



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LA TECNOLOGÍA
INALÁMBRICA LORA Y ZIGBEE BASADAS EN IOT PARA LA
OBTENCIÓN DE VALORES DEL CONTROL DE RIEGO MEDIANTE EL
MONITOREO DE PARÁMETROS AMBIENTALES EN ZONAS RURALES
DEL ESTADO DE YUCATÁN**

TESIS

Que presenta:

Mónica del Rosario Catzin Argaez

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Ingeniera en Tecnologías de la Información y Comunicaciones

Director de tesis:

Dra. Janet Guadalupe Pech de la Portilla

Asesor externo:

MIE. Carlos Humberto López May

Conkal, Yucatán, México

Noviembre, 2024



TecNM

DEDICATORIAS

Primeramente, esta investigación se la dedico a Dios por darme la fuerza, sabiduría y salud para poder llevar a cabo uno de mis anhelos más deseados.

También se lo dedico de todo corazón a mis padres, Neyda y Roberto, por ser los pilares más importantes en mi vida, por todo su amor incondicional, apoyo, paciencia, trabajo y sacrificio, por siempre estar presente, inculcarme muy buenos valores y darme una excelente educación. Y también por ser una guía y apoyo, gracias por enseñarme a plantarle cara a cualquier dificultad.

A mi hermana Diana por ser mi principal ejemplo, por siempre incitarme a mejorar y crecer, estoy tan orgullosa de ella, así como lo está de mí.

Este logro es por y para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi maestro el MIE. Carlos López, MI. Mario Chan y a la Dra. Janet Pech, quienes con su guía y conocimientos contribuyeron al desarrollo de la presente tesis. Quiero expresar un agradecimiento especial a mi director de tesis, la Dra. Janet Pech, por su dedicación y apoyo desde el inicio hasta el final de este proceso. Muchas gracias por todo. No existen palabras con las cuales pueda expresar mi más profundo agradecimiento.

A mis padres, Neyda y Roberto. En especial, a mi mamá, cuyo amor y apoyo incondicional fueron mi mayor fuente de fortaleza. Ella siempre estuvo a mi lado, dándome ánimos y motivándome para seguir adelante, incluso cuando las dificultades parecían insuperables.

Finalmente, quiero agradecer al TecNM Campus Conkal y maestros por ser una guía a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado sus conocimientos para desarrollarme profesionalmente.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, está enfocado en el análisis de las zonas rurales del estado de Yucatán, las cuales se dedican a la agricultura y carecen de acceso a tecnología inalámbrica basada en IoT para el monitoreo y control de los riegos. En estas zonas se presentan una serie de problemas que afecta en el aspecto económico y también la sostenibilidad económica, las cuales les impide automatizar el riego de sus parcelas o huertos familiares. Este análisis se centra en la problemática sobre la carencia de tecnología inalámbrica basada en IoT en las zonas rurales para la obtención de valores del control de riego y lograr una mejora en sus actividades agrícolas.

Para abordar esta situación, se realiza un análisis comparativo de las tecnologías de comunicación inalámbrica LoRa y Zigbee para la obtención de valores del control de riego a través del monitoreo de parámetros ambientales. Los resultados destacados incluyen las diferencias principales de ambas tecnologías, el análisis de los costos y beneficios de su implementación para finalmente desarrollar una solución aplicada a una problemática real que involucra la tecnología final seleccionada, la cual se implementará en la comunidad analizada.

Esta solución mejora la eficiencia en el monitoreo y control de los riegos, proporcionando datos confiables y permitiendo una toma de decisiones que aporten un beneficio a los pequeños productores donde se implementó este proyecto.

ABSTRACT

The present research work focuses on the analysis of rural areas in the state of Yucatán, which are dedicated to agriculture but lack access to IoT-based wireless technology for irrigation monitoring and control. These areas face a series of challenges that impact both economic and environmental sustainability, preventing them from automating the irrigation of their plots or home gardens. This analysis centers on the issue of the lack of IoT-based wireless technology in rural areas for obtaining irrigation control data to improve agricultural activities.

To address this situation, a comparative analysis of LoRa and Zigbee wireless communication technologies is conducted to collect irrigation control data through the monitoring of environmental parameters. Key results include the main differences between both technologies, an analysis of the costs and benefits of their implementation, and, ultimately, the development of a solution applied to a real issue that involves the selected final technology, which will be implemented in the analyzed community.

This solution improves the efficiency of irrigation monitoring and control, providing reliable data and enabling decision-making that benefits the small producers where this project was implemented.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Antecedentes del problema	13
1.2 Planteamiento del problema	14
1.3 Justificación	16
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	18
2.1 Objetivo general	18
2.1 Objetivos específicos	18
2.3 Planteamiento de la hipótesis	18
III. FUNDAMENTO TEÓRICO	20
3.1 Marco referencial	20
3.2 Marco conceptual	29
3.2.1 Internet de las Cosas (IoT)	29
3.2.1.1 Características principales	31
3.2.1.2 Ventajas e inconvenientes	35
3.2.1.3 Utilización de IoT para recolección de datos	36
3.2.1.4 Componentes del modelo IoT	36
3.2.1.5 Dispositivos	37
3.2.1.6 Comunicaciones	38

3.2.1.7 Control y toma de decisiones inteligente.....	39
3.2.1.8 Aplicaciones de IoT.....	39
3.2.2 Agricultura de precisión.....	42
3.2.2.1 Características.....	43
3.2.3 LoRa.....	44
3.2.3.1 Características principales.....	45
3.2.3.2 Técnicas de ahorro de energía	47
3.2.3.3 Seguridad.....	49
3.2.3.4 Ventajas	51
3.2.3.5 Factores que afectan su alcance y cobertura.....	52
3.2.3.6 Lora aplicada en la agricultura de zonas rurales	54
3.2.3.8 Normativas.....	57
3.2.4.1 Características principales.....	59
3.2.4.2 Técnicas de ahorro de energía	60
3.2.4.3 Seguridad.....	61
3.2.4.4 Capas de protocolo.....	63
3.2.4.5 Ventajas	68
3.2.4.6 Factores que afectan su alcance y cobertura.....	69
3.2.4.7 ZigBee aplicada en la agricultura de zonas rurales.....	70
3.2.4.7 Normativas.....	71

3.2.5 Diferencias entre la tecnología LoRa y ZigBee	73
3.2.6 Escenarios de Aplicación	75
IV. DESARROLLO DEL PROYECTO	77
4.1 Materiales	77
4.1.1 Transceptor de datos E90-DTU (900SL30)	77
4.1.2 Módulo inalámbrico LoRa E220-900T22D	82
4.1.3 Módulo inalámbrico ZigBee DRF1605	87
4.1.4 Sensor de suelo CWT (tipo NPK)	92
4.1.5 Placa Arduino UNO (ATMega328P).....	94
4.1.6 Módulo MAX485 Conversor RS485 a Serial TT	97
4.2 Costos	98
4.3 Etapas.....	99
4.3.1 Adquisición de datos	99
4.3.2 Extracción de la información	103
4.3.3 Visualización de los datos.....	106
4.3.3.1 Programa en Arduino.....	106
4.3.3.2 Interfaz en Android Studio	108
4.3.4 Actuación en el campo	110
V. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	116
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
---------------------------------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características principales de la norma IEEE 802.15.4.....	71
Tabla 2. Diferencias entre LoRa y ZigBee	74
Tabla 3. Escenarios de aplicación.....	75
Tabla 4. Descripción de las partes del componente.....	80
Tabla 5. Modo operativo del transceptor de datos.....	81
Tabla 6. Modos de funcionamiento del módulo inalámbrico LoRa E220-900T22D	84
Tabla 7. Tabla de definición de pines	86
Tabla 8. Rendimiento de transmisión de datos transparente.....	90
Tabla 9. Medición de parámetros del suelo	92
Tabla 10. Especificaciones.....	94
Tabla 11. Ejemplo de la información recibida.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dimensiones de las Tecnologías de la Comunicación	31
Figura 2. Diagrama conceptual del modelo IoT	37
Figura 3. Aplicaciones IoT en el hogar.....	40
Figura 4. Interfaz para personas con discapacidad	40
Figura 5. Interfaz realizada con IoT para la agricultura.....	41
Figura 6. Interfaz creada con IoT para calamidades naturales.....	42
Figura 7. Servicios aplicados a la Agricultura de Precisión	43
Figura 8. Presencia de la red LoRa por países	45
Figura 9. Inmunidad al ruido	46
Figura 10. Casos de uso de la tecnología LoRa	52
Figura 11. Pila de protocolo ZigBee	59
Figura 12. Esquema de la arquitectura de la pila ZigBee	65
Figura 13. Transceptor de datos E90-DTU (900SL30)	77
Figura 14. Conector hembra DB-9 y 3.81 bloque de terminales	79
Figura 15. PWR-LED, TXD-LED, RXD-LED	79
Figura 16. Interfaz de alimentación de CC, interruptor DIP e interfaz de antena	80
Figura 17. Categorías del modo operativo del transceptor de datos	82
Figura 18. Tamaño del módulo inalámbrico LoRa E220-900T22D.....	82
Figura 19. Tamaño mecánico y definición de los pines.....	85
Figura 20. Transceptor de datos transparente: Coordinador de enrutadores	89
Figura 21. Transceptor de datos transparente: enrutador a coordinador.....	89
Figura 22. Formato de envío de la transmisión de datos de punto a punto.....	91

Figura 23. Ejemplo del formato anterior.....	91
Figura 24. Formato de recepción de datos	92
Figura 25. Sensor de suelo CWT (tipo NPK)	92
Figura 26. Diagrama en bloques del ATmega328P.....	96
Figura 27. Módulo MAX485	97
Figura 28. Primer prototipo LoRa/ZigBee armado.....	100
Figura 29. Prototipo final.....	101
Figura 30. Primer transceptor de datos	101
Figura 31. Transceptor de datos comercial	102
Figura 32. Transceptor de datos final	102
Figura 33. Componentes del transceptor de datos no comercial	103
Figura 34. Primeros datos arrojados durante una prueba.....	104
Figura 35. Programa creado para el dispositivo Arduino en las pruebas.....	107
Figura 36. Programa creado para el dispositivo Arduino en las pruebas (parte 2).....	108
Figura 37. Información recolectada con el módulo LoRa	109
Figura 38. Información recolectada con módulos ZigBee.....	110
Figura 39. Tinaco y el PVC hidráulico	112
Figura 40. Pantalla en donde se visualiza la información.....	113
Figura 41. Armado de uno de los vasos comunicantes.....	114
Figura 42. Control del nivel del agua.....	114
Figura 43. Explicación a la señora responsable	115

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes del problema

Debido a los impactos del cambio climático (incremento de la temperatura, aumento de CO₂ y variación en la acidez del suelo) se ha venido afectando la agricultura durante el proceso de cultivo. Estos se ven reflejados en la baja productividad y calidad en la mayoría de las cosechas, “Tal vez se debe a la falta de un sistema de instrumentos que permitan al agricultor conocer cuando y como producir según el clima” (Vera et al., 2015, p. 1). No obstante, se ha venido trabajando en tecnologías inalámbricas con dispositivos más pequeños, económicos y de menor consumo energético que permiten monitorear diferentes variables por medio de sensores que realizan el proceso de toma de datos más continuo y eficiente en diferentes ambientes, ya sean invernaderos o a campo abierto, lo que facilita la toma de decisiones para mejorar los procesos de cultivos y cosecha. Lo anterior conlleva a reducir las pérdidas de cosechas por lo que se hace importante disponer de esta información.

Una preocupación en los temas de tierras de sembradío ha sido el modo de riego. Es aún común el riego manual, el cual presenta desventajas, pues por un descuido humano puede haber exceso o falta de agua en el terreno, dañando así lo que se esté sembrando, ocasionando pérdidas económicas y un posible desaprovechamiento en el uso del más importante recurso hídrico, es decir, el agua. Por otra parte, en lo que respecta a la tecnología empleada, hoy se presentan diversas formas de realizar el monitoreo de parámetros, así como también mejoras para su desempeño buscando su integración con otras tecnologías, y de esta manera aprovechar las cualidades de estas últimas.

Un gran campo de acción en el que la IoT puede ser aplicada es el sector agrícola, creando así agricultura de precisión, que consiste en aplicar las herramientas que hoy en día brindan

las tecnologías de la informática y comunicaciones (TIC's) en conjunto con diferentes sensores y herramientas de IoT, en la administración, manejo de los cultivos y el terreno de los mismos, teniendo en cuenta las variables y propiedades que son importantes a fin de mejorar el rendimiento de los cultivos, la rentabilidad y la calidad del medio ambiente.

Actualmente, en las zonas rurales del Estado de Yucatán se hace necesario conocer el comportamiento de los parámetros ambientales para poder hacer un uso sustentable de los recursos de la naturaleza, como es el caso de actividades productivas del sector agrícola. Por lo cual, el objetivo de la presente tesis es conocer los conceptos relacionados con las redes de sensores inalámbricos, el estudio del entorno del uso de las tecnologías ZigBee y LoRa, para evaluar y diseñar un sistemas inalámbrico de monitoreo con la finalidad de ser implementado en estas zonas rurales de agricultores y/o administradores de la región, brindando una herramienta tecnológica que permita adquirir, adecuar, y transmitir la información de la monitorización de parámetros ambientales de la tierra tales como la temperatura, humedad, fósforo, potasio entre otros a una interfaz, donde los usuarios puedan acceder para visualizar y analizar la información de los datos recopilados.

1.2 Planteamiento del problema

La agricultura en la sociedad se basa en la mejora de los estándares de vida, enfocados en los sectores más pobres y a su vez debe tener presente su sustentabilidad de manera económica, social y medioambiental (FAO, 2017).

En la actualidad el sector agrícola se ve afectado por el cambio climático, donde se han registrado variaciones en el dióxido de carbono y alteración en la acidez del suelo afectando las actividades de la producción (Velázquez et al., 2019).

Asimismo, la calidad de los datos es crucial para lograr la participación y aceptación del usuario con aplicaciones de IoT, debido a que, si los datos son de mala calidad es probable que las decisiones no sean acertadas (Karkouch et al., 2016). Por otro lado, se prevé que exista en el futuro una gran demanda de conectividad de redes IoT, que exista una restringida cantidad de nodos conectados en un área limitada ocasionando la coexistencia de estos múltiples nodos una tasa de datos reducida, de igual manera el auge de las tecnologías IoT ocasionará que exista una abundancia de tecnologías ofertadas en el mercado y la necesidad de infraestructuras cableadas para abarcar grandes áreas de cobertura (Ismail et al., 2018), además, el medio ambiente es conocido por ser uno de los principales factores que conducen a una baja calidad del enlace inalámbrico, a través de los efectos de propagación de múltiples rutas y su contribución al ruido de fondo (Wang & Lee, 2012).

Las zonas rurales, particularmente aquellas dedicadas a la agricultura, se enfrentan a desafíos significativos en la gestión eficiente de sus sistemas de riego. La falta de acceso a tecnología inalámbrica basada en IoT para el monitoreo y control de los riegos plantea una serie de problemas que afectan tanto la sostenibilidad agrícola como el bienestar económico de estas comunidades.

El problema fundamental radica en la carencia de tecnología inalámbrica basada en IoT en las zonas rurales para la obtención de valores del control de riego. Sin la disponibilidad de estas tecnologías, las zonas rurales enfrentan los siguientes desafíos:

- Uso ineficiente de recursos hídricos
- Vulnerabilidad a condiciones climáticas extremas
- Mantenimiento ineficiente de cultivos
- Costos operativos elevados

- Dificultades en la gestión agrícola

En las zonas rurales del Estado de Yucatán, existe una creciente necesidad de mejorar la gestión del riego agrícola y el monitoreo de parámetros ambientales. El desafío principal radica en la limitación de acceso a datos confiables y actualizados que permitan a los agricultores y administradores tomar decisiones informadas sobre el riego y el manejo de cultivos.

Por lo tanto, se propone después de haber realizado un análisis exhaustivo de estas dos tecnologías implementar según la tecnología mejor evaluada, dos proyectos reales que apoyen en el día a día a productores agrícolas en su ejercicio diario, analizando las ventajas que estas pudieran proporcionar al ser implementadas. De igual manera, el diseño de una interfaz que permita la recopilación periódica de datos precisos de parámetros ambientales de la tierra tales como la temperatura, humedad, fósforo, potasio entre otros, en zonas rurales de Yucatán. Esta interfaz permitirá a los usuarios visualizar de manera sencilla y accesible los datos recopilados desde cualquier dispositivo.

1.3 Justificación

Los costos de equipos de medición de variables climáticas son excesivamente elevados para pequeños y medianos productores agrícolas, los cuales no reflejan costos de producción del cultivo.

Para medir las variables climáticas incidentes en el cultivo se necesitan de sensores que proporcionen las medidas necesarias y de forma automática para mejorar la capacidad de tomar decisiones en los cultivos y que el agricultor y/o administrador pueda mejorar la producción y con ello evitar el uso excesivo de recursos.

Hoy en día, uno de los conceptos tecnológicos que crece cada vez más es el IoT (Chulbi, 2020), presenta altas demandas de comunicaciones entre dispositivos denominada Comunicación Tipo Máquina (MTC), generando interés en la integración de soluciones de conectividad con sensores, medidores, actuadores, autos, etc. (Hamidreza et al., 2015), los cuales son controlados remotamente o a su vez sin la intervención del ser humano. IoT se basa en una serie de redes con distintos objetivos de diseño, las 25 MTC emplean diferentes tecnologías que se pueden clasificar según la tasa de transmisión de datos y cobertura. De igual manera, las tecnologías de red de área amplia de baja potencia Low Power Wide Área Network (LPWAN) están diseñadas para una distancia de transmisión mayor a un kilómetro, con bajo consumo de potencia y soportando transmisión de datos en banda angosta, esto se efectúa con un bajo costo de comunicación (Machado, 2019), estas tecnologías utilizan tanto banda de espectro no licenciada como licenciada. Por consiguiente, mediante la implementación de sensores inalámbricos que permitan disponer de información en tiempo real censando variables tales como la temperatura, humedad, fósforo, potasio entre otros en el suelo se puede aumentar la eficiencia en la producción y desarrollo de los cultivos, además, de la reducción de pérdidas en los mismos; esto permite también generar la información necesaria para la mejora y elección de técnicas de cultivo más adecuado.

