3GPP. **Release 17, 18 and 19 specifications**: Non-Terrestrial Networks (NTN) and 5G NR RedCap. [S. l.]: 3rd Generation Partnership Project, 2023. Disponível em: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies>. Acesso em: 24 maio 2026.
- [46] LIN, X. *et al.* 5G New Radio evolution meets satellite communications: opportunities, challenges, and solutions. **IEEE Communications Standards Magazine**, v. 5, n. 4, p. 22-28, 2021.
- [47] MYRIOTA. **HyperPulse NB-NTN service**: press release. Adelaide: Myriota, 2025. Disponível em: <https://myriota.com>. Acesso em: 24 maio 2026.
- [48] OQ TECHNOLOGY. **5G NB-IoT Satellite Network**: technical documentation. Luxembourg: OQ Technology, 2024. Disponível em: <https://www.oqtec.space>. Acesso em: 24 maio 2026.
- [49] STARLINK. **Direct to Cell Service**. Hawthorne: SpaceX, 2024. Disponível em: <https://www.starlink.com/business/direct-to-cell>. Acesso em: 24 maio 2026.
- [50] WARDEN, P.; SITUNAYAKE, D. **TinyML**: machine learning with TensorFlow Lite on Arduino and ultra-low-power microcontrollers. Sebastopol: O'Reilly Media, 2019.
- [51] VERDOUW, C.; TEKINERDOGAN, B.; BEULENS, A.; WOLFERT, S. Digital twins in smart farming. **Agricultural Systems**, v. 189, p. 103046, 2021.
- [52] PYLIANIDIS, C.; OSINGA, S.; ATHANASIADIS, I. N. Introducing digital twins to agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 184, p. 105942, 2021.
- [53] FAO. **The future of food and agriculture**: alternative pathways to 2050. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018.
- [54] EMBRAPA. **Plano ABC+ 2020-2030**: agricultura de baixa emissão de carbono. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2021.
- [55] SAAD, W.; BENNIS, M.; CHEN, M. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems. **IEEE Network**, v. 34, n. 3, p. 134-142, 2020.
- [56] NGMN ALLIANCE. **6G Drivers and Vision**: white paper. Frankfurt: Next Generation Mobile Networks Alliance, 2021.
- [57] KOOTSTRA, G.; WANG, X.; BLOK, P. M.; HEMMING, J.; VAN HENTEN, E. Selective harvesting robotics: current research, trends, and future directions. **Current Robotics Reports**, v. 2, p. 95-104, 2021.
- [58] WEISS, U.; BIBER, P. Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 59, n. 5, p. 265-273, 2011.