

Estudio de tecnologías y protocolos de comunicación para redes de sensores inalámbricos aplicados a la agricultura: revisión bibliográfica

Marcieli Paula Langer¹, Claudio Leones Bazzi² y Gloria Patricia Lopez Sepulveda³

¹ UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira-Paraná, Brasil
marcieli.imetrics@gmail.com

² UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira-Paraná, Brasil
clbazzi@gmail.com

³ UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira-Paraná, Brasil
pattylla@gmail.com

Resumen. La agricultura es un sector importante de la economía brasilera y mundial, y así como otros sectores, se beneficia por el uso de la tecnología. Sin embargo, existen barreras tecnológicas, principalmente cuando se trata de la infraestructura de las redes de comunicación, lo que permitiría que las automatizaciones agrícolas sean más intensificadas. Con base en estos desafíos y para minimizarlos, este artículo tiene como finalidad, mediante una búsqueda bibliográfica, describir las características de las principales tecnologías WSN utilizadas en soluciones IoT, analizando variables importantes en estas aplicaciones, con el objetivo de resolver problemas comunes en el área agrícola, principalmente, donde la comunicación requiere mayores alcances y donde existen limitaciones de alimentación de la red eléctrica, para de esta forma, indicar las tecnologías y protocolos de comunicación para las redes de sensores inalámbricos (WSN) usados para comunicación máquina a máquina (M2M) en diferentes escenarios de automatización de actividades agrícolas. Dentro de estas metodologías, fueron escogidas como objeto de este estudio: WiFi (ah), ZigBee, SigFox e LoRa. La realización de este estudio será fundamental para la realización de trabajos futuros, donde serán realizadas pruebas con estas tecnologías en escenarios propuestos.

Palabras-claves: Internet de las Cosas, Agricultura Inteligente, Agricultura de Precisión, LoRa, IEEE 802.11ah, ZigBee, SigFox.

1 Introducción

Las tecnologías aplicadas a las soluciones de Internet de las Cosas (IoT - del término en inglés: Internet of Things) vienen mejorando la forma como realizamos las tareas y la forma como son abordados muchos de los principales desafíos humanos, tales como: crecimiento poblacional, consumo de energía, medio ambiente, sustentabilidad. Los

dispositivos usados en estas soluciones se caracterizan por sus bajas tasas de datos, consumo de energía y costo [1].

En [2] fue presentado que el sector primario de la economía, que comprende actividades como la agricultura, está en constante crecimiento y es el responsable por suministrar la materia prima para la industria, lo que justifica la necesidad de incorporar tecnología, ya que, según los autores, la agricultura representa la evolución más relevante del sector.

Según [3], estamos aproximándonos de una realidad en la cual la incorporación de las tecnologías desarrolladas a las prácticas agrícolas intensivas será inevitable con el fin de mejorar el uso de los recursos agrícolas y consecuentemente, el aumento de la producción. Dentro de esas tecnologías el autor cita el uso de IoT, describiéndola como una red que tiende a ser omnipresente y global, capaz de recolectar, procesar y analizar datos provenientes de sensores presentes en diferentes artefactos, integrados a redes públicas y privadas de comunicación.

De acuerdo con lo presentado en [4], según Thiago Teixeira Santos, investigador de Embrapa Informática Agropecuaria, la reducción de los costos de la microelectrónica y de las telecomunicaciones hicieron posible que una serie de alternativas de IoT fueran viabilizadas, lo que debe contribuir con el surgimiento de una nueva ola de desarrollo en el agronegocio. En el mismo trabajo presentado, el programa expone la visión del Investigador Fabricio Lira Figueredo del centro de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones, quien ve la infraestructura de la conectividad como uno de los principales desafíos para la implementación de la IoT en la agropecuaria, no solo en el contexto brasilero como en un contexto mundial.

Según [2], las Redes de Sensores Inalámbricas (WSN – del término en inglés: Wireless Sensor Network) son una alternativa para la comunicación entre los equipos y el gateway, sin embargo, su aplicación en cultivos abiertos enfrenta dificultades debido a la baja infraestructura de la tecnología de información y las limitaciones de energía eléctrica. Por consiguiente, los autores citan la importancia de escoger de forma correcta la red de comunicación aplicada en los casos agrícolas de campo abierto, así como, los protocolos de comunicación que serán utilizados por dichas redes, ya que, estos poseen características distintas que los vuelven adaptables en cada aplicación, representando su importancia cuando son aplicados de la forma correcta.

En [5] según algunos estudios, la combinación de tecnologías puede representar un aumento de hasta 67% en el rendimiento de los cultivos, no obstante, problemas de conectividad en el campo, debido principalmente a la limitación de la cobertura de la telefonía celular e internet, son obstáculos para los avances de la IoT en el sector. Continuando con ese raciocinio, en [6] se destaca que la IoT es altamente dependiente de los servicios de telecomunicaciones, ya que, se debe considerar las características, calidad, velocidad y confiabilidad de las redes para verificar el pleno uso del ambiente de IoT.