Tomando en cuenta lo antes mencionado, esta tesis busca tener un estudio detallado que permita reconocer las prestaciones de las tecnologías inalámbricas Lora y Zigbee utilizadas en nodos sensores mediante la comparativa poder definir cuál de las alternativas es la más adecuada en entornos agrícolas dentro de las zonas rurales del Estado de Yucatán, de esa manera, implementar una red de sensores que utilice dicha tecnología inalámbrica.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivo general

Realizar un análisis comparativo de las tecnologías de comunicación inalámbrica LoRa y Zigbee para la obtención de valores del control de riego a través del monitoreo de parámetros ambientales en zonas rurales del Estado de Yucatán.

2.1 Objetivos específicos

- Recopilar información acerca de las tecnologías inalámbricas para la obtención de parámetros ambientales.
- Seleccionar dicha información sobre estas tecnologías inalámbricas aplicada en la monitorización y obtención de parámetros ambientales de zonas rurales en Yucatán.
- Estudiar las principales tecnologías inalámbricas seleccionadas para su posterior comparación.
- Implementar prototipos compatibles de ambas tecnologías y analizar los costos que representa la ejecución de cada una de ellas.
- Desarrollar una interfaz que permita la visualización de la información recolectada.
- Realizar proyectos reales que involucren la ejecución del prototipo elaborado con la tecnología elegida.

2.3 Planteamiento de la hipótesis

Demostrar cuál tecnología inalámbrica LoRa o ZigBee es la opción más eficiente y adecuada para la obtención de variables ambientales mediante la monitorización de cultivos, en términos de su capacidad para recopilar datos de manera precisa y asequible, que sean de

bajo costo y con la suficiente capacidad para ofrecer una cobertura efectiva en zonas rurales de Yucatán.

III. FUNDAMENTO TEÓRICO

Los antecedentes investigativos, es decir, los trabajos de investigación, dentro y fuera de la academia, que se han hecho previamente sobre el tema.

Las bases teóricas y conceptuales, es decir, los trabajos de reflexión, interpretación y teorización en torno al tema que constituyen la literatura especializada. Esto puede incluir un glosario especializado, o sea, un conjunto de definiciones clave, así como una serie de propuestas teóricas o conceptuales (Farías, 2024).

3.1 Marco referencial

Los trabajos previos vinculados a la presente tesis se detallan a continuación: En lo que concierne a la implementación de sistemas usando las tecnologías LoRa y ZigBee, se encontró trabajos similares con la investigación realizada, como lo es:

1. Hacia una plataforma de servicios agrícolas inteligentes con una red de sensores inalámbricos basados en LoRa

Propone una plataforma de servicios agrícola inteligente con tecnología de comunicación LoRa, la cual fue desarrollada en Taiwán y permite integrar los conocimientos IoT con una tecnología de comunicación novedosa. Ocho sensores medioambientales fueron utilizados para recopilar información en un ambiente real. Los parámetros medidos fueron: Concentración de dióxido de carbono, temperatura, humedad ambiental, intensidad luminosa, temperatura de terreno, humedad de terreno, dirección del viento y velocidad del viento. Se empleó una plataforma Arduino para preprocesamiento, una interface LoRa para

enviar los datos a una estación base y a un servidor para análisis y presentación en una página web. Se compararon 5 sensores de temperatura y 5 sensores de humedad para determinar los más precisos utilizando los métodos comparación de error promedio y comparación de coeficiente de dependencia. Una casa para sensores fue elaborada para albergar los dispositivos en campo (Ma & Chen, 2018).

La investigación presentada en la conferencia IEEE ICASI 2018 y la tesis tienen una relación estrecha, ya que ambas abordan el uso de tecnologías inalámbricas, específicamente LoRa, en el ámbito agrícola, aunque desde perspectivas ligeramente diferentes.

Ambos trabajos están orientados hacia la interfaz de tecnologías inalámbricas en el sector agrícola. La investigación busca mejorar la eficiencia y la gestión agrícola a través de una plataforma inteligente, mientras que la tesis se enfoca en el control de riego, un aspecto crucial para la agricultura, utilizando sensores inalámbricos.

Tanto la investigación como la tesis involucran el monitoreo de parámetros ambientales en contextos agrícolas. La investigación busca utilizar sensores inalámbricos para recopilar datos relevantes para la agricultura, y de igual forma la tesis a desarrollar se enfoca en obtener parámetros ambientales mediante el monitoreo.

En resumen, ambas comparten el enfoque en el uso de tecnología inalámbrica LoRa en aplicaciones agrícolas, aunque con enfoques ligeramente diferentes.

2. Agricultura de precisión usando LoRa

Propone una solución desarrollada en la India para la medición de minerales presentes en las tierras agrícolas siendo éstos nitrógeno, potasio y fósforo, además de humedad relativa,

humedad del terreno y temperatura utilizando sensores, tecnología LoRa y computación en la nube. Los sensores fueron colocados en los campos y la información fue enviada hacia un Gateway LoRaWAN, para luego ser redirigida hacia la nube para su análisis. Se presentó la información a los clientes finales mediante correo electrónico o mensajes de texto (SMS). Se desarrollaron diagramas de flujo para explicar los algoritmos implementados para el nodo cliente y gateway con múltiples 27 nodos. El sistema estuvo formado por 3 módulos: Módulo cliente, módulo gateway y módulo nube. El módulo cliente estuvo formado por nodo LoRa con un controlador atmega128 y los sensores de monitoreo. El módulo gateway tuvo un alcance con los nodos comprendido entre 1 y 3 kilómetros en campo abierto. Utilizó Wi-Fi para remitir los datos a la nube. El módulo nube utilizó HTTP para comunicarse con el gateway y realizó el análisis de los datos en MATLAB (Tapashetti & Shobha, 2018).

Ambos trabajos se centran en el uso de tecnología inalámbrica en el contexto agrícola. La investigación sobre agricultura de precisión utilizando LoRa se enfoca específicamente en la implementación de esta tecnología para la medición de minerales y parámetros ambientales en campos agrícolas. Por otro lado, la tesis evalúa la factibilidad técnica tanto de LoRa como de Zigbee para el control de riego y el monitoreo de parámetros ambientales en zonas rurales de Yucatán. Esta conexión es evidente en el hecho de que ambos trabajos exploran el potencial de la tecnología inalámbrica para mejorar la eficiencia y la gestión en la agricultura. Tanto la investigación como la tesis involucran el monitoreo de parámetros ambientales en contextos agrícolas. Mientras que la investigación se centra en la medición de minerales y otros parámetros, esta segunda se enfoca en el monitoreo de parámetros ambientales para el control de riego. A pesar de esta diferencia, ambos trabajos tienen un

objetivo común de utilizar tecnología inalámbrica para recopilar datos ambientales relevantes para la agricultura y mejorar la toma de decisiones en este campo.

De igual manera, los dos trabajos también comparten un enfoque en una interfaz en zonas rurales. Mientras que la investigación sobre agricultura de precisión usando LoRa se desarrolló en la India, la segunda investigación se centra en las zonas rurales del Estado de Yucatán. Esta conexión geográfica resalta la relevancia de ambos trabajos para abordar desafíos específicos en entornos agrícolas rurales.

3. LoRaWAN para cultivos agrícolas en la localidad de Santa María Roaló, Oaxaca

Se observan diversas dificultades que presentan los agricultores de la comunidad de Roaló, en el municipio existen tres tipos de tenencia de la tierra, la ejidal, pequeña propiedad y comunal. La comunidad de Santa María Roaló, ubicada en el Municipio de Trinidad Zaachila del Estado de Oaxaca, cuenta con un amplio terreno para cultivos agrícolas, dentro de los cuales destacan el maíz, frijol, calabaza, aguacate, entre otros. Sin embargo, diversos factores, como el control erróneo de la humedad y temperatura y la inapropiada interfaz del riego, los cultivos presentan debilidades, provocando bajas e incluso pérdidas de cosechas o frutos de menor calidad.

Con el fin de incorporar tecnología en el campo y de tratar de dar solución a las dificultades actuales que presentan la agricultura de Roaló, se planteó una interfaz de la tecnología LoRa para realizar monitoreos de la humedad y temperatura del suelo, mediante análisis de datos obtenidos de sensores incorporados en el mismo. De igual manera, el riego será optimizado,

al concluir el análisis de la humedad del suelo, esto con la finalidad de que el agricultor pueda tomar decisiones oportunas en beneficio de sus cultivos

La implementación del hardware se llevó a cabo en un cultivo agrícola el cual permitió realizar las lecturas de las principales variables físicas que afectan a un cultivo (temperatura, humedad, radiación y Ph), el desarrollo de hardware se desarrolló bajo las condiciones climatológicas que se presentan en terreno, para esto fue necesario el diseño de una caja protectora en cada uno de los nodos con unas características especiales las cuales permiten proteger los circuitos. Los sensores permitieron obtener información verídica durante el proceso de prueba, sin embargo, el sensor de Ph presenta fallas en la lectura debido a que el sensor implementado no está diseñado específicamente para sistemas agrícolas, este sensor se presenta solo para muestro de la tierra más no debe de ser constante su medición ya que si se encuentra en terreno todo el tiempo no dará una información valida. Los sensores de temperatura, humedad y radiación tuvieron un comportamiento óptimo con un desgaste mínimo de sus componentes debido a las condiciones climatológicas a las que estuvieron expuestos.

La investigación sobre "LoRaWAN para cultivos agrícolas en la localidad de Santa María Roaló, Oaxaca" y mi tesis sobre "Estudio de factibilidad técnica de la tecnología inalámbrica LoRa y Zigbee basadas en IoT para la obtención de valores del control de riego mediante el monitoreo de parámetros ambientales en zonas rurales del Estado de Yucatán" están relacionadas por su enfoque en el uso de tecnologías inalámbricas para mejorar la gestión agrícola y el monitoreo de variables ambientales en entornos agrícolas.

Estos estudios tienen como objetivo mejorar la eficiencia y la productividad agrícola mediante el uso de tecnologías inalámbricas y el monitoreo en tiempo real de las condiciones ambientales. Además, comparten la meta de proporcionar a los agricultores herramientas y datos precisos para tomar decisiones informadas sobre el manejo de sus cultivos, lo que puede conducir a una mejor gestión del agua y a una mayor calidad y cantidad de cosechas. En conjunto, estas investigaciones muestran cómo las tecnologías inalámbricas pueden tener un impacto positivo en la agricultura en diversas regiones rurales.

4. Sistema de riego por goteo automático utilizando una red de sensores inalámbricos

Propone el empleo de una red de sensores inalámbricos con tecnología ZigBee en topología malla para el monitoreo del fundo Santa Gabriela en el distrito de Santa Rita de Sigwas, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa, la cual tiene una extensión de más de 35 hectáreas. Emplea sensores de conductividad eléctrica, humedad y temperatura para medir las condiciones del suelo, así como válvulas 21 solenoides de riego para control del flujo de agua. Los nodos terminales ZigBee cumplen el estándar 802.15.4, operan en la banda de 2.4 GHz y tienen un alcance entre 1 y 1.5 Kilómetros. Se instalaron 72 nodos ZigBee de monitoreo en el área de cultivo, 18 nodos ZigBee de control de riego y 1 nodo coordinador central (Mayhua et al., 2016).

La tesis e investigación implican el monitoreo de parámetros ambientales para mejorar la gestión del riego en la agricultura. Mientras que la investigación se centra en el monitoreo del suelo utilizando sensores de conductividad eléctrica, humedad y temperatura, la tesis se

enfoca en el monitoreo de parámetros ambientales para el control de riego en zonas rurales de Yucatán. Esta relación se basa en el objetivo común de utilizar datos ambientales para mejorar la eficiencia y la precisión en la gestión del riego agrícola.

Por último, la investigación sobre el sistema de riego por goteo automático como la tesis a desarrollar se centran en el uso de tecnología inalámbrica para la gestión del riego en entornos agrícolas. La primera investigación se enfoca en el uso de tecnología ZigBee, y la segunda evalúa tanto LoRa como Zigbee para el control de riego en zonas rurales de Yucatán. Esta conexión se basa en el enfoque común en la evaluación e interfaces de tecnologías inalámbricas para la gestión del riego en la agricultura.

5. Hidropónico automatizado con monitoreo remoto mediante comunicación Zigbee y aplicación IoT

El sistema de vigilancia que fue implementado para medir las diferentes variables ambientales en un cultivo hidroponía empleó la tecnología inalámbrica ZigBee. Las variables que se midieron son de temperatura y humedad utilizando el sensor dht22. La comunicación es a través de la tecnología de radio ZigBee utilizando módulos Xbee S2 configurados como nodos y enrutadores, lo que les permite comunicarse mediante el envío y la recepción de datos. El Arduino Mega recibe, procesa y transmite los datos de los sensores medidos en el prototipo de hidroponía. En el sistema hidropónico propuesto la comunicación que se trabaja utiliza los dos tipos de protocolos HTTP y el protocolo ZigBee teniendo una mejor comunicación inalámbrica haciéndolo un prototipo más robusto.

En la plataforma Thingspeak se creó la interfaz para el monitoreo del prototipo del cultivo hidropónico de fácil interpretación, dentro de la plataforma se generó cuatro graficas que indican la temperatura, humedad, distancia y el pH, de tal manera que la interfaz de monitoreo exporta datos diariamente

El diseño y la implementación de este prototipo contribuyó a descubrir que se puede acceder a nuevos métodos de cultivos utilizando tecnologías eficaces que ayuden a la productividad teniendo en cuenta el factor de costos beneficios esta tecnología es necesaria incursionar en el campo agrónomo ayudando al agricultor a tener una mejor calidad de vida y a la gran demanda de alimentos que se tiene actualmente. (Bahamonde, 2022)

La relación recae en que ambos trabajos tienen como objetivo principal analizar y comparar tecnologías inalámbricas para la obtención de valores del control de riego a través del monitoreo de parámetros ambientales. Mientras que tu tesis se enfoca en LoRa y Zigbee, el proyecto de titulación se centra en la comunicación Zigbee para monitorear un sistema hidropónico.

Por último, mi tesis como el proyecto de titulación implica la recopilación de información sobre tecnologías inalámbricas aplicadas en la monitorización de parámetros ambientales, la selección de estas tecnologías para su interfaz en zonas rurales específicas, y el estudio y comparación de las tecnologías inalámbricas seleccionadas.

Además, estos trabajos incluyen la implementación de una red inalámbrica compatible con la tecnología seleccionada y el desarrollo de una interfaz para la visualización de datos recolectados.

6. Implementación y Análisis de desempeño de una red de sensores inalámbricos inteligentes para una interfaz en monitoreo y control de variables.

La propuesta de esta tesis se basó en el desarrollo de un sistema que mediante sensores inalámbricos permitiera monitorear variables ambientales como temperatura, humedad, luz, etc., de un huerto de manzanas y que sirva posteriormente para controlar una red de calefactores para que con esto se pueda evitar que el frío dañe el cultivo.

El sistema fue instalado en el edificio de posgrado del ITCH2, posicionando 2 nodos en el mismo, uno en el techo dentro un plafón y otro en la azotea.

En la etapa de análisis y desarrollo de hardware se definió que el proyecto consistiría en implementar una red de malla basada en módulos XBee los cuales enviarán datos de diversos tipos de sensores (por ejemplo: temperatura, humedad y luz). Se diseñaron una serie de dispositivos portátiles que funcionan como sensores o actuadores inteligentes. Para el desarrollo del hardware se utilizó el software Proteus que permite simular circuitos electrónicos, con este software de diseño se desarrollaron los diagramas básicos para los módulos sensor-microcontrolador.

El sistema debe poder incluir todo tipo de sensores de forma sencilla, en todos los diseños de módulos se utilizó un Arduino para realizar la codificación de los datos en formato JSON y posteriormente en el formato de paquete de ZigBee. Estos datos son transformados al formato de paquete TransmitData ZigBee.

Por último, se desarrolló una interfaz para el sistema operativo Android, a través de esta interfaz el usuario puede monitorear el estado del campo de cultivos, puede recibir datos de

sensores, recibe alertas sobre cualquier incidencia y permite enviar mensajes entre los usuarios, así como asignar tareas para los empleados. (Espinosa, 2021)

La relación entre ellas es la siguiente: la investigación y la tesis se centran en el uso de tecnologías inalámbricas para el monitoreo y control de variables ambientales, aunque con enfoques diferentes.

La investigación de Luis Fernando Espinosa Trejo se enfoca en la implementación y análisis del desempeño de una red de sensores inalámbricos inteligentes para monitorear y controlar variables en general. Mientras que la tesis se centra específicamente en el estudio de la factibilidad técnica de las tecnologías inalámbricas LoRa y Zigbee basadas en IoT para el control de riego a través del monitoreo de parámetros ambientales en zonas rurales de Yucatán.

Estos dos trabajos comparten el interés en utilizar tecnologías inalámbricas para mejorar la gestión y eficiencia en la agricultura, aunque la tesis se enfoca en una interfaz más específica relacionada con el control de riego, mientras que la investigación aborda una perspectiva más amplia sobre el monitoreo y control de variables en general.

3.2 Marco conceptual

3.2.1 Internet de las Cosas (IoT)

El término Internet de las Cosas del inglés Internet of Things (IoT) fue utilizado por primera vez por Kevin Ashton en una presentación para la multinacional Procter & Gamble, tenía el deseo de hacer una introducción de la tecnología Identificación por Radiofrecuencia del inglés Radio Frequency Identification (RFID). Actualmente ha tomado gran relevancia, la

Unión Internacional de Telecomunicaciones lo define como “Infraestructura mundial para la sociedad de la información que propicia la prestación de servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales)”, además, es posible juntar los conceptos de las palabras sensores, identificadores, software y conectividad de Internet para definir a esta tecnología como “ IoT es la red de cosas, con identificación de elementos, embebido con inteligencia de software, sensores, y conectividad a internet ubicua” (Rayes & Salam, 2019).

El Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet – IETF (Internet Engineering Task Force, 2019), se propone la siguiente definición para el internet de las cosas: “Red global que conecta objetos identificables con capacidades de detección, actuación, procesamiento y comunicación con otros dispositivos, centro de datos o nubes computacionales empleando tecnologías de comunicación e información, con el propósito de obtener aplicaciones avanzadas e información productiva”.

En general se puede entender Internet de las Cosas como la interconexión de dispositivos mediante tecnologías que utilicen medios tanto guiados como no guiados, con el objetivo de que exista una compartición de datos entre dichos dispositivos y el usuario final, logrando así que este pueda brindar un tratamiento para su posterior interpretación. Esta tecnología agrega una dimensión al ya existente paradigma de las Tecnologías de la Comunicación, teniendo los siguientes como pilares fundamentales: “Comunicación en cualquier momento”, “Comunicación en cualquier lugar” y “Comunicación de cualquier cosa”, como se representa gráficamente en la Figura 1.

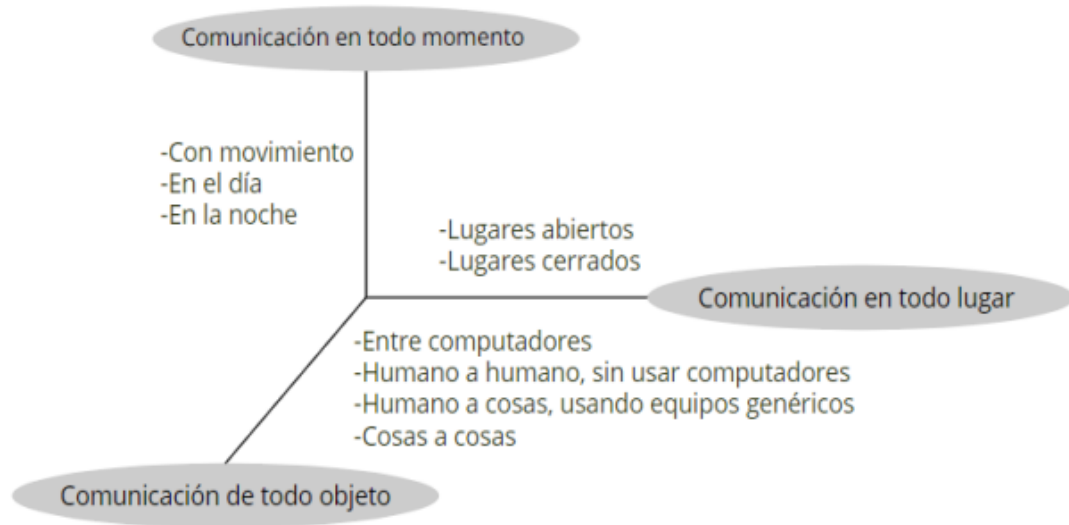


Figura 1. Dimensiones de las Tecnologías de la Comunicación

Fuente: (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones, 2012)

3.2.1.1 Características principales

Actualmente, los sistemas IoT emplean un elenco disperso de redes diferentes y con distintos fines. En ocasiones, se trata de plataformas que utilizan redes privadas virtuales (VPNs) que se activan por encima de Internet. En otras, los objetos se conectan directamente al propio Internet.

A medida que el IoT evolucione y se perfeccione, estas plataformas y redes dispondrán de mayores capacidades de seguridad, análisis y administración. Este progreso permitirá que el Internet de las Cosas sea una herramienta aún más poderosa, y consiguientemente que adquiriera una gran importancia, porque se trata de la primera evolución real de Internet (un salto que conducirá a aplicaciones revolucionarias con el potencial de mejorar drásticamente la manera en que los ciudadanos viven, aprenden, trabajan y se entretienen).

De hecho, el IoT es ya sensorial (procesa ya temperatura, presión, vibración, luz, humedad, estrés, ...), lo que se traduce en ganancias tangibles de mayor proactividad (y consiguiente menor reactividad). Y es también ubicuo: el hecho de que Internet esté presente en todas partes gracias a las tecnologías inalámbricas (3G, 4G, 5G, wi-fi, wimax, conexiones satelitales, etc.) permite que la implantación masiva de esta tecnología sea más factible. Dado su tamaño y su costo, los sensores son en la actualidad fácilmente integrables en toda clase de lugares públicos o privados (o incluso prendas de vestir).

En consecuencia, como ha quedado apuntado, cualquier objeto es susceptible de ser incorporado al IoT, por lo que todo objeto puede ser una fuente de datos, pero también un posible vector de ataque. Estas propiedades están empezando a transformar la forma de hacer negocios, la organización del sector público y los hábitos de millones de personas. Sin embargo, sus consecuencias son, a día de hoy, en gran parte desconocidas e insospechadas, ya que el IoT aumenta el riesgo de que se abuse de la información, que se obtenga acceso no autorizado a los dispositivos, que los dispositivos sean perturbados o dañados o, en fin, que faciliten los ataques a otros sistemas al ser utilizados sus componentes como puerta de acceso a éstos.

Por su parte, y como punto de partida para abordar la tarea de la regulación jurídica inteligente del IoT, hay que apuntar sus rasgos más característicos ya advertidos por la doctrina:

A) Comunicación y cooperación. Los objetos tienen la capacidad de estar conectados en red con otros, o incluso con recursos de Internet, hacer uso de los datos y servicios, así como actualizar su estado. Las tecnologías inalámbricas como 3G, 4G, 5G, Wifi,

Wimax, Bluetooth, 802.11, Zigbee y otros estándares de red inalámbricas actualmente en desarrollo, especialmente los relativos a redes inalámbricas privadas, tanto de área doméstica como de área empresarial, son de primordial importancia.

- B) Identificación.** Los objetos son identificables de forma única. RFID (Radio Frequency Identification), NFC (Near Field Communication) y los códigos de barras ópticamente legibles son ejemplos de tecnologías que habilitan esta identificación singular, incluso si son objetos pasivos que no tienen recursos energéticos integrados (en este caso con la ayuda de un “mediador”, como un lector de RFID o un teléfono móvil). La identificación permite que los objetos estén ligados a información asociada con el bien concreto y que se pueda recuperar de un servidor, siempre que el objeto (o mediador) esté conectado a una red.
- C) Direccionamiento.** Los objetos pueden ser ubicados y dirigidos a través de servicios de investigación, búsqueda o nombres de dominio (como ONS, EPC Discovery Services o DNS) y, por lo tanto, remotamente interrogados o configurados.
- D) Detección.** Los objetos recopilan información sobre su entorno con sensores, graban, reenvían datos o reaccionan directamente sobre aquél.
- E) Actuación.** Los objetos contienen actuadores para manipular físicamente su entorno (por ejemplo, transformando las señales eléctricas en movimiento mecánico para abrir una ventana). Estos actuadores pueden utilizarse para controlar de forma remota procesos reales a través de Internet.
- F) Procesamiento de información integrado.** Los objetos inteligentes cuentan con una capacidad técnica de un procesador o microcontrolador, y además con espacio de almacenamiento. Este hardware puede utilizarse, por ejemplo, para procesar e

interpretar información del sensor, o almacenar históricos en su memoria de cómo se han utilizado.

G) Localización y rastreo. Los objetos inteligentes son conocedores de su ubicación física, o pueden ser geográficamente ubicados. Mediante tecnologías como el GPS (Global Positioning System), el análisis del tráfico de Internet o de las celdas de telefonía móvil es posible localizar y rastrear un dispositivo. Estas tecnologías, si bien son previas al IoT, revisten especial importancia aquí ya que son utilizadas con gran intensidad en sus aplicaciones. Se señala que el IoT cambia y agrava esta amenaza de tres maneras. En primer lugar, se observa un uso creciente de servicios basados en localización (LBS), ya que las tecnologías del IoT no sólo apoyan el desarrollo de este tipo de servicios de localización y mejoran su exactitud, sino que también amplían los servicios en los ambientes de interior. En segundo lugar, como la recolección de datos es más pasiva y aparentemente poco intrusiva, los usuarios pueden ser menos conscientes de cuándo se está efectuando su localización y rastreo, y los riesgos que ello implica. En tercer lugar, la creciente interacción con los objetos y los sistemas inteligentes deja rastros de datos que no sólo ponen al usuario en riesgo de identificación, sino que también permiten hacer un seguimiento de su ubicación y actividad.

H) Interfaces de usuario. Los objetos y sistemas inteligentes pueden comunicarse con los usuarios de manera adecuada (directa o a distancia, por ejemplo, a través de un smartphone). Del mismo modo, los llamados “paradigmas de interacción innovadores” son aquí aplicables, tales como interfaces táctiles, pantallas flexibles

basadas en polímeros, métodos de reconocimiento de voz, imagen o gestos, así como sistemas de realidad virtual o asistentes inteligentes.

3.2.1.2 Ventajas e inconvenientes

A continuación, se muestran una serie tanto de ventajas como inconvenientes que se pueden derivar de IOT.

- **Tomar mejores decisiones:** Tiene capacidad para generar, analizar y distribuir datos con mayor velocidad, siendo además más cuantiosos y variados. Tras analizar esta mayor cantidad de datos disponibles, se pueden tomar decisiones de forma más eficiente y fiable (Evans, 2017).
- **Reducción de costos:** Aplicar IOT en las industrias permite optimizar el uso de recursos, así como mejorar el rendimiento y aumentar la productividad (Mora Peralta & Urrego Gaitán, 2018).
- **Ahorro de tiempo:** Muchas de las labores se pueden dejar en manos de dispositivos interconectados, ya que las pueden realizar de manera automatizada. Ello nos permite ahorrar tiempo al delegar en estos dispositivos ciertas funciones (Sepúlveda Giménez, 2019).
- **Minimiza el error humano:** Las personas pueden cometer errores que pueden evitarse con sistemas automatizados (Mora Peralta & Urrego Gaitán, 2018).
- **Costo y necesidad de inversión:** Para poder implementar o utilizar dispositivos IOT es necesario realizar una inversión, que será mayor o menor en función de dispositivo que se trate. En ocasiones puede requerir también inversión para su mantenimiento, además del costo de adquisición (Sepúlveda Giménez, 2019).

3.2.1.3 Utilización de IoT para recolección de datos

La recopilación de datos es clave para lograr planificación estratégica en cualquier área que se trabaje. En la industria productiva, agricultura, marketing, servicios, el recopilar datos sirve para apuntar los esfuerzos hacia diferentes objetivos. A través de sensores IoT y el software de control pueden mejorar considerablemente la eficiencia energética, por ejemplo, ya que nos permite recopilar y analizar información crucial como monitorear el consumo de energías, el tiempo gastado en una tarea, la capacidad de un silo, etc.

Todo esto siempre de datos fidedignos. Es decir, un sistema que permita garantías de que los datos recopilados serán útiles para la empresa y, sobre todo, en tiempo real. En un estudio de 2018, las respuestas indicaron que el 80% de las empresas tenían proyectos de recolección de datos de energía y sustentabilidad en tiempo real.

La captura de datos es la primera capa de la arquitectura de aplicaciones de IoT. Por ello se debe asegurar que los dispositivos capturen información relevante en tiempo real. En caso de un mal funcionamiento del sensor o errores de procesamiento, es probable que el usuario final obtenga datos falsos.

3.2.1.4 Componentes del modelo IoT

Independientemente del número de capas del modelo IoT, las aplicaciones IoT se pueden caracterizar con el análisis de 3 componentes esenciales que las definen:

- Dispositivos u objetos inteligentes
- Comunicaciones
- Control y toma de decisiones inteligente

Estos componentes se encuentran representados en aspectos como los sensores y actuadores, las estaciones base, gateways y la infraestructura de comunicaciones, o la analítica de datos y la gestión de las aplicaciones. Se puede ver una representación en la figura 2.

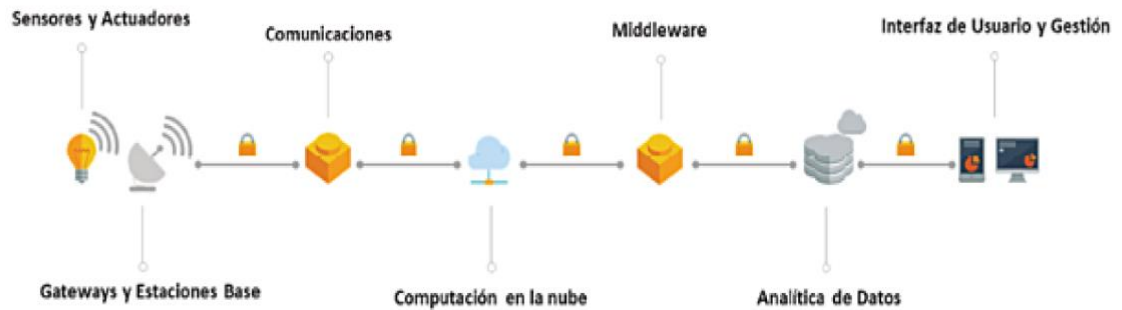


Figura 2. Diagrama conceptual del modelo IoT

Fuente: (Villa, Morales, 2023, p.93)

3.2.1.5 Dispositivos

En el mundo IoT, un dispositivo inteligente, objeto inteligente o “cosa” inteligente se puede definir como un objeto virtual o físico capaz de ser identificado e integrado en redes de comunicaciones. Es fundamental que estos objetos tengan capacidades de comunicaciones, ya que su función principal es intercambiar datos entre ellos y los servicios software que los están soportando en el backend.

Adicionalmente, los dispositivos inteligentes pueden tener características como medidores, calibradores, actuadores, almacenamiento y procesamiento de información, ejecución de aplicaciones locales o en la nube, etc.

El conjunto de “cosas” u objetos que componen un ecosistema IoT puede ser gestionado por una aplicación software inteligente, que es capaz de conectarse a estos objetos,

monitorizarlos, controlarlos y extraer datos de ellos para obtener información que permita tomar decisiones apoyadas en estos datos, decisiones “inteligentes”.

3.2.1.6 Comunicaciones

Las necesidades de comunicación varían dependiendo de los casos de uso y diseño de las aplicaciones IoT, especialmente el propósito y el tipo de dispositivo final y las capacidades o no que tenga. Por tanto, la selección de protocolos de comunicación para un despliegue de un ecosistema IoT en particular va a depender de los requerimientos y constricciones de su caso de uso. La combinación de diferentes protocolos en un ecosistema IoT es práctica común, utilizando gateways y pasarelas middleware para asegurar la interoperabilidad.

Las comunicaciones de un sistema IoT dependen de la capacidad de transmitir y recibir unidades de información de forma estructurada, con servicios locales o remotos, usando redes de comunicación diferentes pero interoperables. Estas redes de comunicación tienen diferentes propiedades que se tienen que considerar a la hora de diseñar soluciones que se apoyen en ellas, como calidad de servicio, fiabilidad, elementos de ciberseguridad y gestión. Los protocolos de comunicación IoT pueden ser inalámbricos o cableados. En el mundo inalámbrico se tiene una gran variedad de protocolos que se pueden utilizar en un ecosistema IoT incluyendo de corta distancia como Zigbee, Bluetooth/BLE, WiFi, NFC O RFID; protocolos celulares y protocolos de radio de largo alcance, como Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M. Cada uno está definido por su propio estándar normalmente.

3.2.1.7 Control y toma de decisiones inteligente

El fin último de un despliegue IoT es la ayuda en la toma de decisiones del entorno que se digitaliza mediante estas tecnologías. Para ello, es necesario desplegar herramientas de análisis de datos y gestión de datos masivos (Big Data) que nos permitan obtener conclusiones de los patrones de datos generados.

Las decisiones “inteligentes” o informadas dependen sobre todo de la cantidad y calidad de la información disponible para poder tomarlas. Decisiones simples como realizar una acción si se supera un cierto umbral, o complejas que involucren mecanismos de aprendizaje mediante ML/DL. El resultado de estas decisiones conlleva acciones y quizás a alimentar nueva información para el sistema.

Esta información puede ser analizada o preprocesada localmente si los dispositivos tienen estas capacidades, o enviada a otros elementos del servicio IoT, como la aplicación vertical en un sistema software físico, virtual o en la nube.

Todo este proceso se apoya en las plataformas de software horizontales y verticales de gestión de servicios IoT, y son fundamentales desde el punto de vista del análisis de seguridad del sistema completo.

3.2.1.8 Aplicaciones de IoT

Algunos de los lugares donde IoT encuentra su utilidad y propósito se detallan a continuación (Chaudhary et al. 2019):

Si el usuario está en la sala y los sensores instalados en el refrigerador detectan que es necesario rellenar las botellas de agua en el refrigerador entonces el sensor instalado en el refrigerador generaría el mensaje de 'búsqueda' de transmisión a todos los sensores instalados en la casa, ya sea en la sala de estar, el vestíbulo, el salón o el comedor, para 'averiguar'

dónde está la persona y poder transmitirle la información, y puede proceder hacia el refrigerador para rellenar la botella de agua. Lo anterior descrito se observa en la figura 3.

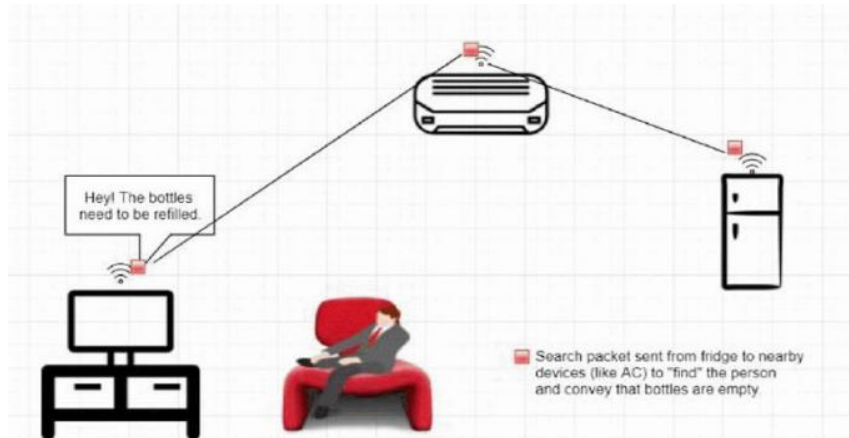


Figura 3. Aplicaciones IoT en el hogar

Fuente: (Chaudhary, Johari, Bhatia, Gupta, Bhatnagar, 2019)

IoT puede ser de gran utilidad para resolver los problemas de las personas con discapacidades físicas o con discapacidades especiales en su vida cotidiana. Un Paquete que contiene información de que la persona con discapacidad quiere visitar el hospital, es lo que se muestra en la figura 4.