Por lo tanto, se verifica la importancia de estudiar las características de las tecnologías y protocolos de comunicación Máquina a Máquina (M2M – del término en inglés: Machine to Machine) aplicados en soluciones WSN, y su aplicabilidad en diferentes escenarios agrícolas, con el fin de contribuir en las soluciones IoT y consecuentemente, en la automatización de actividades del sector agrícola.

Para cumplir con el propósito de estudiar y seleccionar tecnologías candidatas a la aplicación en escenarios de automatización agrícola, este trabajo está estructurado de la siguiente forma: La sección 1 comprende la importancia de la realización del trabajo y la exposición de conceptos y definiciones, adquiridas a través de la revisión de la literatura, que envuelven soluciones IoT, tales como: redes de sensores inalámbricos, comunicación máquina a máquina, características de soluciones IoT, desafíos y aplicaciones agrícolas; la sección 2 describe los pasos realizados para alcanzar los resultados propuestos, es decir, de qué forma las tecnologías WSN candidatas fueron identificadas y seleccionadas; la sección 3 describe los resultados adquiridos; la sección 4 presenta las conclusiones finales y una propuesta de continuidad de los estudios.

1.1 Redes de Sensores Inalámbricas

Una red de sensores inalámbricos es formada por varios pequeños sistemas de sensores, llamados nodos, localizados en distancias cortas y que colectan diversas informaciones del ambiente por medio de sensores, tales como: temperatura, presión, humedad del aire, composición del suelo, movimiento, velocidad, niveles de ruido, presencia o ausencia de ciertos tipos de objetos, entre otros [7] [8] [9].

Las redes de sensores inalámbricos pueden ser aplicados en diversas situaciones, tales como: aplicaciones militares, salud, agricultura y seguridad [8].

El funcionamiento de una WSN es posible a través de la comunicación inalámbrica de los nodos con los gateways, necesaria para la transmisión de las informaciones recolectadas; los gateways por su vez pueden procesar esas informaciones o enviarlas a un servidor en la nube, conocido como Sistema de Gerenciamiento de Información (IMS - del término en inglés: Information Management System) [7].

Adicionalmente según [7], la estructura de una WSN consiste de nodos, el gateway y el IMS:

- **Nodos:** Compuesto por un sensor, generalmente de bajo costo y bajo consumo de energía; un microcontrolador, un chip pequeño de bajo costo y baja potencia; una fuente de alimentación, lo que atribuye autonomía a los nodos sensores; y por último, la red de comunicación inalámbrica, lo que permitirá la comunicación entre los nodos sensores y el gateway.
- **Gateway:** Representa el núcleo de la red de sensores inalámbricos responsable por recibir los datos provenientes de los nodos sensores y enviarlos a los IMS. A diferencia de los nodos, este está geográficamente fijo y conectado a una fuente de alimentación. También debe poseer un sistema de comunicación inalámbrico, ya que recibe las informaciones enviadas por los nodos sensores. Generalmente, equipado con un microcontrolador de alta potencia y poder de procesamiento.
- **Servidor en la nube:** Responsable por el almacenamiento, procesamiento y disponibilización de las informaciones generadas por los nodos y transmitidas por el gateway a los usuarios finales.

En [8] se destaca el bajo consumo de energía como una de las más importantes restricciones de este tipo de red, mientras que en [11] se hace un complemento con

otros importantes desafíos en las WSN: escalabilidad, movilidad, enrutamiento, confiabilidad, puntualidad, localización, entre otros.

1.2 Comunicación M2M

Las comunicaciones M2M son un nuevo paradigma de comunicación, donde los dispositivos pueden comunicarse unos con otros sin intervención humana. En [12] y [13] se complementa la descripción de las soluciones que permiten la comunicación entre dos dispositivos del mismo tipo y una aplicación específica, generalmente implantados para la obtención de ganancia de productividad, reducción de costos y aumento de la seguridad, a pesar de que generalmente no permiten el amplio compartimiento de datos o la conexión de los dispositivos directamente al Internet. La IoT contribuye a la interconexión y comunicación entre los diferentes dispositivos [12].

En relación a la aplicabilidad de este tipo de comunicación para soluciones de IoT, en [14] consideran que la comunicación M2M es capaz de aumentar la eficiencia y mejorar la productividad, reduciendo los costos y pudiendo ser aplicada y conectada a diferentes infraestructuras, trayendo resultados mucho más poderosos y eficientes, y de esta forma desempeñando un papel de gran importancia en las comunicaciones de IoT. Adicionalmente, según [15] las tecnologías de comunicación M2M son importantes para permitir la transmisión de datos inalámbricos entre los dispositivos IoT y el gateway, y desde este hasta un repositorio remoto de Internet.