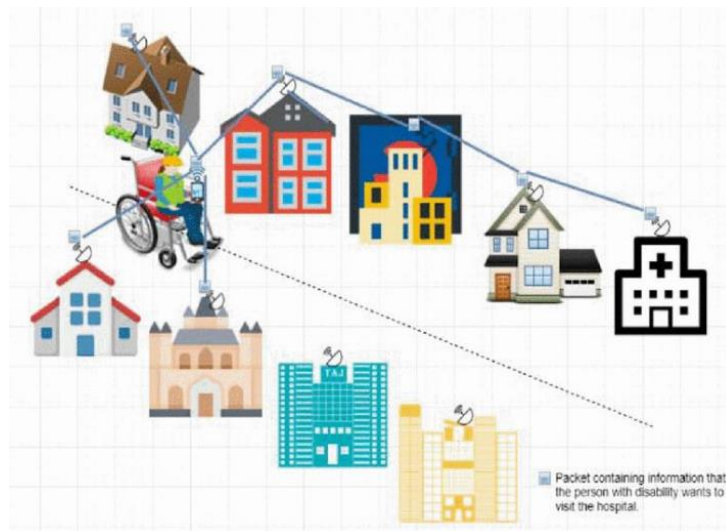


Figura 4. Interfaz para personas con discapacidad

Fuente: (Chaudhary, Johari, Bhatia, Gupta, Bhatnagar, 2019)

La agricultura es la columna vertebral de un país en desarrollo mediante el despliegue de los nodos sensores en el interior del suelo, ayudando a los agricultores a planificar el mes y la época del año para sembrar las semillas, mantener sano el retoño en crecimiento al lograr mantenerlo libre de enfermedades mediante el uso de la calidad y cantidad correcta de insecticidas, la entrega adecuada y oportuna de agua al suelo, etc., ha todo esto se le denomina riego inteligente, para que el rendimiento del cultivo sea alto y los agricultores puedan obtener una rica recompensa de su producto. A continuación, se presenta la figura 5, en donde se pueden apreciar los nodos sensores en el interior del suelo.

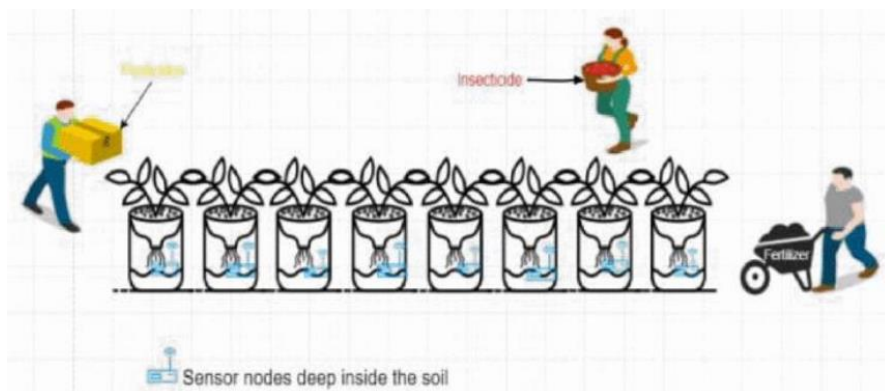


Figura 5. Interfaz realizada con IoT para la agricultura

Fuente: (Chaudhary, Johari, Bhatia, Gupta, Bhatnagar, 2019)

IoT puede desempeñar un papel muy decisivo para predecir la ocurrencia de calamidades naturales como: Terremotos, tsunamis, inundaciones repentinas, tormentas eléctricas, tormentas de granizo, lluvias incesantes, viento / marea de alta velocidad para que la evacuación oportuna de las personas pueda realizarse desde el área(s) afectada(s) donde es probable que ocurran calamidades naturales en el futuro. La figura 6 representa un mensaje de ayuda enviado a la Autoridad de gestión de catástrofes por un barco atrapado en el ciclón.

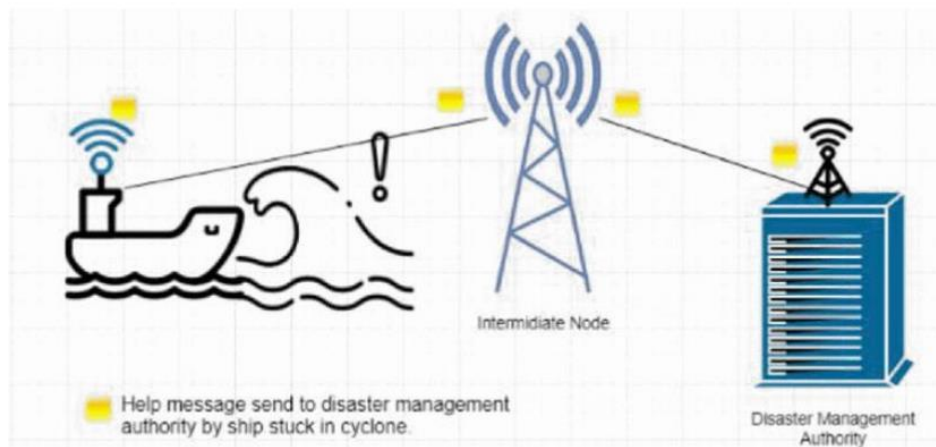


Figura 6. Interfaz creada con IoT para calamidades naturales

Fuente: (Chaudhary, Johari, Bhatia, Gupta, Bhatnagar, 2019)

3.2.2 Agricultura de precisión

La agricultura de precisión (AP) implica la adquisición y el procesamiento de una gran cantidad de datos proporcionados por sensores de IoT, se enfoca en la gestión agrícola empleando teledetección, tecnologías de la información (TI) y recopilación de datos proximales para garantizar la rentabilidad, sostenibilidad y protección del ambiente de esta manera los cultivos y el suelo reciben exactamente lo que necesitan para una salud y productividad óptima (Abhishek & Kaur, 2019) como se muestra en la Figura 7, la cual muestra diseños de servicios inteligentes adaptados a la agricultura de precisión.

Esta técnica permite un mayor control en el crecimiento de cultivos y el aislamiento de ganado al utilizar tecnología para monitorear los cultivos, la eficiencia se puede aumentar y los costos pueden disminuir, además admite al agricultor saber con precisión qué parámetros son necesarios para un cultivo. Esto requiere recopilar información masiva de distintas partes

del campo, como los nutrientes del suelo, presencia de plagas, algunas condiciones climáticas, etc. (Sadowski & Spachos, 2020).

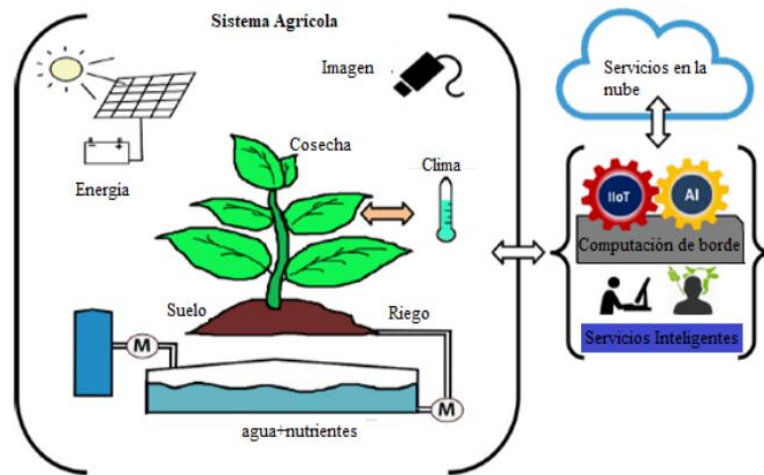


Figura 7. Servicios aplicados a la Agricultura de Precisión

Fuente: (Abhishek, Kaur, 2019)

Otra definición de AP es la siguiente: Aquella caracterizada por el manejo (análisis y control) de la variabilidad espacio-temporal del terreno y del cultivo. Suministra distintas cantidades de insumos y toma en cuenta la variación en los componentes del suelo (como textura, acidez, humedad, topografía o relieve), en el desarrollo vegetal y en las condiciones entre temporadas de siembra (INCyTU, 2018).

3.2.2.1 Características

Las características de la agricultura de precisión son varias. Una de ellas es que permite tener en cuenta diferentes aspectos de los cultivos antes de aplicar lo que requieren. Por ejemplo, a veces en un mismo terreno puede haber variaciones que explican por qué en determinada parte crecen mejor los cultivos y en otras no, o qué zonas del suelo necesitan de más riego, e incluso detectar el asentamiento de plagas. Cada una de estas variables tienen un impacto

directo en el resultado final de la cosecha y justamente lo que la agricultura de precisión permite hacer es detectarlas. De este modo, podemos adaptar nuestra producción a ellas, repararlas o gestionarlas para que no crezcan.

Otra de las características de la agricultura de precisión es que requiere de una importante inversión inicial y de mano de obra especializada para utilizarla, por lo que la sofisticación de las herramientas utilizadas debe tenerse en cuenta a la hora de calcular el costo del precio final de los productos.

Es uno de los tipos de agricultura que estimula la creación de nuevos equipos y herramientas para utilizar en los cultivos, como el de los robots, que, si bien aún no se han implementado, se continúa investigando en ellos.

3.2.3 LoRa

Es desarrollado por la empresa LoRa Alliance en 2015 como una tecnología de comunicación LPWAN para proporcionar largo alcance, bajo costo y topología estrella de bajo consumo, garantiza la cobertura de 162 países como se muestra en la Figura 9; la arquitectura de red básica de un LoRaWAN se compone de tres elementos: dispositivos finales, puerta de enlace y un servidor de red. LoRaWAN genera seguridad en base a la incorporación de cifrado de extremo a extremo empleando la red y la clave de aplicación para conservar la integridad de los datos (Singh et al., 2020). LoRa es una tecnología de capa física que modula la señales en bandas ISM sin licencia sub-GHz, es decir, 433 MHz en Asia, 868 MHz en Europa y 915 MHz en Norteamérica. La comunicación bidireccional es proporcionada por la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS) que extiende una señal de banda estrecha sobre un ancho de banda de canal más amplio, la señal que se obtiene presenta

bajos niveles de ruido, lo que permite una alta resistencia a la interferencia (Mekki et al., 2018a).

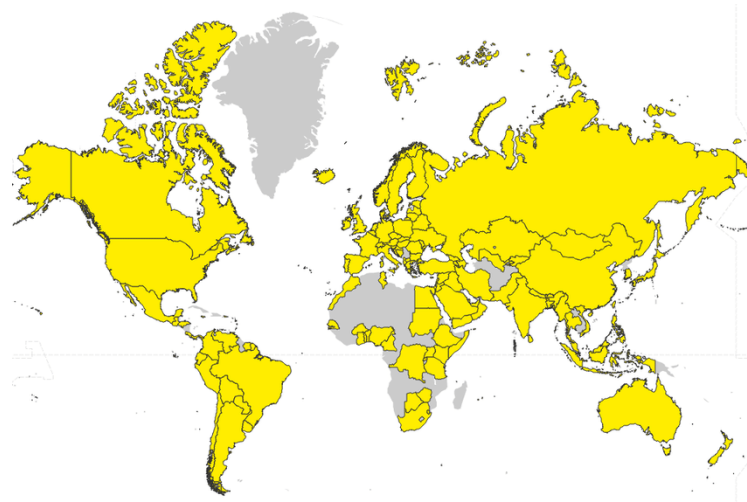


Figura 8. Presencia de la red LoRa por países

Fuente: (Alliance, 2021)

3.2.3.1 Características principales

La tecnología de radiofrecuencia LoRa opera en la banda libre de frecuencia ISM (Industrial, Scientific and Medical). Se tratan de bandas de frecuencia reservadas internacionalmente para un uso abierto, es decir, sin la necesidad de adquirir una licencia de operación. Sin embargo, cada país decreta sus propias regulaciones de operación que limitan el ciclo de trabajo y la potencia de transmisión, las mismas que deben ser respetadas para no incurrir en sanciones por mal uso.

Las bandas ISM de 433MHz (Asia), 868MHz (Europa) y 915MHz (Estados Unidos) son las que se emplea principalmente con LoRa. Particularmente con la banda de 433MHz se puede conseguir un alcance ligeramente superior con respecto a las otras bandas. Sin embargo, la información transmitida puede verse corrompida debido a interferencias generadas por

equipos comerciales, como controles remotos, que operan en esta misma banda de frecuencia.

A pesar de estos posibles inconvenientes que pueden darse, la tecnología LoRa es capaz de receptar y decodificar exitosamente señales que estén hasta 20dB por debajo del nivel ruido, como se muestra en la Figura 10. Esta característica hace que la tecnología LoRa sea casi inmune a la interferencia y que opere adecuadamente en entornos con niveles altos de ruido. Debido a esto, es capaz de receptar exitosamente señales que son mucho más débiles y, por lo tanto, mucho más lejanas en comparación con otras modulaciones que operan también en las bandas ISM, como por ejemplo FSK (Frequency Shift Keying).

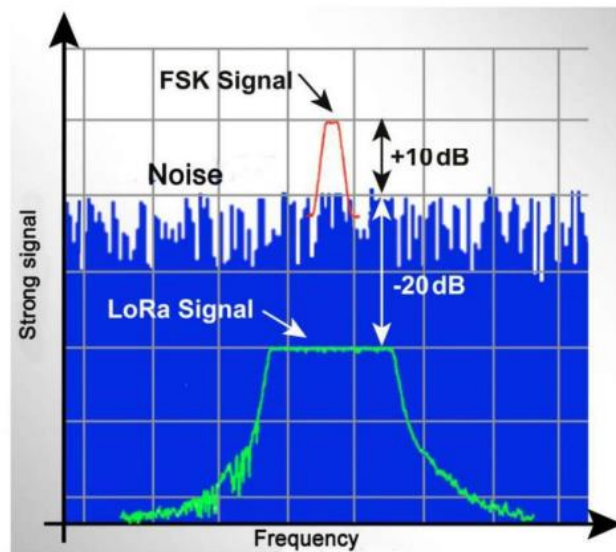


Figura 9. Inmunidad al ruido

Fuente: (Interline, 2024)

LoRA es una tecnología inalámbrica que utiliza recursos de comunicación y frecuencia para transmitir información a mayores distancias equivalentes en Kilómetros. Como se vio anteriormente posee diversas características, pero las principales se relacionan con el

consumo de baja potencia y la modulación del espectro ensanchado con la capacidad de resistencia frente a posibles interferencias.

Ahora bien, existen principalmente cuatro parámetros de configuración asociados a la tecnología LoRa, los cuales son el Bandwidth (BW), Spreading Factor (SF), Coding Rate (CR) y Transmission Power (TP). Mediante los cuales se puede ajustar la velocidad de transmisión de datos (entre 0.3kbit/s y 50kbit/s), distancia de transmisión (hasta 5km) y consumo energético (entre 20mA y 120mA). Sin embargo, cabe señalar que existe un trade-off (intercambio) en el desempeño a obtener en una de estas tres características que afectará indirectamente al resto.

3.2.3.2 Técnicas de ahorro de energía

Para la tecnología LoRa (Long Range), también se utilizan técnicas de ahorro de energía para gestionar eficientemente el consumo de energía de los dispositivos, especialmente en aplicaciones de baja potencia como sensores alimentados por batería. A continuación, se describen cómo se aplican el sueño profundo y el encendido selectivo de radio en LoRa.

Sueño Profundo (Deep Sleep): En LoRa, el sueño profundo implica apagar completamente el dispositivo durante los períodos de inactividad para minimizar el consumo de energía.

Durante el sueño profundo, el dispositivo apaga su radio y otros componentes de energía, entrando en un estado de bajo consumo de energía.

Los dispositivos LoRa pueden programarse para despertar periódicamente según una programación predefinida o en respuesta a eventos específicos para realizar tareas programadas o para verificar si hay datos entrantes.

El sueño profundo en LoRa ayuda a prolongar la vida útil de la batería al minimizar el consumo de energía durante los períodos en los que el dispositivo no está activamente transmitiendo o recibiendo datos.

Encendido Selectivo de Radio (Radio Duty Cycling): El encendido selectivo de radio en LoRa implica activar la radio del dispositivo solo cuando es necesario para transmitir o recibir datos.

Los dispositivos LoRa pueden programarse para transmitir datos solo en momentos específicos o en respuesta a eventos predefinidos, lo que minimiza el tiempo de actividad de la radio y reduce el consumo de energía.

Además, LoRa utiliza un esquema de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) para programar la transmisión de paquetes, lo que permite a los dispositivos sincronizar sus transmisiones y minimizar el tiempo de actividad de la radio.

El encendido selectivo de radio en LoRa contribuye a maximizar la eficiencia energética y prolongar la vida útil de la batería de los dispositivos, lo que es crucial en aplicaciones de baja potencia y larga duración.

En resumen, tanto el sueño profundo como el encendido selectivo de radio son técnicas importantes para gestionar eficientemente el consumo de energía en dispositivos LoRa, ayudando a maximizar la vida útil de la batería y garantizar un funcionamiento confiable y de bajo consumo de energía en aplicaciones de IoT de larga duración.

3.2.3.3 Seguridad

El protocolo LoRa (Long Range) ofrece seguridad a nivel de red, pero tiene ciertas limitaciones que es importante conocer. Aquí se detallan los aspectos claves de la seguridad en LoRa:

1. Cifrado de datos:

LoRa utiliza cifrado AES de 128 bits (Advanced Encryption Standard) para proteger los datos transmitidos. Este cifrado se aplica tanto al nivel de red como al nivel de aplicación.

- Clave de red (NwkSKey): Protege las comunicaciones entre el dispositivo y la red.
- Clave de aplicación (AppSKey): Protege los datos transmitidos en la aplicación.

2. Autenticación de dispositivos:

LoRa utiliza un esquema de autenticación basado en la clave de red (NwkSKey), que asegura que solo los dispositivos autorizados puedan comunicarse con la red.

3. Integridad de los datos:

Se asegura la integridad de los mensajes transmitidos mediante un código de autenticación de mensaje (MAC), que garantiza que los datos no han sido modificados en tránsito.

4. Modos de operación:

-Activación por personalización (ABP): En este modo, las claves se configuran de forma estática en el dispositivo. Es menos seguro porque las claves no cambian a lo largo del tiempo y si un atacante intercepta las claves, podría comprometer la seguridad de la red.

-Activación por intercambio de llaves (OTAA): Este es el modo más seguro, ya que las claves se generan dinámicamente durante el proceso de conexión (Join Procedure), proporcionando un nivel de seguridad más alto al reducir la posibilidad de reutilización de claves.

5. Limitaciones de seguridad:

-Posibilidad de ataques de repetición: Aunque LoRa incluye contadores de cuadros (frame counters) para evitar ataques de repetición, es importante que estos contadores se gestionen correctamente. Si se reinician los contadores sin una adecuada sincronización, se podrían repetir mensajes y comprometer la seguridad.

-Exposición a ataques físicos: Los dispositivos IoT que usan LoRa pueden ser vulnerables a ataques físicos, como la extracción de claves desde el hardware si no se protegen adecuadamente.

Intercepción de comunicaciones: Aunque el cifrado protege los datos, un atacante podría intentar interceptar las comunicaciones para realizar análisis de tráfico, incluso si no puede descifrar los datos.

En resumen, LoRa ofrece un nivel razonable de seguridad con cifrado AES-128, autenticación de dispositivos y protección de la integridad de los datos. Sin embargo, su seguridad depende en gran medida de una correcta implementación y gestión de claves, así como de la elección del modo de operación (OTAA es más seguro que ABP).

3.2.3.4 Ventajas

LoRa presenta múltiples ventajas entre las que se puede destacar:

- Gran tolerancia a las interferencias.
- Alta sensibilidad en el receptor en el rango comprendido entre -117 dBm y -137 dBm
- Bajo consumo de potencia. Las baterías pueden tener una vida de hasta 10 años.
- Alcances grandes, alrededor de 16 km en espacios abiertos y los 6 km en ambientes urbanos.
- Resistente a condiciones climatológicas adversas y señales capaces de penetrar barreras como hormigón y el subsuelo.
- Fácil instalación en lugares de difícil acceso. Las actualizaciones de software se pueden realizar de forma remota por lo que reduce el costo en cuanto a mantenimiento y tiempo del técnico.
- Flexibilidad para todo tipo de negocios y aplicaciones.
- Gran seguridad y fiabilidad en la transmisión de la información. Existen redes públicas, privadas y mixtas.

La tecnología LoRa ha demostrado ser útil en sistemas pertenecientes a sectores ganaderos, agrícolas, de seguridad pública, sector industrial, medios de localización, etc. Si se habla de las ventajas que cuenta esta tecnología se puede expresar que basa su funcionamiento en aplicaciones de largo alcance, bajo consumo potencia, seguridad, altamente escalable, con protocolos de geolocalización y algo muy importante en la actualidad que es el bajo costo de implementar un sistema LoRa, vista en la figura 10. (LoRa Alliance, 2018).



Figura 10. Casos de uso de la tecnología LoRa

Fuente: (TODO-SDR.com, 2023)

3.2.3.5 Factores que afectan su alcance y cobertura

A continuación, se mencionan y describen dichos factores:

El alcance de LoRa (Long Range) puede verse afectado por varios factores, entre los cuales destacan:

1. Frecuencia de Operación: LoRa utiliza diferentes bandas de frecuencia, como 433 MHz (en Asia), 868 MHz (en Europa) y 915 MHz (en América). Las frecuencias más bajas generalmente ofrecen un mayor alcance, pero con menor capacidad de datos, mientras que las frecuencias más altas proporcionan más capacidad de datos, pero un alcance menor.

2. Potencia de Transmisión: A mayor potencia de transmisión, mayor será el alcance de la señal. Sin embargo, las regulaciones locales pueden limitar la potencia máxima permitida, lo que afecta el alcance.

3. Sensibilidad del Receptor: La sensibilidad del receptor es crucial para determinar la distancia máxima a la que puede recibir señales. Los dispositivos LoRa tienen una alta sensibilidad, lo que les permite recibir señales débiles y aumentar el alcance.

4. Interferencias de Radiofrecuencia (RF): La interferencia causada por otras señales en la misma banda de frecuencia puede afectar negativamente el alcance. Esto es común en entornos urbanos donde hay muchos dispositivos que operan en bandas similares.

5. Entorno Físico: Obstáculos como edificios, montañas, árboles y estructuras metálicas pueden debilitar la señal y reducir el alcance. En zonas rurales o áreas abiertas, el alcance suele ser mucho mayor en comparación con entornos urbanos densos.

6. Altura de la Antena: Cuanto más alta esté la antena transmisora y receptora, mejor será la propagación de la señal. En algunos casos, colocar la antena en una posición elevada puede aumentar significativamente el alcance.

7. Condiciones Atmosféricas: Factores climáticos como la lluvia, la humedad y la temperatura también pueden afectar la propagación de la señal y, por ende, el alcance.

8. Configuración del Sistema: Parámetros como la velocidad de datos (Spreading Factor, SF), el ancho de banda y la tasa de codificación (coding rate) pueden optimizarse para balancear el alcance y la velocidad de transmisión. Un mayor SF aumenta el alcance, pero reduce la tasa de datos.

Cada uno de estos factores puede influir individualmente o en combinación, afectando el rendimiento y el alcance de la tecnología LoRa en diferentes entornos y aplicaciones.

3.2.3.6 Lora aplicada en la agricultura de zonas rurales

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, el mundo tendrá que producir un 70% más de alimentos en 2050 de lo que lo hizo en 2006 para alimentar a la creciente población mundial. Los agronegocios están recurriendo a Internet de las cosas (IoT) para análisis y buscar mayores capacidades de producción a medida que aumentan las demandas de producción y operación. Los agricultores ya no pueden confiar en señales visuales u otros indicadores pasivos e históricos para la gestión de sus negocios. En su lugar, deben crear operaciones más eficientes que les permitan recopilar información regularmente en el campo, sintetizar rápidamente los datos y tomar decisiones inteligentes para cosechar los beneficios de la agricultura de precisión.

Al aprovechar la tecnología LoRa y el protocolo abierto LoRaWAN, los agronegocios pueden monitorizar, administrar y analizar digitalmente cada aspecto de su negocio, mejorando sus operaciones en general y retorno de la inversión (ROI). La tecnología LoRa proporciona una plataforma sólida para el futuro de la agricultura inteligente, ya que es fácil de implementar y ayuda a los agricultores y ganaderos a hacer crecer sus negocios.

3.2.3.7 Ventajas importantes de implementar un prototipo con LoRA

LoRA (Low-Rank Adaptation) es una técnica emergente en el campo del aprendizaje profundo que se utiliza para adaptar modelos grandes de una manera más eficiente y con menor costo computacional. Implementar un prototipo utilizando LoRA puede ofrecer varias ventajas importantes:

1. Eficiencia en el Uso de Recursos Computacionales

- **Reducción en el uso de memoria:** LoRA permite entrenar y ajustar grandes modelos (como los modelos de lenguaje grandes) sin necesidad de recalcular y almacenar todos los parámetros. Esto reduce el uso de memoria en comparación con la actualización de todos los parámetros del modelo.
- **Menor uso de energía:** Al reducir la carga computacional, se disminuye el consumo de energía, lo cual es beneficioso para entrenar modelos en entornos con recursos limitados.

2. Entrenamiento Más Rápido

- **Ajuste eficiente:** En lugar de entrenar el modelo completo, LoRA introduce matrices de baja dimensión para ajustar solo ciertos parámetros, lo que permite un entrenamiento mucho más rápido en comparación con métodos tradicionales.
- **Menor tiempo de ajuste:** LoRA es especialmente ventajoso cuando el tiempo es un factor crítico, permitiendo ajustes rápidos para adaptar modelos grandes a nuevas tareas o dominios específicos.

3. Escalabilidad

- **Adapta modelos grandes:** LoRA permite que los modelos preentrenados grandes se adapten fácilmente a nuevas tareas, lo que los hace más escalables para aplicaciones específicas sin la necesidad de entrenar desde cero.
- **Flexibilidad en modelos multitarea:** LoRA facilita la adaptación a múltiples tareas sin requerir grandes recursos adicionales, lo que mejora la flexibilidad y escalabilidad en entornos de producción.

4. Reducción de Costos

- **Costos de entrenamiento más bajos:** Con LoRA, se puede entrenar un modelo con menos recursos, lo que se traduce en menores costos de infraestructura y acceso a hardware especializado (como GPUs o TPUs).
- **Reutilización de modelos:** Los modelos preentrenados pueden ser adaptados con LoRA sin necesidad de reentrenarlos completamente, lo que ahorra costos de desarrollo.

5. Adaptación sin sobrescribir conocimientos previos

- **Preservación del conocimiento previo:** LoRA permite adaptar modelos a nuevas tareas sin olvidar lo que el modelo ya ha aprendido, minimizando el riesgo de sobrescribir información valiosa.
- **Mejora continua:** Facilita la implementación de mejoras incrementales en los modelos, permitiendo la adaptación progresiva a medida que se dispone de nuevos datos o se identifican nuevas necesidades.

6. Facilidad de Implementación

- **Integración sencilla:** LoRA puede integrarse fácilmente en el flujo de trabajo existente, aprovechando las arquitecturas de modelos ya entrenados y permitiendo una implementación rápida de prototipos sin requerir modificaciones profundas.
- **Aplicabilidad amplia:** Puede ser utilizado en diversos tipos de modelos, como redes neuronales recurrentes (RNNs), transformadores (como GPT y BERT), y otros modelos de lenguaje y visión.

7. Mejora en la Personalización

- **Ajustes personalizados:** LoRA facilita la creación de modelos personalizados para aplicaciones específicas sin necesidad de entrenar desde cero, lo que mejora la capacidad de adaptación a requisitos específicos de clientes o productos.

En resumen, LoRA ofrece una manera eficiente, escalable y rentable de adaptar y personalizar grandes modelos preentrenados, lo que lo convierte en una opción atractiva para la implementación de prototipos en diversas aplicaciones.

3.2.3.8 Normativas

Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-016-SCFI-2015

La presente norma establece que todos los equipos de radiocomunicación que cuenten con interfaz o dispositivo alámbrico que empleen la técnica de espectro disperso, por salto de frecuencia y por modulación digital y que operen en las bandas 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz y 5725-5850 MHz y que desee importarse, comercializarse y/o distribuirse dentro del territorio de los Estados Unidos Mexicanos debe cumplir las especificaciones mínimas y límites, así como los métodos de prueba de los parámetros señalados en la Disposición

Técnica IFT-008-2015 emitida por el Instituto Federal de Telecomunicaciones. Lo anterior con el objetivo de proteger al consumidor de posibles afectaciones a su seguridad, salud y economía derivada del desempeño inadecuado de los productos antes mencionados.

Todos los equipos de radiocomunicación que cuenten con interfaz o dispositivo alámbrico que emplean la técnica de espectro disperso, por salto de frecuencia y por modulación digital y que operen en las bandas 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz y 5725-5850 MHz y que desee importarse, comercializarse y/o distribuirse dentro del territorio de los Estados Unidos Mexicanos deben cumplir con las especificaciones establecidas en la Disposición Técnica IFT-008-2015: Sistemas de radiocomunicación que emplean la técnica de espectro disperso-equipos de radiocomunicación por salto de frecuencia y por modulación digital a operar en las bandas 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz y 5725-5850 MHz-especificaciones, límites y métodos de prueba.

3.2.4 ZigBee

Zigbee es una pila de protocolos de alto nivel normalizado en el estándar IEEE 802.15.4 del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos(IEEE), se describe como un protocolo basado en el modelo OSI el cual está diseñado para permitir la interoperabilidad entre diferentes dispositivos de distintos fabricantes, utiliza 4 capas del modelo OSI como se observa en la Figura 12, esto lo hace con el fin de simplificar la arquitectura de la red obteniendo una baja tasa de transmisión con un mínimo consumo de corriente, el estándar IEEE 802.15.4 define los niveles de capa física y capa de acceso al medio en redes inalámbricas, mientras que las capas de red y aplicación las define Zigbee.

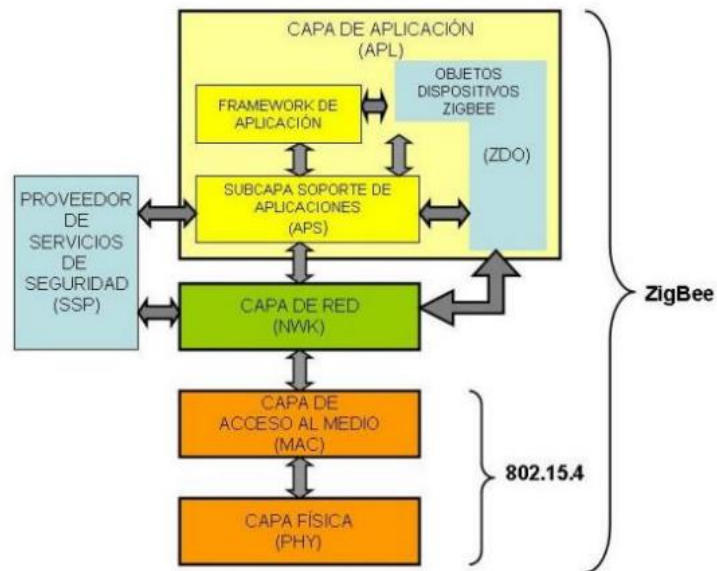


Figura 11. Pila de protocolo ZigBee

Fuente: (Facultad de Informática Universidad Nacional de La Plata, 2018)

3.2.4.1 Características principales

ZigBee posee características fundamentales y dentro de estas está su operación en las bandas libres ISM de 2.4 GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (Estados Unidos). Tiene una velocidad de transmisión de 250 Kbps y un rango de cobertura de 10 a 75 metros. Pese a coexistir en la misma frecuencia con otro tipo de redes, como WiFi o Bluetooth, su trabajo no se ve afectado, esto debido a su baja tasa de transmisión y a características propias del estándar IEEE 802.15.4. Obtiene la capacidad de operar en redes de gran densidad, esta característica ayuda a acrecentar la confiabilidad de la comunicación ya que entre más nodos existan dentro de una red, mayor número de rutas alternas existirán para garantizar que un paquete llegue a su destino.

3.2.4.2 Técnicas de ahorro de energía

En la tecnología Zigbee, se utilizan varias técnicas de ahorro de energía para gestionar eficientemente el consumo de energía de los dispositivos, especialmente en aplicaciones de baja potencia como sensores alimentados por batería. Dos de las técnicas más importantes son el sueño profundo (Deep sleep) y el encendido selectivo de radio (radio duty cycling).

- **Sueño Profundo:** El dispositivo Zigbee apaga completamente su radio y otros componentes consumidores de energía cuando no está activamente transmitiendo o recibiendo datos.
- Durante el sueño profundo, el dispositivo entra en un estado de bajo consumo de energía, lo que ayuda a prolongar la vida útil de la batería al minimizar el consumo de energía durante los períodos de inactividad.
- El dispositivo puede despertarse periódicamente según una programación preestablecida o en respuesta a eventos específicos para realizar tareas programadas o para verificar si hay datos entrantes.
- **Encendido Selectivo de Radio (Radio Duty Cycling):** Implica activar la radio del dispositivo solo cuando es necesario para transmitir o recibir datos, y apagarla durante los períodos de inactividad para conservar la energía de la batería.
- Esto se logra mediante la programación de la radio para que entre en modo de bajo consumo cuando no esté en uso, y se reactive solo cuando sea necesario para comunicarse con otros dispositivos en la red.
- El encendido selectivo de radio ayuda a minimizar el tiempo de actividad de la radio, reduciendo así el consumo de energía y prolongando la vida útil de la batería de los dispositivos Zigbee.

Estas técnicas de ahorro de energía son fundamentales en Zigbee para garantizar un funcionamiento eficiente y prolongado de los dispositivos, especialmente en aplicaciones de baja potencia donde la vida útil de la batería es crítica. Al combinar el sueño profundo con el encendido selectivo de radio y otras estrategias de gestión de energía, Zigbee puede proporcionar una solución inalámbrica confiable y de bajo consumo de energía para una variedad de aplicaciones IoT.

3.2.4.3 Seguridad

ZigBee es un estándar de comunicación inalámbrica que está diseñado para ser seguro y para proteger contra el acceso no autorizado y la manipulación. En ZigBee, el protocolo de comunicación incluye varias funciones de seguridad para garantizar la confidencialidad, integridad y autenticidad de los datos que se transmiten.

Una característica de seguridad clave es el uso del cifrado AES-128, que es un algoritmo de cifrado seguro y ampliamente utilizado. Esto garantiza que los datos transmitidos a través de la red estén protegidos contra el acceso no autorizado o la manipulación.

Además del cifrado, ZigBee también incluye autenticación y protocolos de administración de claves para garantizar que solo los dispositivos autorizados puedan unirse a la red y que las comunicaciones entre dispositivos sean seguras. Estos protocolos incluyen el uso de identificadores únicos de dispositivos (direcciones IEEE) y claves de seguridad que se utilizan para autenticar dispositivos y establecer comunicaciones seguras.

En general, ZigBee se considera un estándar de comunicación seguro para aplicaciones de baja potencia y baja tasa de datos. Sin embargo, como cualquier sistema de comunicación, es importante configurar y mantener correctamente la red para garantizar la seguridad de los

datos que se transmiten. Esto puede incluir la actualización periódica de las claves de seguridad y el uso de las mejores prácticas para la administración de dispositivos y la configuración de la red. A continuación, se explica cada uno de los puntos mencionados con anterioridad.

Autenticación: En Zigbee, la autenticación es crucial para garantizar que solo los dispositivos autorizados puedan unirse y participar en la red. Se basa en el intercambio de claves precompartidas (PSK) entre los dispositivos y el coordinador de red (Trust Center). Antes de unirse a la red, un dispositivo debe autenticarse proporcionando la clave de red precompartida (NWK Key) o la clave de unión de red (Trust Center Link Key). Esto garantiza que el dispositivo tenga permiso para unirse a la red y participar en las comunicaciones.

Además, Zigbee implementa un proceso de intercambio de claves de confianza para establecer una relación de confianza entre dispositivos antes de la comunicación. Esto puede incluir la verificación mutua de las identidades de los dispositivos y la generación de claves de sesión para proteger las comunicaciones.

Cifrado: Zigbee utiliza cifrado simétrico para proteger la confidencialidad de los datos transmitidos entre dispositivos. El estándar Zigbee especifica el uso del algoritmo AES (Advanced Encryption Standard) con claves de 128 bits para cifrar los datos.

El cifrado se aplica a nivel de paquete o de carga útil, lo que significa que los datos transmitidos están protegidos tanto en reposo como en tránsito. Esto garantiza la confidencialidad de los datos incluso si son interceptados por un atacante.

El cifrado se aplica tanto en las comunicaciones entre dispositivos finales como entre dispositivos finales y el coordinador de red (Trust Center), lo que garantiza la seguridad en toda la red Zigbee.

Gestión de Claves: La gestión de claves en Zigbee abarca la generación, distribución y renovación segura de las claves de seguridad utilizadas en la red.

Las claves, como la clave de red (NWK Key) y la clave de enlace de confianza (Link Key), se generan de manera segura durante el proceso de inclusión de dispositivos en la red. Se utilizan mecanismos seguros para distribuir estas claves a los dispositivos autorizados.

Zigbee también proporciona métodos para la renovación periódica de las claves de seguridad, lo que ayuda a mantener la integridad y la confidencialidad de la red a lo largo del tiempo.