En [11] fueron presentadas las redes de sensores inalámbricos como una de las principales aplicaciones del sistema M2M. Para [16], el paradigma M2M está ampliando el objetivo del concepto de WSN, ya que, a través de este es posible dispositivos se comuniquen e intercambien informaciones sin la interferencia humana, lo que nos hace entender que las comunicaciones M2M enfrentan la mayoría de desafíos técnicos das WSN.

1.3 Redes IoT y Soluciones para Agricultura

De acuerdo com [10], el término “Internet de las cosas” fue citado por primera vez por el visionario británico Kevin Ashton en 1999. En [17] junto con [10], describen IoT como un paradigma basado en la integración de una variedad de procesos envolviendo sensores, herramientas y equipos de uso cotidiano, denominados objetos o “cosas”, mejorados por el poder de la computación y por los recursos de la red, pudiendo interactuar entre si y desempeñar un papel importante en la solución de los más variados problemas. En [10], los autores indican que la agricultura es uno de los sectores que debe ser altamente influenciado por los avances en el dominio de la IoT.

De acuerdo con lo expuesto en [19] estamos pasando por un periodo donde se experimenta una evolución con la IoT, sin embargo, a pesar de que la IoT ha ofrecido ventajas también impone desafíos.

En [20] se expone la necesidad que tienen las aplicaciones de IoT de usar tecnologías cada vez más apropiadas y destinadas a la comunicación inalámbrica en largas distancias, con bajo consumo de energía, disponibilizando dispositivos finales de bajo costo y baja complejidad.

Por su vez, en [21] se destaca que en las últimas décadas hubo una grande expansión de la agricultura, caracterizada por grandes producciones y uso de tecnología, ofreciendo inclusive nuevos modelos de negocio con el surgimiento de potenciales soluciones de IoT. Los mismos autores se refieren al concepto de Agricultura Inteligente (SF - del término en inglés: Smart Farming) como un proceso basado en tareas de gerenciamiento que no se limitan apenas al local, sino como también a los datos, mejorados por el conocimiento del contexto y de la situación, accionados por eventos en tiempo real, utilizando recursos que generalmente incluyen asistencia inteligente en la implementación, mantenimiento y uso de la tecnología. En [22] indican la IoT como responsable por proporcionar una nueva dimensión en el área de la agricultura inteligente, a través de la cual es posible conectar propiedades agrícolas de manera eficiente, auxiliando de varias formas a los agricultores, facilitándoles la obtención de datos abundantes de temperatura, fertilizante usado, volumen de agua utilizado, entre otros, por medio de la implantación de sensores en las áreas cultivadas y en las maquinarias utilizadas.

En [2] son presentadas algunas características relevantes para la escogencia de la solución IoT cuando se trata de la aplicación no sector de la agricultura de precisión:

- Movilidad de los nodos sensores debido a posibles irregularidades en el terreno;
- Escalabilidad que permita la reconfiguración del sistema a cada aplicación;
- Largo alcance debido a las grandes áreas de cultivo que deben ser cubiertas;
- Bajo consumo de energía, debido a la falta de estructura para alimentación;
- Baja atenuación de la señal debido a la posibilidad de presencia de obstáculos como vegetación y humedad.

2 Estudio de las Principales Tecnologías WSN

Consultando en la literatura especializada y con el propósito de proporcionar la comparación de las principales tecnologías WSN en lo que se refiere a algunas características importantes, fue elaborada la Tabla 1. Las comparaciones comprenden aspectos como: protocolo basado para comunicación, frecuencia utilizada, espectro licenciado, tasa de datos máxima alcanzada para envío y recibo de datos, consumo de energía, distancia máxima alcanzada en áreas rurales, costo de implantación y topología utilizada en su arquitectura.

Table 1. Características de las Principales Tecnologías WSN [23] [24] [25] [26] [27] [1] [11] [28] [15] [29] [18] [30].

| Tecnologías/ Parámetros | WiFi (ah) | NB-IoT | LoRa | BLE | ZigBee | Telensa | RPMA | SigFox | WiMAX | 6LoWPAN |
|----------------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|----------------|------------|----------------|-------------------|----------------------|
| Estándar | IEEE 802.11ah | IEEE 802.15.4 | IEEE 802.15.4g | IEEE 802.15.1 | IEEE 802.15.4 | WIoTF | - | SigFox | IEEE 802.16a,e | IEEE 802.15.4 |
| Frecuencia | 900 MHz | 7-900 MHz | 869/915 MHz | 2.4 GHz | 2.4 GHz | EU 868 MHz, | 2.4 GHz | EU 868 MHz, | 2-66 GHz | 915 MHz e 2.4 GHz |

| | | | | | | US 915 MHz | | US 902 MHz | | |
|--|------------|----------|----------------------|----------|---------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|--------|----------|
| Espectro licenciado | No | Si | No | No | No | No | No | No | - | No |
| Tasa de datos (Límite para download) | 40 Mbps | 250 Kbps | 5 Kbps | 2 Mbps | 250 Kbps | 500 bps | 156 Kbps | 600 bps | 1 Gbps | 250 Kbps |
| Tasa de datos (Límite para upload) | 40 Mbps | 200 Kbps | 5 Kbps | 2 Mbps | 250 Kbps | 62.5 bps | 624 Kbps | 600 bps | 1 Gbps | 250 Kbps |
| Consumo de energía | Bajo | Bajo | Bajo | Bajo | Bajo | - | Bajo | Bajo | Medio | Bajo |
| Distancia (máximo alcance em área externa/rural) | 1 Km | 15 Km | 40 Km | 100 m | 100 m | 8 Km | 500 Km | 50 Km | 50 Km | 30 m |
| Costo | Bajo | Bajo | - | Bajo | Bajo | - | - | Bajo | Alto | Bajo |
| Topología | Single-hop | Estrella | Estrella de Estrella | Estrella | Malla/Estrella/Árbol de cluster | Es-trella/Árbol | Es-trella/Árbol | Estrella | - | Malla |

Con base en los resultados que aparecen en la Tabla 1, fue elaborada la Tabla 2, cuyo propósito es presentar las principales ventajas y desventajas de cada tecnología WSN considerando los desafíos enfrentados por soluciones IoT para agricultura, con el fin de contribuir para la selección de las tecnologías presentes en el estudio.

Table 2. Ventajas y Desventajas de las Principales Tecnologías WSN.

| Tecnología | Ventajas | Desventajas |
|------------|---|-------------------|
| Wifi (ah) | Mejor consumo de energía comparado a los demás estándares de WiFi Bajo costo | - |
| NB-IoT | Bajo consumo de energía Largas distancias Bajo costo | - |
| LoRa | Bajo consumo de energía Largas distancias Bajo costo | - |
| BLE | Bajo consumo de energía Bajo costo | Cortas distancias |
| ZigBee | Bajo consumo de energía Bajo costo | Cortas distancias |
| Telensa | Largas distancias | - |
| RPMA | Bajo consumo de energía Largas distancias | - |
| SigFox | Largas distancias Bajo costo | - |

| | | |
|---------|---------------------------------------|---|
| | Bajo consumo de energía | |
| WiMAX | Largas distancias | Alto costo Consumo promedio de energía, superior a otras opciones de tecnologías presentadas |
| 6LoWPAN | Bajo consumo de energía Bajo costo | Cortas distancias |

Con el fin de auxiliar en la elección de tecnologías apropiadas en la aplicación de escenarios agrícolas y considerando las consultas bibliográficas, se elaboró la Tabla 3, realizando el cruzamiento de tecnologías WSN y sus respectivas áreas de aplicación en el contexto de soluciones IoT.

Table 3. Escenarios de Aplicación de las Principales Tecnologías WSN [31] [7] [32] [33] [16] [25] [1] [18].

| Tecnologías/ Áreas de Aplicación | WiFi (ah) | NB-IoT | LoRa | BLE | ZigBee | Telensa | RPMA | SigFox | WiMAX | 6LoWPAN |
|-------------------------------------|-----------|--------|------|-----|--------|---------|------|--------|-------|---------|
| Agricultura | X | X | X | | X | X | | X | | |
| Industria | X | X | X | | | | X | | | |
| Logística | | X | | | | | X | | | |
| Ciudades Inteligentes | X | X | X | | | X | | X | | |
| Casas Inteligentes | X | X | | | | | X | | | X |
| Salud | | X | X | X | | X | X | | | |
| Monitoreo Ambiental | | | X | | X | | | | | |
| Redes Eléctricas Inteligentes | | X | X | | | | X | | | |

3 Selección de las Tecnologías Aplicables a las Soluciones Agrícolas

Mediante la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3, que describen respectivamente las características de las principales tecnologías WSN utilizadas en soluciones IoT, las ventajas y desventajas de estas tecnologías y los principales escenarios de aplicación, fue realizada la selección de las tecnologías más adecuadas a la propuesta de esta investigación:

- WiFi (ah): por no presentar desventajas de acuerdo con las características y necesidades de los escenarios estudiados, tener bajo costo y consumo de energía relativamente bajo y ser aplicable a soluciones agrícolas;

- ZigBee: por presentar bajo consumo de energía y a pesar de alcanzar cortas distancias puede ser interesante para la variación de los escenarios de prueba, así como, de su aplicación en soluciones agrícolas;
- SigFox: por no presentar desventajas en relación con los escenarios que serán estudiados, además de su aplicación en soluciones agrícolas;
- LoRa: por alcanzar largas distancias, razón que puede ser imprescindible para la mayoría de los escenarios de pruebas en campo agrícola, bajo costo y bajo consumo de energía, y a pesar de la baja tasa de transmisión, actividades de sensoriamiento agrícola tienden a no exigir altas tasas de transmisión de paquetes de datos, además de ser recomendado para soluciones agrícolas.