Además, la gestión de claves incluye la revocación segura de claves comprometidas o dispositivos comprometidos para mantener la seguridad de la red en caso de violación de la seguridad.

3.2.4.4 Capas de protocolo

La arquitectura del protocolo ZigBee está basada en una serie de capas. Cada capa implementa un conjunto de servicios específicos para la capa superior. Una entidad de datos proporciona servicios relacionados con la transmisión de datos y una entidad de gestión proporciona todos los demás servicios. Cada entidad de servicios incorpora una interfaz con la capa superior que se denomina Service Access Point (SAP), a través del cual la capa

superior podrá hacer uso de unos servicios fundamentales para conseguir las especificaciones del estándar en el caso de las capas física y MAC.

Las dos primeras capas están definidas por el estándar IEEE 802.15.4, la física (PHY) y la de control de acceso al medio (MAC). La alianza ZigBee definió sobre esta base una capa de red y la interfaz para la capa de aplicación. La interfaz de la capa de aplicación consiste en la subcapa de soporte de la aplicación (APS) y los objetos de dispositivo ZigBee (ZDO) por lo que la aplicación desarrollada podrá utilizar los servicios proporcionados por esta interfaz.

La capa MAC del estándar IEEE 802.15.4 controla el acceso al radio canal mediante el mecanismo CSMA-CA. Este mecanismo consiste en escuchar el canal de transmisión para medir la energía y poder detectar si algún otro dispositivo está transmitiendo en ese mismo momento para evitar así colisiones entre transmisiones de distintos dispositivos. Entre sus funciones se encuentran la transmisión de tramas baliza, la sincronización y el deber de proporcionar un mecanismo de transmisión que garantice una comunicación eficiente, es decir, que los dispositivos compartan el medio de transmisión de forma que no se produzcan retardos excesivos o tasas de errores elevadas. La figura 18 muestra la arquitectura del protocolo ZigBee.

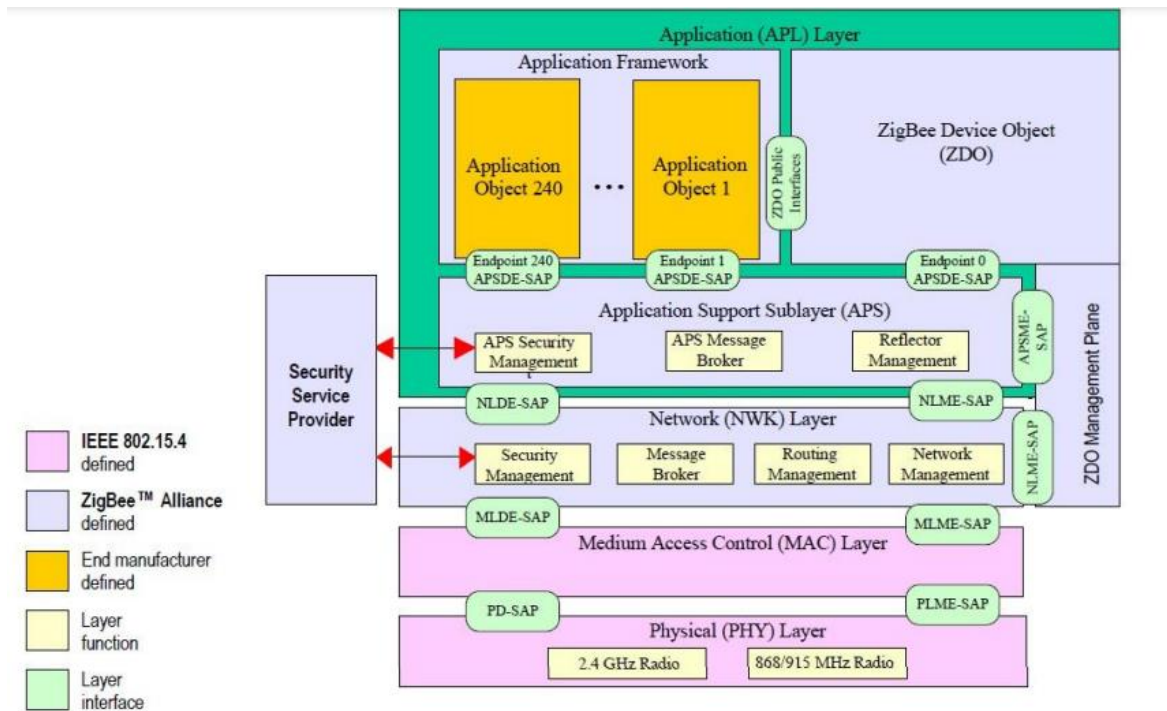


Figura 12. Esquema de la arquitectura de la pila ZigBee

Fuente: (Conferencia 5ª Jornadas Científicas sobre RFID, 2015)

La anterior figura muestra cómo está organizado el protocolo desde la capa física hasta la capa de aplicación. Este esquema ofrece una visión clara de la estructura que debe tener cualquier stack de software del protocolo ZigBee. La idea es sencilla, cada capa está formada por una serie de funciones, máquinas de estado, etc. cuyo objetivo es satisfacer los requisitos y especificaciones de dicha capa. En el nivel más bajo de la arquitectura se encuentra la capa física, formada por el hardware que generalmente será un microcontrolador y un transmisor de radio-frecuencia y los procedimientos y funciones que se ejecutan en el microcontrolador para gestionar la comunicación en dicho transmisor (drivers) que lo controlan mediante los registros del MCU y ofrecen una serie de servicios a la capa MAC a través de las interfaces Physical Data Service Access Point (PD-SAP) y Physical Data Service Access Point (PLME-

SAP). Estas interfaces denominadas Single Access Point (SAP), básicamente son la Application Procedural Interface (API) que se podrá utilizar desde la capa inmediatamente superior para utilizar los servicios implementados en la capa. El estándar distingue dos tipos de interfaces o SAP, la que ofrece servicios de transmisión de datos y la que ofrece servicios de gestión.

Ahora bien, la capa física ofrece un servicio de datos a través del PD-SAP y un servicio de gestión a través del PLME-SAP. El servicio de datos posibilita el transporte de MPDUs entre las entidades de la capa MAC. Esta interfaz está formada por una serie de primitivas o funciones fundamentales que pueden ser utilizadas desde la capa superior y que proporcionan una serie de servicios básicos.

Las primitivas que incorpora el PD-SAP son:

PD-DATA.request: Solicita la transmisión de un MPDU desde la capa MAC a la entidad de datos de la capa física.

PD-DATA.confirm: Notifica el resultado de la solicitud de transmisión de un MPDU. Los diferentes resultados que pueden darse son: SUCCESS, RX_ON, TRX_OFF, o BUSY_TX.

PD-DATA.indication: Notifica a la capa MAC que se ha recibido un MPDU, es decir, que se ha recibido una trama de otro dispositivo.

Al igual que la capa física, la capa MAC proporciona dos tipos de servicios, de datos y de gestión. Para comprender el funcionamiento del estándar, es importante conocer cómo funciona internamente por lo que es necesario conocer cuáles son y para qué sirven los servicios proporcionados por cada una de las capas ya que representan las líneas de actuación

en el funcionamiento interno del mismo. Los servicios de datos de la capa MAC son accesibles desde capas superiores a través de la entidad MCPS-SAP. Estos servicios, que se describen a continuación, son: MCPS-DATA.Request / Confirm / Indication y MCPS-PURGE. Request / Confirm.

- **MCPS-DATA.Request:** A través de esta función se solicita la transmisión de un paquete desde una capa superior a la MAC. Debe indicarse la dirección de origen, la dirección de destino, el identificador PAN de destino, la longitud de la carga útil, la carga útil a enviar y las opciones de envío: transmisión con ACK o transmisión sin ACK, transmisión GTS o transmisión CAP y transmisión directa o transmisión indirecta. La transmisión con o sin ACK indica si se espera o no el acuse de recibo del paquete por parte del destino, la transmisión GTS se realiza en el intervalo de tiempo reservado para las transmisiones del nodo en concreto, para utilizar este tipo de transmisión es necesario que la red sea balizada y la transmisión CAP se realiza en el tiempo de transmisión común para todos los dispositivos utilizando CSMA-CA.
- **MCPS-DATA.Confirm:** Indica el resultado de la solicitud de transmisión del paquete.
- **MCPS-DATA.Indication:** Cuando un paquete es recibido por otro dispositivo, la capa MAC ejecuta esta función de callback que estará definida en una capa superior a través de la que se puede conocer la carga útil, la dirección de origen y la calidad del enlace entre otros parámetros.
- **MCPS-PURGE.request:** Permite solicitar la eliminación de un paquete de la cola de transacciones de la capa MAC. Si se solicitó el envío de un paquete y esta

transacción se encuentra aún en la cola, esta función permite eliminar dicha transacción para que el paquete no sea enviado.

- **MCPS-PURGE.confirm:** Esta función se ejecuta tras realizar una solicitud de eliminación de una transacción e indica si ha tenido éxito o no.

3.2.4.5 Ventajas

Las ventajas de las redes ZigBee incluyen el bajo consumo, bajo costo, baja complejidad, fiabilidad y seguridad (Lin et al., 2017). ZigBee implementa funcionalidades de las Capas de Red, Transporte y Aplicación del modelo OSI.

Su baja tasa de transmisión le permite operar junto a otras tecnologías de comunicación inalámbricas como Bluetooth y Wi-Fi sin crear interferencia.

Del mismo modo, Zigbee ofrece estabilidad en la transmisión, ya que al utilizar una topología de red tipo Malla (Mesh), en el caso de que se genere alguna falla en algún nodo o dispositivo de retransmisión, los datos se redireccionarán, permitiendo la comunicación ininterrumpida entre los dispositivos de la red, sin necesidad de utilizar un controlador central, aumentando de ese modo, la confiabilidad de la red. También, Zigbee cuenta con una gran capacidad de expansión, ya que en un canal pueden existir cerca de 16 000 redes y cada red puede llegar a alcanzar los 65 000 nodos aproximadamente, lo cual permite su utilización para la automatización de plantas industriales. Adicionalmente, Zigbee, comparado con otras tecnologías de comunicación inalámbrica de alta transmisión de datos (como Wi-Fi o LTE), ofrece un bajo consumo de energía, lo cual permite a los dispositivos Zigbee funcionar utilizando una batería.

Por tales motivos, la tecnología Zigbee, es una tecnología de comunicación inalámbrica de bajo costo, con gran capacidad de expansión, orientada a aplicaciones de bajo consumo energético y con múltiples usos, la cual puede seguir siendo objeto para el desarrollo de nuevas investigaciones y aplicaciones.

3.2.4.6 Factores que afectan su alcance y cobertura

En los sistemas de comunicación inalámbricos basados en ZigBee se puede presentar ruido, pérdidas y retardo de la señal. El ruido es ocasionado por otros dispositivos que transmiten en las bandas de frecuencia ISM (Industrial, Científica y Médica). Las pérdidas y retardos se deben a fenómenos de propagación de la señal, obstáculos encontrados en el medio y, recepción de la señal proveniente de múltiples trayectos generados por la reflexión y difracción de la misma.

Uno de los problemas más comunes en la conectividad Zigbee es el alcance limitado de la señal. Esto puede ser debido a varios factores, como la distancia entre los dispositivos Zigbee y el concentrador, obstrucciones físicas en el entorno o interferencia de otros dispositivos inalámbricos. Para mejorar el alcance de la señal Zigbee, se pueden tomar varias medidas. Una opción es colocar el concentrador en una ubicación central y elevada, lo que ayudará a reducir las obstrucciones físicas. También se puede utilizar repetidores o extensores Zigbee para ampliar el alcance de la red. Estos dispositivos actúan como intermediarios, recogiendo y retransmitiendo la señal Zigbee, permitiendo que llegue a áreas más alejadas. Además, es importante asegurarse de que los dispositivos Zigbee estén actualizados con el último firmware, ya que las actualizaciones pueden incluir mejoras en la conectividad y el alcance de la señal.

En resumen, existen varios factores que pueden influir en el alcance de Zigbee, entre ellos:

- **Influencias ambientales:** factores como paredes, muebles y otros obstáculos pueden reducir el alcance del Zigbee.
- **Interferencias y obstáculos:** las señales Zigbee pueden verse interferidas por otros dispositivos inalámbricos, como enrutadores Wi-Fi y hornos microondas.
- **Potencia de transmisión del dispositivo:** la potencia de transmisión de un dispositivo Zigbee también afecta su alcance. Los dispositivos con mayor potencia de transmisión tendrán un mayor alcance.

3.2.4.7 ZigBee aplicada en la agricultura de zonas rurales

Como se sabe el conjunto de protocolos Zigbee es usado en redes inalámbricas y permite la comunicación entre dispositivos, como sensores, para la transmisión de información.

Zigbee sería un recurso importante como tecnología aplicada a la agricultura, debido a que este se adapta a otras tecnologías utilizadas actualmente como sensores térmicos y de clima, PH, GPS entre otros, fortaleciendo la calidad del producto agrícola así mismo como la optimización de tiempo y bajo costo que conlleva a ese objetivo. Este protocolo ha sido utilizado para realizar monitoreo en cultivos agrícolas y se ha encontrado que es implementado en un 39% de casos. Al emplear el protocolo Zigbee se facilitaría la recolección de datos e interpretación de variables.

3.2.4.7 Normativas

Norma IEEE 802.15.4

En el año 2000 dos grupos especialistas en estándares (ZigBee y el grupo 15 de trabajo IEEE 802) se unieron para dar a conocer la necesidad de un nuevo estándar para redes inalámbricas de bajo poder y por lo tanto bajos costos en ambientes industriales y caseros. Dando como resultado que en diciembre de ese año el comité para nuevos estándares IEEE (NesCom) designara oficialmente un nuevo grupo de trabajo para el desarrollo de un nuevo estándar de baja transmisión en redes inalámbricas para áreas personales (LR-WPAN), con lo que nació el estándar que ahora se conoce como el 802.15.4. Algunas características de alto nivel del 802.15.4 se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 1. Características principales de la norma IEEE 802.15.4

Fuente: (Elaboración propia)

PROPIEDAD	RANGO
Rango de transmisión de datos	868 MHz: 20kb/s; 915 MHz: 40kb/s; 2.4 GHz: 250 kb/s.
Alcance	10 – 20 m.
Latancia	Abajo de los 15 ms.
Canales	868/915 MHz: 11 canales. 2.4 GHz: 16 canales.
Bandas de frecuencia	Dos PHY: 868/915 MHz y 2.4 GHz.
Direccionamiento	Cortos de 8 bits o 64 bits IEEE

Canal de acceso	CSMA-CA y rasurado CSMA-CA
Temperatura	El rango de temperatura industrial: -40° a +85° C

Norma Oficial Mexicana NOM-208-SCFI-2016

La presente Norma Oficial Mexicana establece que todos los equipos de radiocomunicación que empleen la técnica de espectro disperso, por salto de frecuencia y por modulación digital a operar en las bandas 902 MHz - 928 MHz, 2400 MHz - 2483.5 MHz y 5725 MHz - 5850 MHz y que deseen importarse, comercializarse y/o distribuirse dentro del territorio de los Estados Unidos Mexicanos deben cumplir las especificaciones mínimas y límites, así como los métodos de prueba de los parámetros señalados en la Disposición Técnica IFT-008-2015 vigente emitida por el Instituto Federal de Telecomunicaciones o su sustituta más actualizada.

Disposición Técnica IFT-008- 2015

La emisión de la Disposición Técnica IFT-008-2015 pretende dar continuidad a la certidumbre jurídica respecto de las especificaciones y límites, así como a los métodos de prueba y de los parámetros técnicos mínimos necesarios que debe cumplir todo aquel equipo de radiocomunicaciones por espectro disperso que opere en las bandas de frecuencias 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz y 5725-5850 MHz. Ejemplos de equipos y dispositivos sujetos a esta Disposición Técnica son aquellos que utilizan los estándares WiFi, Bluetooth y Zigbee. Con la expedición de dicha disposición se prevé que se continúe garantizando que las especificaciones técnicas cubran los siguientes aspectos:

- I. Que las comunicaciones sean más seguras y confiables;
- II. Conseguir una relación señal a ruido, suficientemente baja que permita la no interferencia de otras señales vecinas con las que convive, a la vez que se logren comunicaciones de mayor calidad.
- III. Lograr que la probabilidad de interferir a los sistemas de telecomunicaciones de banda angosta y a otros sistemas de radiocomunicación por espectro disperso que operen en la misma banda de frecuencias prácticamente no exista o sea muy baja.
- IV. Contribuir a evitar interferencias perjudiciales a los equipos que operan en bandas designadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM).
- V. Permitir que en la misma banda de frecuencias puedan coexistir sistemas de banda angosta con varios sistemas de radiocomunicación por espectro disperso.
- VI. Prever que cuando operen no causen interferencias perjudiciales a otros equipos de operación autorizada, ni a las redes y servicios de telecomunicaciones de servicios autorizados.
- VII. Prever que al operar los equipos no inhiban la existencia y coexistencia del mayor número posible de sistemas de radiocomunicación por espectro disperso y de modulación digital.

3.2.5 Diferencias entre la tecnología LoRa y ZigBee

La siguiente tabla presenta una comparación detallada entre las tecnologías de comunicación inalámbrica LoRa y ZigBee, destacando las diferencias clave en aspectos como el rango de transmisión, el consumo de energía, la velocidad de datos, entre otros parámetros importantes.