Esas tecnologías serán presentadas en las próximas secciones, con el objetivo de proporcionar mejor entendimiento sobre su funcionamiento y estructura de la arquitectura.

3.1 WiFi (ah)

Lanzada en 2016 con la propuesta de disponer mecanismos mejorados de economía de energía y pequeñas transmisiones de datos de manera eficiente [16]. Hasta su desenvolvimiento el estándar de comunicación WiFi no representaba una buena opción para atender redes de sensores inalámbricos. Ese nuevo estándar pertenece a la categoría de tecnologías de comunicación inalámbrica llamada Redes de Área Ampla y Baja Potencia (LPWAN - del término en inglés: Low-Power Wide Area Networks) la cual recientemente ha ganado un impulso significativo, principalmente de la comunidad de investigadores [34]. LPWAN combina baja tasa de datos y modulación robusta para cumplir un alcance de comunicación de varios kilómetros [35]. Precisamente es esta categoría de tecnología que hace posible que los sensores y demás dispositivos de IoT, generalmente alimentados por batería, puedan tener su vida útil prolongada y comunicarse a través de una banda de comunicación que puede ir de varias centenas de metros hasta varios kilómetros [20].

Su concepción fue basada en la característica de bajo consumo de energía, de forma que nuevas estrategias de consumo ultra bajo de energía están siendo desarrolladas para o estándar, permitiendo que los nodos permanezcan por más tiempo en estado de baja energía sin ser desasociados de la red [36], característica que lo hace un estándar candidato para aplicaciones IoT y M2M [11]. A pesar de esto, en [36] destacan que hubo un cuidado para mantenerse dentro de los estándares de implantación y operación ampliamente adoptados por los estándares anteriores del IEEE 802.11.

En [31] los autores presentan en su trabajo una arquitectura típica basada en el estándar IEEE 802.11ah para soluciones IoT de residencias y ciudades inteligentes utilizando redes de sensores inalámbricos, con comunicación a internet. Esta arquitectura puede ser vista en la Figura 1.

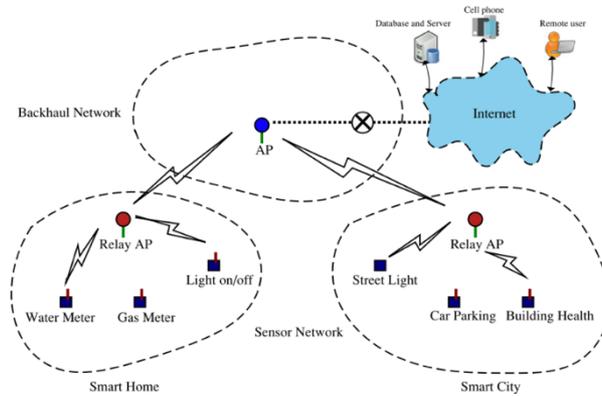


Fig. 1. Red basada en el estándar IEEE 802.11ah, para una solución IoT de grande distribución geográfica [31].

3.2 ZigBee

Según lo relatado por [37], ZigBee puede soportar un gran número de nodos a un costo bajo. Basado en el estándar IEEE 802.15.4, el cual define las capas físicas y MAC, mientras que las capas de red y aplicación son definidas por el ZigBee, ofreciendo menor consumo de energía y mayor vida útil de la batería. Los autores también indican que, a pesar de las soluciones Zigbee generalmente utilizan la topología de malla, otras dos también son utilizadas: estrella y árbol de clúster (Figura 2).

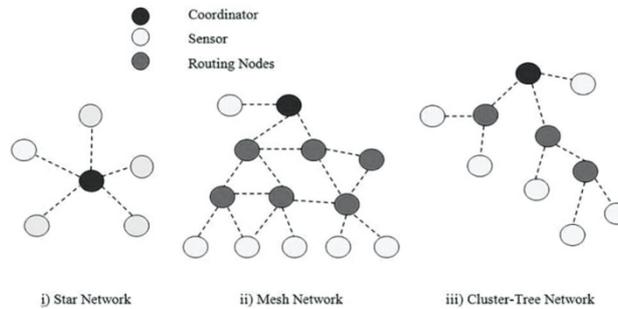


Fig. 2. Topologías ZigBee [37].

En [32] fue propuesto en su estudio una red de sensores para agricultura basada em ZigBee que cuenta con 16 nodos sensores distribuidos en un área rural, conectados a 4 nodos ruteadores, que por su vez, son conectados a un nodo ruteador principal. La solución es responsable por cubrir un área de 50m², recolectando informaciones tales como: temperatura y humedad del aire y humedad del suelo. La topología puede ser observada en la Figura 3.

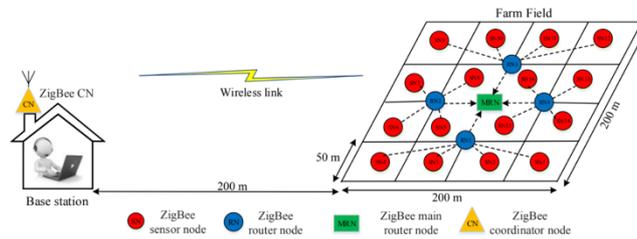


Fig. 3. Topología de redes de sensores inalámbricos propuesta para solución de agricultura de precisión usando ZigBee [32].

Pertenece al grupo de tecnologías Red de Área Personal inalámbrica de Baja Tasa (LR-WPAN, del término en inglés: Low-Rate Wireless Personal Area Network), que son categorizadas por el consumo de energía extremadamente bajo, baja tasa de transferencia de datos, baja complejidad y consecuentemente mayor facilidad de instalación y gerenciamiento de la red [11].

En la tesis de maestría, la cual tuvo por objetivo el estudio y comparación del estándar IEEE 802.15.4 con otras tecnologías como WiFi ah y Bluetooth, concluyó que, a pesar de no haber alcanzado niveles altos de tasa de transferencia de datos, lo que no es un problema para el objetivo de este estudio, en relación al consumo de energía se mostró como un estándar adecuado.

3.3 SigFox

Pertenece a la clasificación de LPWAN, así como WiFi ah, es una tecnología propietaria de la organización cuyo nombre culmina con la tecnología. Fundada en 2010 con la visión de conectar cualquier objeto en nuestro mundo físico al universo digital. Posee principios importantes, tales como, proporcionar un canal mínimo para la transferencia de pequeños mensajes, garantía de seguridad en las redes, simplificar el acceso a diferentes redes y reducir el consumo de energía [38].

La tecnología es principalmente orientada para escenarios rurales, caracterizados por envío/recibo poco frecuente de mensajes pequeñas a un largo alcance de transmisión [15].

En [39] describen una solución SigFox compuesta por tres partes: un sistema de backend, una estación base y múltiples nodos sensores. El sistema de backend en la nube permite que los usuarios finales manipulen dispositivos y accedan datos a través de la internet. Según [40] la topología estrella utilizada por el SigFox a una arquitectura celular, comprende una amplia implantación de estaciones bases con el objetivo de cubrir países enteros a través del uso de bandas ISM.

Además de esto, según los autores, esas estaciones base les permiten a los nodos enviar datos directamente a los servidores SigFox. Esa característica es vista por [15] como una desventaja, una vez que, para enviar y recibir mensajes, un dispositivo debe integrar respectivamente un ruteador compatible y una integración con los servidores SigFox, lo que por su vez requiere la obtención de una licencia SigFox. Esa solución completa es descrita en la Figura 4.

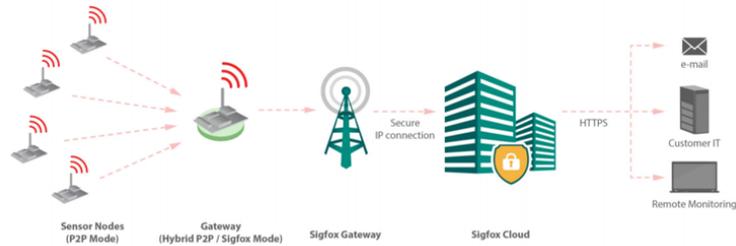


Fig. 4. Solución SigFox Completa [41].

En [41] es presentado en una de sus guías una solución alternativa a la adquisición de la licencia SigFox que es la construcción de un modo de comunicación Par a Par (P2P – del término en inglés: Peer to Peer), donde los nodos pueden conectarse directamente entre ellos y enviar mensajes directamente sin ningún costo. Esta solución puede ser vista en la Figura 5.



Fig. 5. Solución SigFox P2P [41].

3.4 LoRa

Implementada bajo el protocolo LoRaWAN y el estándar IEEE 802.15.4g, los dominios de su aplicación van desde las ciudades inteligentes hasta la agricultura de precisión [35].

Así como WiFi ah y SigFox, LoRaWAN pertenece a la categoría de tecnologías LPWAN. LoRa, cuyo nombre proviene del inglés Long Range que significa Largo Alcance, es una tecnología nueva, desarrollada por la norteamericana Semtech, patrocinada por grandes empresas como Cisco, IBM, Orange, entre otras [42]. Lo que estas empresas poseen en común es el interés en el desarrollo de redes LoRa para IoT.

La Figura 6 representa una arquitectura IoT usando la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN para comunicación entre el gateway y los nodos, donde cada nodo y compuesto por sensores y un módulo LoRa.

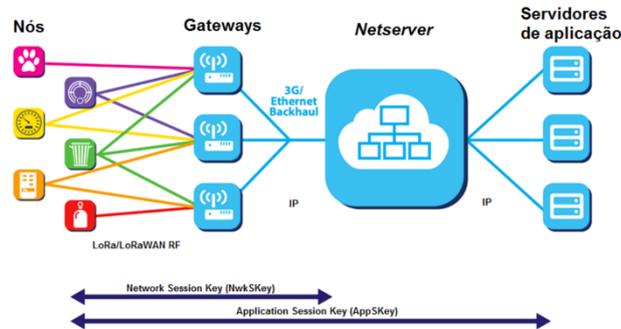


Fig. 6. Arquitectura de red para proyectos LoRaWAN [43].