Tabla 2. Diferencias entre LoRa y ZigBee

Fuente: (Elaboración propia)

CARACTERÍSTICAS	LORA	ZIGBEE
Autoridad de especificaciones	Alianza LoRa	Alianza Zigbee
Año de desarrollo	2009	1998
Estándar	IEEE 802.15g	IEEE 802.15.4
Tipo de red	LPWAN (Red de área ampliada de bajo consumo)	WPAN (Red de área personal)
Banda de frecuencia	Entre 863 para 870 MHz en Europa, 902 para 928 MHz en América, 915 para 928 MHz en Asia, y 2.4 GHz en todo el mundo	Sobre 868MHz en Europa, 915 MHz en América, y el estándar global 2.4GHz Industrial Scientific and Medical (ISMO)
Modulación	LoRa	BPSK para las frecuencias 868 y 915 MHz O-QPSK para la banda ISM 2,4 GHZ
Alcance	En zonas urbanas 5 km y en zonas rurales 20 km	Comprendido entre 10 y 100 metros, dependiendo de la potencia de salida y de las condiciones ambientales, tales como edificios, tipos de paredes interiores y topología geográfica
Rango de transmisión	Hasta 15-20 km. depende de numerosos factores, como puertas de enlace interiores o exteriores, antena usada, etc.	Máximo 100 metros Zonas urbanas. - a través de 3 millas (4.7 km) Zonas rurales. - 10 millas (16 km) o más
Velocidad de datos	De 300 bps a 37.5 kbps, según el ancho de banda utilizado y el factor de dispersión. Inferior en comparación con Zigbee	De 250 kbps, 100 kbps, 40 kbps, y 20 kbps
Técnica de acceso al medio	Aloha	CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance o acceso múltiple

		por detección de portadora con prevención de colisiones)
Autenticación y Cifrado	AES-128 (“Advanced Encryption Standard”) y autenticación de extremo a extremo	Utiliza cifrado de datos AES-128 para garantizar la confidencialidad y autenticación mutua para prevenir ataques de suplantación
Tipo de conexión	Menos de un segundo	Menos de 30 ms
Costo	Bajo	Medio
Inmunidad a interferencias	Alta	Baja
Consumo de energía	Bajo	Medio
Topología de red	Estrella. Cada nodo de dispositivo se comunica con una puerta de enlace específica	Varias topologías de red en Zigbee, incluyendo estrella, árbol, redes peer-to-peer y mesh (malla). En Mesh nodo puede comunicarse con cualquier otro nodo en la red de malla

3.2.6 Escenarios de Aplicación

Como se ha mencionado, la tecnología LoRa es una solución de comunicación inalámbrica de baja potencia y largo alcance, ideal para el Internet de las Cosas (IoT). A continuación, se presentan diversos escenarios de aplicación donde LoRa destaca por su capacidad de conectar dispositivos en áreas amplias, manteniendo un bajo consumo energético y costos operativos reducidos.

Tabla 3. Escenarios de aplicación

Fuente: (Elaboración propia)

--	--	--

ÁREAS DE APLICACIÓN	LORA	ZIGBEE
Agricultura	×	×
Industria	×	
Logística		
Ciudades Inteligentes	×	
Casas Inteligentes		
Salud	×	
Monitoreamiento Ambiental	×	×
Redes Eléctricas Inteligentes	×	

IV. DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1 Materiales

Para la implementación de la red inalámbrica compatible con la tecnología LoRa, así como la de ZigBee se decide trabajar con los siguientes dispositivos. A continuación, se enumeran y describen sus respectivas características.

Es importante mencionar que los dispositivos que diferencia a cada prototipo implementado con cada una de las tecnologías son los módulos LoRa E220-900T22D y ZigBee DRF1605, los cuales se describen en el punto 4.1.2 y 4.1.3.

4.1.1 Transceptor de datos E90-DTU (900SL30)



Figura 13. Transceptor de datos E90-DTU (900SL30)

Fuente: (Manual de usuario de E90-DTU (900SL30), p. 1)

- Con la tecnología de modulación LoRa de grado militar, dicho dispositivo funciona en la banda de frecuencia (850,125 ~ 930,125 MHz). Por defecto: 868,125 MHz
- Proporciona una interfaz RS232/RS485 transparente y admite una fuente de alimentación o entrada de tensión de 8 ~ 28 V

- La tecnología de espectro ensanchado de secuencia directa LoRa permitirá distancias de comunicación más largas
- Posee densidad de potencia concentrada y una gran capacidad anti interferente
- Incorpora un algoritmo de corrección de errores hacia delante FEC por software, que tiene una alta eficiencia de codificación y una gran capacidad de corrección de errores.
- Funciona en la banda ISM 868/915MHz con una distancia de comunicación de hasta 10km.
- Su potencia de transmisión es de hasta 1W y multinivel ajustable
- El paquete único tiene hasta 240 bytes
- Admite la función LBT, con ello el transceptor espera automáticamente para enviar datos de acuerdo con la intensidad del ruido ambiental.
- Rango de temperatura de funcionamiento: $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$, para adaptarse a una variedad de entornos de trabajo difíciles
- Ultra bajo consumo de energía, la corriente de espera es sólo 10mA, y la corriente de transmisión es $\leq 0.1\text{A}$.
- Potentes funciones de software, todos los parámetros se pueden programar: como potencia, frecuencia, velocidad de datos aéreos, ID de dirección, etc.

A continuación, se muestran las partes de este componente en las siguientes figuras, así como también la descripción de estas mismas y su modo operativo en la tabla 4 y 5.

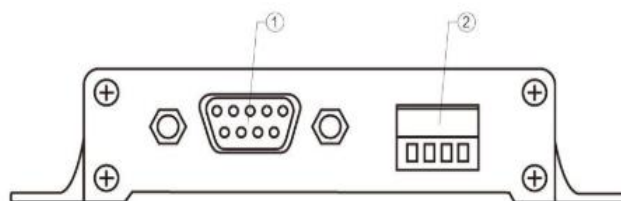


Figura 14. Conector hembra DB-9 y 3.81 bloque de terminales

Fuente: (Manual de usuario de E90-DTU (900SL30), p. 7)

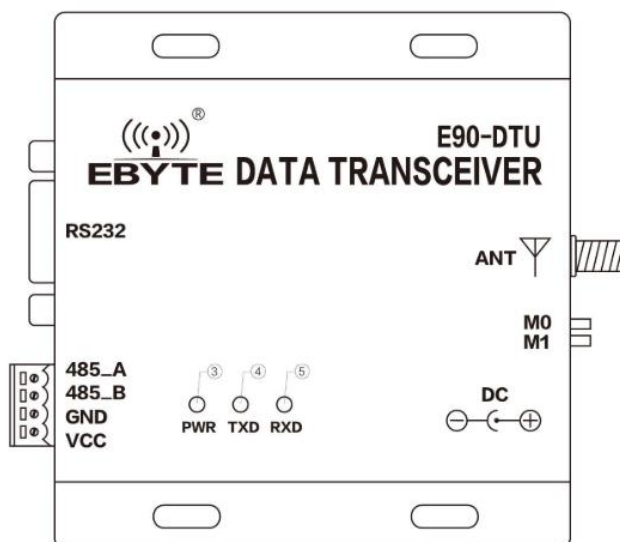


Figura 15. PWR-LED, TXD-LED, RXD-LED

Fuente: (Manual de usuario de E90-DTU (900SL30), p. 7)

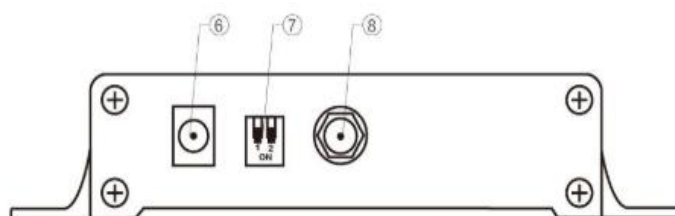


Figura 16. Interfaz de alimentación de CC, interruptor DIP e interfaz de antena

Fuente: (Manual de usuario de E90-DTU (900SL30), p. 7)

Tabla 4. Descripción de las partes del componente

Fuente: (Manual de usuario de E90-DTU (900SL30), p. 7)

NO.	NOMBRE	FUNCIÓN	NOTA
1	Conector hembra DB-9	Interfaz RS-232	Interfaz RS-232 estándar
2	3.81 bloque de terminales	RS-485, interfaz de alimentación	Interfaz estándar RS-485 e interfaz de alimentación de la línea de presión
3	PWR-LED	LED de encendido	Rojo, encendido cuando la alimentación está conectada
4	TXD-LED	LED de transmisión	Amarillo, parpadea al enviar datos
5	RXD-LED	LED de recepción	Amarillo, parpadea al recibir datos

6	Interfaz de alimentación de CC	Interfaz de alimentación	Orificio redondo en línea, diámetro exterior 5,5 mm, diámetro 2,5 mm
7	Interruptor DIP	Interruptor DIP	Controlado por modo de trabajo
8	Interfaz de antena	Interfaz SMA-K	rosca exterior, 10 mm, 50 Ω impedancia característica

Tabla 5. Modo operativo del transceptor de datos

Fuente: (Manual de usuario de E90-DTU (900SL30), p. 13)

	CATEGORIAS	M1	M0	NOTAS
Modo 0	Modo normal	ON	ON	Puerto UART Comm abierto y RF la transmisión transparente está activada, la configuración por aire a través de un comando especial está disponible.
Modo 1	Modo WOR	ON	OFF	Puede definirse como emisor WOR y receptor WOR, WOR está disponible
Modo 2	Modo de configuración	OFF	ON	Los usuarios acceden al registro a través del puerto serie para controlar el estado de funcionamiento del dispositivo. El DTU puede configurarse

				mediante el software de configuración del ordenador.
Modo 3	Modo de sueño	OFF	OFF	La DTU está en modo de reposo.

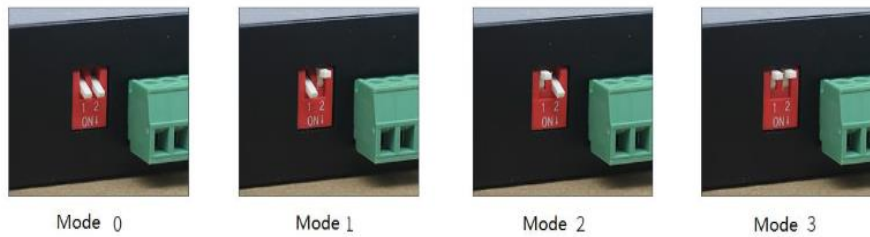


Figura 17. Categorías del modo operativo del transceptor de datos

Fuente: (Manual de usuario de Ebyte, p. 13)

4.1.2 Módulo inalámbrico LoRa E220-900T22D



Figura 18. Tamaño del módulo inalámbrico LoRa E220-900T22D

Fuente: (Manual de usuario de E220-900T22D, p. 4)

- Adopta una nueva generación de tecnología de espectro ensanchado LoRa y un módulo de puerto serie inalámbrico (UART) diseñado en base al esquema del chip LLCC68.
- Soporta una velocidad de transmisión de datos de $2,4k \sim 62,5k$ bps.
- Resiste alimentación d $3.0 \sim 5.5V$, alimentación superior a 5V puede garantizar el mejor rendimiento.
- Tiene una variedad de métodos de transmisión, trabaja en la banda de frecuencia (850,125 $\sim$ 930,125MHz) (por defecto 873,125MHz), salida de nivel TTL, compatible con 3,3V y 5V de
- Voltaje de puerto IO.
- Diseño estándar industrial, soporta el uso a largo plazo a $-40 \sim +85^{\circ}C$.
- Interfaz de antena SMA.
- Soporta despertador de aire, monitorización de portadora, clave de comunicación y otras funciones, así como ajuste de longitud de subpaquete, y Ebyte. Además, proporciona servicios de desarrollo personalizados.
- El módulo tiene PA+LNA incorporado, y la distancia de comunicación puede alcanzar los 10km en condiciones ideales; Los parámetros se guardan tras el apagado, y el módulo funcionará según los parámetros establecidos tras el encendido.
- Soporta que los usuarios establezcan la clave de comunicación por sí mismos, y no puede ser leída, lo que mejora en gran medida la confidencialidad de los datos del usuario.

- Eficiente diseño watchdog, una vez que se produce una excepción, el módulo se reiniciará automáticamente y continuará trabajando de acuerdo con los ajustes de parámetros anteriores.

Modo operativo del módulo inalámbrico con tecnología LoRa

Hay cuatro modos de funcionamiento, que se establecen por M1 y M0, los detalles son los siguientes que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 6. Modos de funcionamiento del módulo inalámbrico LoRa E220-900T22D

Fuente: (Manual de usuario de E220-900T22D, p. 11)

MODO (0-3)	MI	M0	DESCRIPCIÓN	COMENTARIO
0 modo de transmisión	0	0	UART y canal inalámbrico abiertos, transmisión transparente activada	
1 modo de transmisión WOR	0	1	Transmisor WOR	
	1	0	Receptor WOR	Admite despertador por aire

2 modo de recepción WOR				
3 modo de sueño profundo	1	1	El módulo entra en reposo (se despierta automáticamente al configurar los parámetros)	Admite la configuración

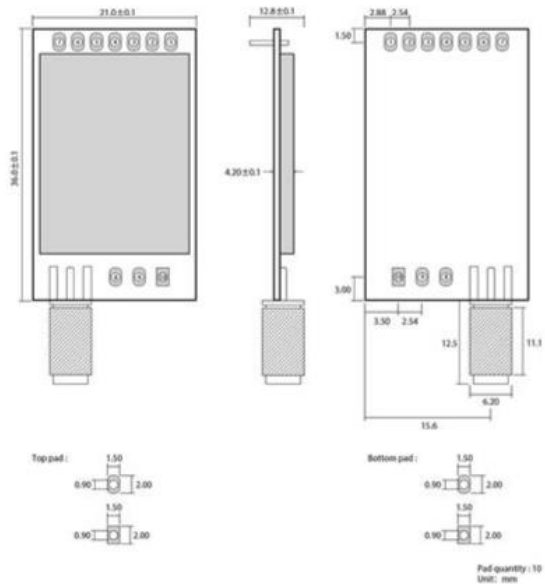


Figura 19. Tamaño mecánico y definición de los pines

Fuente: (Manual de usuario de E220-900T22D, p. 6)

A continuación, se presenta una tabla la cual define el número de pines del módulo inalámbrico LoRa y en donde se desglosa en detalle cada uno de los pines del dispositivo. En esta tabla se especifican tres aspectos claves: nombre, dirección y la función.

Tabla 7. Tabla de definición de pines

Fuente: (Manual de usuario de E220-900T22D, p. 6)

NO.	NOMBRE	DIRECCIÓN	FUNCIÓN
1	M0	Entrada (débil pull-up)	Trabaja con M1 para decidir los 4 modos de funcionamiento del módulo (no suspendido, si no se utiliza, podría conectarse a tierra)
1 2	M1	Entrada (débil pull-up)	Trabaja con M0 para decidir los 4 modos de funcionamiento del módulo (no suspendido, si no se utiliza, podría conectarse a tierra)
3	RXD	Entrada	Entradas TTL UART, se conecta al pin externo de salida TXD
4	TXD	Salida	Salidas TTL UART, se conecta al pin de entrada externo RXD
5	AUX	Salida	Se utiliza para indicar el estado de funcionamiento del módulo; el usuario activa la MCU externa y emite un nivel bajo durante la inicialización de autocomprobación de encendido; (puede dejarse flotante)
6	VCC	Entrada	Rango de tensión: 3,0~5,5V CC
7	GND	Entrada	Suelo
8	Orificio fijo	-	Orificio fijo

9	Orificio fijo	-	Orificio fijo
10	Orificio fijo	-	Orificio fijo

4.1.3 Módulo inalámbrico ZigBee DRF1605

La DRF serie de módulos ZigBee se puede entender como la imagen de inalámbrico RS232 conexión, por lo que el uso de este módulo es tan simple como el uso de un cable RS232.

- **Fácil de usar:** No se tiene que tener en cuenta el protocolo ZigBee, transmisión de datos en serie transparente;
- **Red automática:** Todos los módulos en el encendido de autoformación. El coordinador asigna automáticamente direcciones a todos los nodos.
- **Transmisión de datos sencilla**
- **Transmisión de datos serie transparente:** El coordinador recibe los datos del puerto serie automáticamente a todos los nodos, un nodo recibe los datos del puerto seri. Se enviará automáticamente al coordinador.
- **Transmisión punto a punto:** A través del puerto serie se puede realizar cualquier transmisión de datos entre nodos. A continuación, se presenta el formato de transferencia de datos:
- **Formato de transferencia:**
0xFD (comando de transmisión de datos) + 0x0A (longitud de datos) + 0x73 0x79 (dirección de destino) + 0x01 0x02 0x03 0x04 0x05 0x06 0x07 0x08 0x09 0x10 (datos eran 0x0A Bytes)
- **Dirección IEEE única:** Los módulos de la serie DRF utilizan los chips TI CC2530F256, que vienen de fábrica con su propia dirección IEEE.

- Los usuarios no necesitan comprar por separado la dirección IEEE, dirección IEEE (dirección MAC) puede ser identificado como un módulo ZigBee.
- Los usuarios pueden cambiar el tipo de nodo: El usuario puede cambiar el tipo de módulo a través del comando de puerto serie (Coordinador o Router)
- Los usuarios pueden cambiar el canal de radio: El usuario puede cambiar el canal de radio del módulo a través del comando de puerto serie.

Transmisión de Datos del Módulo Zigbee Serie DRF

Existen dos métodos para enviar datos:

1- Transmisión de datos transparente:

Solo se necesita que el primer byte no se transmita 0xFE, 0xFD o 0xFC, luego se ingresa automáticamente datos transparentes. Modo de transmisión;

El coordinador de los datos en serie recibidos se enviará automáticamente a todos los nodos;

Un nodo recibe los datos del puerto serie que serán enviados automáticamente al coordinador. En la figura 20 y figura 21 se puede observar lo descrito anteriormente.