4 Conclusiones

El estudio detallado de las características de las tecnologías WSN y sus áreas de aplicación hizo posible la selección de cuatro tecnologías candidatas a la realización de la comunicación en soluciones IoT agrícolas. Con el resultado del estudio se espera que las tecnologías seleccionadas satisfagan los principales desafíos encontrados por ese tipo de solución: indisponibilidad de alimentación por energía eléctrica y grandes distancias.

Para dar continuidad y validación de los resultados encontrados, se planea la realización de pruebas en escenarios reales, verificando la adecuación real de las tecnologías a los requisitos propuestos por soluciones IoT empleadas en la agricultura.

References

1. Q. M. Qadir, T. A. Rashid, N. K. Al-Salihi, B. Ismael, A. A. Kist, and Z. Zhang, "Low power wide area networks: a survey of enabling technologies, applications and interoperability needs," *IEEE Access*, v. 6, p. 77454-77473, 2018.
2. G. B. Teixeira, and J. V. P. D. Almeida, "Rede LoRa® e protocolo LoRaWAN® aplicados na agricultura de precisão no Brasil," 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
3. R. P. da Rosa, "Dispositivos IoT aplicáveis à agricultura intensiva e os resultados já alcançados," *Datacenter: projeto, operação e serviços-Unisul Virtual*, 2017.
4. Programa Agricultura de Precisão do SENAR, "Agricultura digital abre perspectivas para pesquisa," <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/28915522/agricultura-digital-abre-perspectivas-para-pesquisa>, 2017.
5. A. Jardim, "Agricultura de precisão: uma nova fronteira agrícola," *AgroANALYSIS*, v. 37, n. 10, p. 48, 2018.
6. M. A. Seixas, and E. Contini, "Internet das coisas (IoT): inovação para o agronegócio," *Área de Informação da Sede-Nota Técnica/Nota Científica (ALICE)*, 2017.
7. M. E. E. Alahi, N. Pereira-Ishak, S. C. Mukhopadhyay, and L. Burkitt, "An internet-of-things enabled smart sensing system for nitrate monitoring," *IEEE Internet of Things Journal*, v. 5, n. 6, p. 4409-4417, 2018.

8. I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer networks*, v. 38, n. 4, p. 393-422, 2002.
9. Y. Jiber, H. Harroud, and A. Karmouch, "Precision agriculture monitoring framework based on WSN," In: 2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. IEEE, 2011. p. 2015-2020.
10. A. Tzounis, N. Katsoulas, T. Bartzanas, and C. Kittas, "Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges," *Biosystems Engineering*, v. 164, p. 31-48, 2017.
11. B. Badihi Olyaei, "Modeling, Performance Evaluation and Suitability Study of Zigbee Technology for Machine-to-Machine Communications Applications," 2013. Dissertação de Mestrado.
12. N. Xia, and C. Yang, "Recent advances in machine-to-machine communications," *J. Comput. Commun.*, v. 4, p. 107-111, 2016.
13. J. Holler, V. Tsiatsis, C. Mulligan, S. Avesand, S. Karnouskos, and D. Boyle, "From Machine-to-Machine to the Internet of Things," Academic Press, 2014.
14. H. C. Chen, I. You, C. E. Weng, C. H. Cheng, and Y. F. Huang, "A security gateway application for End-to-End M2M communications," *Computer Standards & Interfaces*, v. 44, p. 85-93, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2015.09.001>
15. F. Montori, L. Bedogni, M. Di Felice, and L. Bononi, "Machine-to-machine wireless communication technologies for the Internet of Things: Taxonomy, comparison and open issues," *Pervasive and Mobile Computing*, v. 50, p. 56-81, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2018.08.002>
16. B. Bellalta, L. Bononi, R. Bruno, and A. Kassler, "Next generation IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks: Current status, future directions and open challenges," *Computer Communications*, v. 75, p. 1-25, 2016.
17. A. Čolaković, and M. Hadžialić, "Internet of Things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues," *Computer Networks*, v. 144, p. 17-39, 2018.
18. A. Khanna, and S. Kaur, "Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture," *Computers and electronics in agriculture*, v. 157, p. 218-231, 2019.
19. P. Rawat, K. D. Singh, and J. M. Bonnin, "Cognitive radio for M2M and Internet of Things: A survey," *Computer Communications*, v. 94, p. 1-29, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.07.012>
20. J. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman, and J. Hoebeke, "A survey of lorawan for iot: From technology to application," *Sensors*, v. 18, n. 11, p. 3995, 2018. <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3995>
21. H. Sundmaeker, C. Verdouw, S. Wolfert, L. P. Freire, O. Vermesan, and P. Friess, "Internet of food and farm 2020. Digitising the Industry-Internet of Things connecting physical, digital and virtual worlds," Ed: Vermesan, O., & Friess, P, p. 129-151, 2016.
22. N. Ahmed, D. De, and I. Hussain, "Internet of Things (IoT) for smart precision agriculture and farming in rural areas," *IEEE Internet of Things Journal*, v. 5, n. 6, p. 4890-4899, 2018.
23. S. Aust, and T. Ito, "Sub 1GHz wireless LAN propagation path loss models for urban smart grid applications," In: 2012 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). IEEE, 2012. p. 116-120.
24. T. Ojha, S. Misra, and N. S. Raghuvanshi, "Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 118, p. 66-84, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.011>
25. X. Feng, F. Yan, and X. Liu, "Study of Wireless Communication Technologies on Internet of Things for Precision Agriculture," *Wireless Personal Communications*, p. 1-18, 2019.

26. L. Geng, and T. Dong, "An Agricultural Monitoring System Based on Wireless Sensor and Depth Learning Algorithm," *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, v. 13, n. 12, p. 127-137, 2017.
27. U. J. L. dos Santos, G. Pessin, C. A. da Costa, and R. da Rosa Righi, "AgriPrediction: A proactive internet of things model to anticipate problems and improve production in agricultural crops," *Computers and electronics in agriculture*, v. 161, p. 202-213, 2019.
28. Keysight Technologies (2016). Internet of Things (IoT). <https://www.keysight.com/br/pt/assets/7018-05035/posters/5992-1217.pdf>
29. T. Adame, A. Bel, B. Bellalta, J. Barcelo, and M. Oliver, "IEEE 802.11 AH: the WiFi approach for M2M communications," *IEEE Wireless Communications*, v. 21, n. 6, p. 144-152, 2014.
30. A. Aragües, I. Martínez, P. Del Valle, P. Muñoz, J. Escayola, and J. D. Trigo, "Trends in entertainment, home automation and e-health: Toward cross-domain integration," *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 6, p. 160-167, 2012.
31. N. Ahmed, H. Rahman, and M. I. Hussain, "A comparison of 802.11 ah and 802.15. 4 for IoT," *Ict Express*, v. 2, n. 3, p. 100-102, 2016.
32. H. M. Jawad, R. Nordin, S. K. Gharghan, A. M. Jawad, M. Ismail, and M. J. Abu-AlShaer, "Power reduction with sleep/wake on redundant data (SWORD) in a wireless sensor network for energy-efficient precision agriculture," *Sensors*, v. 18, n. 10, p. 3450, 2018.
33. A. D. Balmos, A. W. Layton, A. Ault, J. V. Krogmeier, and D. R. Buckmaster, "Investigation of Bluetooth Communications for Low-Power Embedded Sensor Networks in Agriculture," *Transactions of the ASABE*, v. 59, n. 5, p. 1021-1029, 2016.
34. L. Casals, B. Mir, R. Vidal, and C. Gomez, "Modeling the energy performance of LoRaWAN," *Sensors*, v. 17, n. 10, p. 2364, 2017. <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2364>.
35. F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melià-Seguí, and T. Watteyne, "Understanding the Limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*: 2017. <https://arxiv.org/pdf/1607.08011.pdf>
36. T. Adame, A. Bel, B. Bellalta, J. Barceló, J. Gonzalez, and M. Oliver, "Capacity analysis of IEEE 802.11 ah WLANs for M2M communications," In: *International Workshop on Multiple Access Communications*. Springer, Cham, 2013. p. 139-155.
37. C. Z. Zulkifli, and N. N. Noor, "Wireless Sensor Network and Internet of Things (IoT) Solution in Agriculture," *Pertanika Journal of Science & Technology*, v. 25, n. 1, 2017.
38. SIGFOX. <https://www.sigfox.com>
39. X. Zhang, A. Andreyev, C. Zumpf, M. C. Negri, S. Guha, and M. Ghosh, "Thoreau: A subterranean wireless sensing network for agriculture and the environment," In: *2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. IEEE, 2017. p. 78-84.
40. R. Sanchez-Iborra, and M. D. Cano, "State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services," *Sensors*, v. 16, n. 5, p. 708, 2016.
41. Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. Wasmote Sigfox: Networking Guide. Document Version: v7.3 - 04/2018. <http://www.libelium.com/development/wasmote/documentation/wasmote-sigfox-networking-guide/?action=download>
42. F. Cossini, "Lorawan: Uma Rede Alternativa Para A Internet Das Coisas," *Mini Paper Series Ano 12. Novembro, 2016 – N° 274*. <https://www.ibm.com/developerworks/community/blogs/tlcbt/entry/mp274?lang=en>
43. Lora-Alliance. 2017. <https://www.lora-alliance.org>