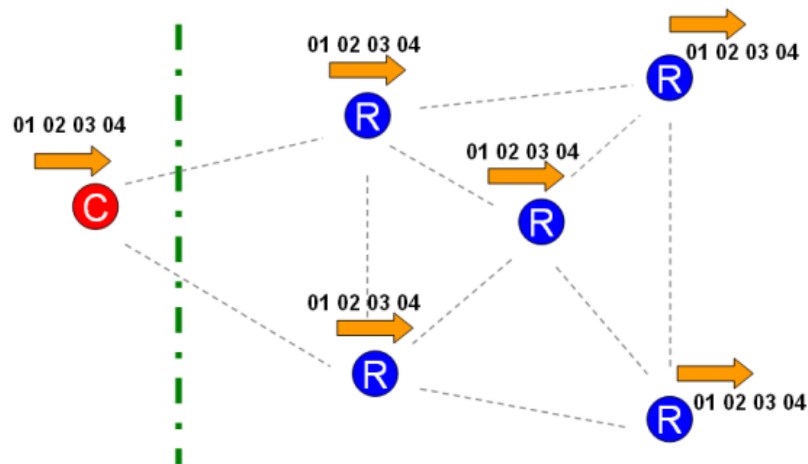


Figura 20. Transceptor de datos transparente: Coordinador de enrutadores

Fuente: (Guía del usuario del módulo Zigbee, p. 13)

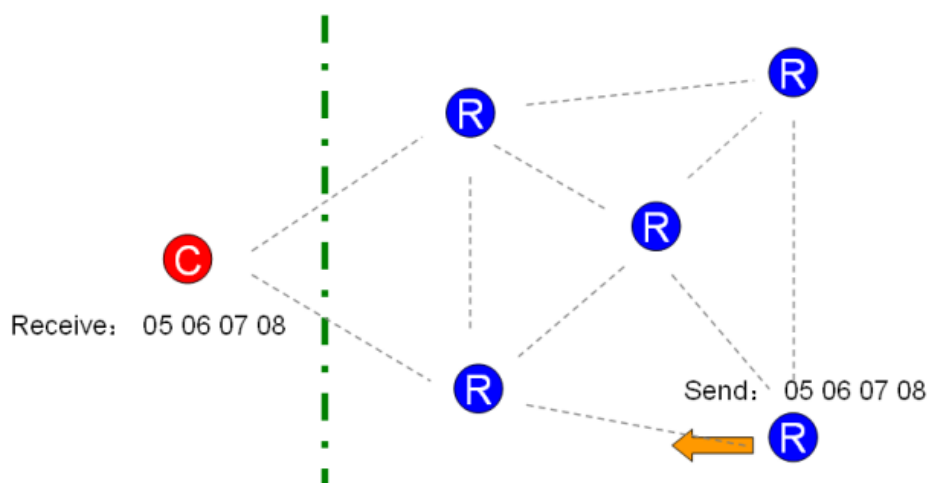


Figura 21. Transceptor de datos transparente: enrutador a coordinador

Fuente: (Guía del usuario del módulo Zigbee, p. 13)

Tabla 8. Rendimiento de transmisión de datos transparente

Fuente: (Guía del usuario del módulo Zigbee, p. 14)

DIRECCIÓN	LONGITUD DEL PAQUETE DE DATOS	INTERVALO MÁS RÁPIDO
Router => Coordinador	16 Bytes	20 ms
	32 Bytes	20 ms
	64 Bytes	20 ms
	128 Bytes	50 ms
	256 Bytes	200 ms
	> 256 Bytes	No se puede enviar
Coordinador => Router	16 Bytes	100 ms
	22 Bytes	100 ms
	64 Bytes	100 ms
	128 Bytes	200 ms
	256 Bytes	500 ms
	> 256 Bytes	No se puede enviar
Condiciones de prueba: 1. Temperatura ambiente, condiciones de laboratorio. 2. Distancia entre módulos de 2 metros, una buena señal 3. Velocidad de 38400 baudios (la velocidad de baudios más preferida) 4. Envío y recepción continuos, 100 K bytes, sin errores, prueba continua 10 veces 5. Software de prueba: asistente de depuración en serie SSCOM3.2		

2- Transmisión de datos punto a punto:

Cualquier nodo entre redes Zigbee puede transferir instrucciones punto a punto para transmitir datos;

Formato de envío:

Instrucciones de transferencia de datos (0xFD) + longitud de datos + dirección de destino + datos (hasta 32 Bytes)

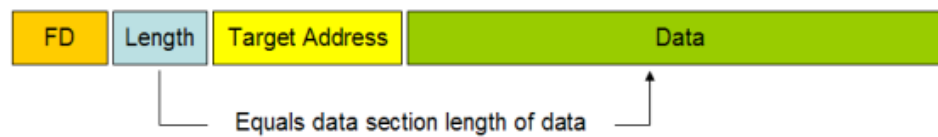


Figura 22. Formato de envío de la transmisión de datos de punto a punto

Fuente: (Guía del usuario del módulo Zigbee, p. 14)

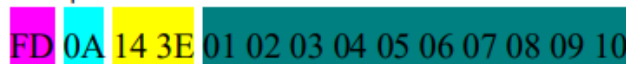


Figura 23. Ejemplo del formato anterior

Fuente: (Guía del usuario del módulo Zigbee, p. 14)

FD => Instrucciones de transferencia de datos

0A => Longitud de datos, 10 bytes

14 3E => Dirección de destino

01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 => Datos

Recibir formato de datos:

Recibe todos los datos del remitente y agrega dos bytes al último para la dirección de origen.

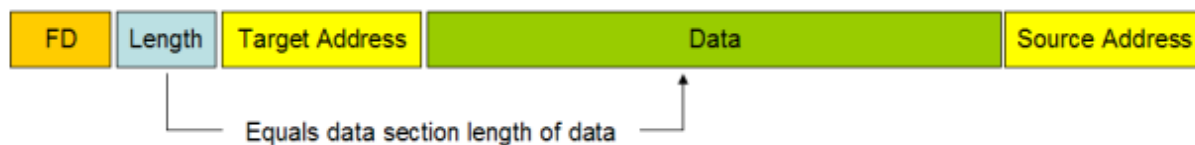


Figura 24. Formato de recepción de datos

Fuente: (Guía del usuario del módulo Zigbee, p. 15)

FD => Instrucciones de transferencia de datos

0A => Longitud de datos, 10 bytes

14 3E => Dirección de destino para el remitente y dirección propia para el destinatario

01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 => Datos

50 F5 => Dirección de origen

4.1.4 Sensor de suelo CWT (tipo NPK)



Figura 25. Sensor de suelo CWT (tipo NPK)

Fuente: (Manual del sensor de suelo CWT (tipo NPK), p. 1)

Tabla 9. Medición de parámetros del suelo

Fuente: (Manual del sensor de suelo CWT (tipo NPK), p. 1)

	Rango de medición: -40°C-80°C
--	-------------------------------

TEMPERATURA	Precisión: $\pm 5^{\circ}\text{C}$ (25°C) Estabilidad a largo plazo: $\leq 0,1\%^{\circ}\text{C}/\text{Y}$ Tiempo de respuesta: $\leq 15\text{s}$
HUMEDAD	Rango de medición: 0-100%RH Precisión: 2% dentro de 0-50%, 3% dentro de 50-100% Estabilidad a largo plazo: $\leq 1\%\text{RH}/\text{Y}$ Tiempo de respuesta: $\leq 4\text{s}$
CONDUCTIVIDAD (EC)	Rango de medición: 0-200000us/cm Precisión: el rango 0-10000 us/cm es $\pm 3\%$; el rango 10000-20000 us/cm es $\pm 5\%$ Estabilidad a largo plazo: $\leq 1\%\text{uS}/\text{cm}$ Tiempo de respuesta: $\leq 1\text{s}$
PH	Rango de medición: 3-9 PH Precisión: $\pm 0,3\text{PH}$ Estabilidad a largo plazo: $\leq 5\%/\text{año}$ Tiempo de respuesta: $\leq 10\text{S}$
NITRÓGENO FÓSFORO POTASIO	Rango de medición: 1-2999 mg/kg(mg/L) Resolución : 1 mg/kg(mg/L) Tiempo de respuesta: $< 1\text{S}$
RECORDATORIO La medición de NPK adopta el método general de detección rápida, por lo que hay ciertos errores, Utilizar con precaución para la siembra de referencia. Sin embargo, el sensor soporta la función de escritura de datos NPK. Puede utilizar instrumentos estándar para medir NPK luego escribir para proporcionar datos para el sistema de monitoreo	

Tabla 10. Especificaciones

Fuente: (Manual del sensor de suelo CWT (tipo NPK), p. 1)

FUENTE DE ALIMENTACIÓN	DC4.5-30V
CONSUMO MÁXIMO DE ENERGÍA	0.5W@24V DC
CLASE DE PROTECCIÓN	IP68, inmersión prolongada en agua
LONGITUD DEL CABLE	2M
ENTORNO OPERATIVO	-40°C-80°C
DIMENSIONES TOTALES	45 *15 *123 mm

4.1.5 Placa Arduino UNO (ATMega328P)

El ATmega328P es un microcontrolador de arquitectura RISC avanzado AVR de Atmel, de alto desempeño, bajo consumo y optimizado para compiladores C. La Figura 26 muestra el

diagrama en bloques del microcontrolador. Entre sus principales características podemos encontrar:

- 131 instrucciones potentes, la mayoría ejecutada en un solo ciclo de reloj.
- Un banco de 32x8 registros de propósito general.
- Hasta 20 MIPS (Millones de instrucciones por segundo) a 20 MHz.
- Un multiplicador hardware on-chip de 2 ciclos.
- Memoria de programa FLASH de 32 KBytes, programable dentro del sistema.
- Memoria SRAM interna de 2 KBytes.
- Memoria EEPROM de 1 KByte.
- 2 Timers/Contadores de 8 bits.
- 1 Timer/Contador de 16 bits.
- 6 canales PWM.
- 6 canales analógicos para el ADC.
- 1 puerto serial USART.
- 1 interface serial SPI.
- 1 interface serial 2-Wire, compatible con I2C.
- 1 Timer watchdog.
- 1 comparador analógico on-chip.
- Interrupciones.
- Varios modos de bajo consumo.

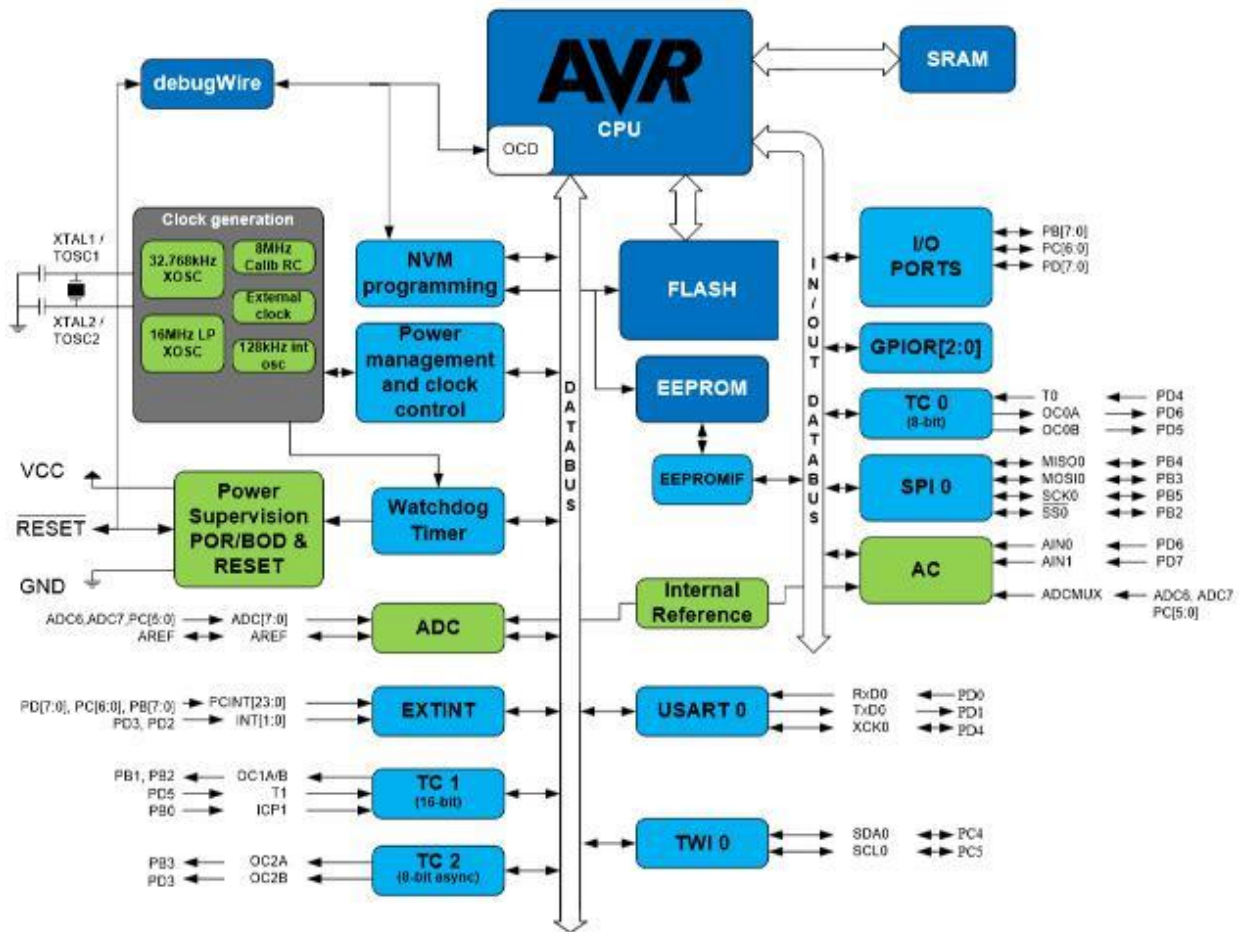


Figura 26. Diagrama en bloques del ATmega328P

Fuente: (Manual del ATmega328P), p. 3)

4.1.6 Módulo MAX485 Conversor RS485 a Serial TT

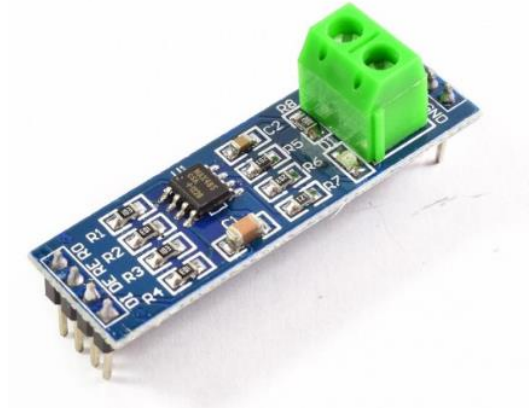


Figura 27. Módulo MAX485

Fuente: (Manual del MAX485), p. 2)

- Permite conectar microcontroladores como Arduino a distancias de hasta 1km utilizando RS485.
- Basado en el chip Maxim MAX485, permite comunicación tipo Half-Duplex, si se necesita implementar full-dúplex se debe utilizar 2 módulos (uno para enviar y otro para recibir datos).
- Estándar industrial de capa física que soporta la implementación de un bus de campo industrial tipo MODBUS, DMX, etc.
- Ampliamente utilizado por su robustez, fácil implementación y buenas prestaciones.
- Es ideal para transmitir a altas velocidades sobre largas distancias (35 Mbit/s hasta 10 metros y 100 kbit/s en 1200 metros) y a través de canales ruidosos, ya que reduce los ruidos que aparecen en los voltajes producidos en la línea de transmisión.

Especificaciones técnicas

VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN	5V DC
CORRIENTE DE OPERACIÓN	500 μ A (máx)
INTERFAZ CONTROLADOR SERIAL	UART TTL
TIPO DE COMUNICACIÓN	Half-Duplex
VELOCIDAD MÁXIMA	10 Mbit/s (a 12 metros)
DISTANCIA MÁXIMA DE ALCANCE	1200 metros (a 100 kbit/s)

4.2 Costos

Realizar cualquier tipo de proyecto, especialmente cuando se utilizan tecnologías, conlleva ciertos costos. A continuación, se presentan los costos identificados:

- **Transceptor de datos:** \$1396.00

- **Módulos Zigbee:** \$453.00 c/u. Se requieren dos; Uno actúa como transmisor y el segundo como receptor. Por lo que el costo total seria de \$906.00
- **Módulo LoRa:** \$180.00
- **Sensor de suelo:** \$1484.00
- **Módulo Conversor a Serial:** \$25.00

Es importante señalar que el costo de cada material está expresado en pesos mexicanos.

4.3 Etapas

4.3.1 Adquisición de datos

Como se ha mencionado en la presente tesis, los parámetros que se buscan obtener son los siguientes:

- Temperatura
- Humedad
- Fósforo
- Potasio
- Conductividad
- PH
- Nitrógeno

Para ello, se diseñó e implemento dos prototipos; uno con tecnología LoRa y otro con ZigBee. Ambos incluyen un sensor de suelo, el cual permitió obtener cada uno de los parámetros ambientales que se consideraron relevantes para su posterior almacenamiento y análisis.

En la figura 28 se puede observar el primer prototipo que se construyó tanto de la tecnología ZigBee como de LoRa. Este mismo está compuesto por los materiales enumerados y descritos en la sección “4.1 Materiales” de este documento.

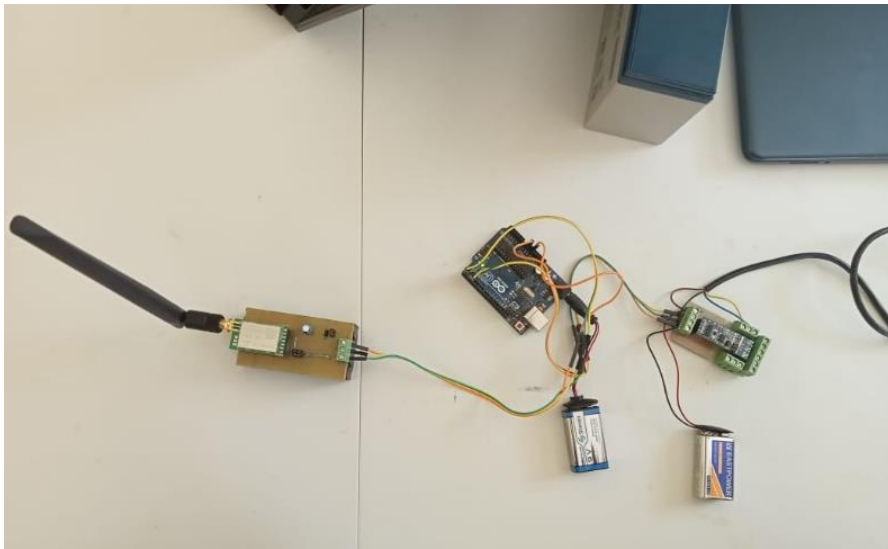


Figura 28. Primer prototipo LoRa/ZigBee armado

Fuente: (Elaboración propia)

Para una mejor presentación del prototipo, cada uno de los componentes que lo conforman se colocaron dentro de una caja pequeña de plástico. De esta manera quedo el prototipo final; Este se observa en la figura 29.



Figura 29. Prototipo final

Fuente: (Elaboración propia)

Por otro lado, el transceptor de datos creado inicialmente es el que se muestra en la figura 30.



Figura 30. Primer transceptor de datos

Fuente: (Elaboración propia)

Es importante mencionar que inicialmente el transceptor de datos que se utiliza durante las primeras pruebas es uno de tipo comercial. Aquel dispositivo trabaja con corriente y 12V (ver figura 31) mientras que el transceptor de datos creado de cero (ver figura 32) solo trabaja con 5V y únicamente requiere conectarse con cable USB.



Figura 31. Transceptor de datos comercial

Fuente: (Elaboración propia)



Figura 32. Transceptor de datos final

Fuente: (Elaboración propia)

Dicho transceptor construido manualmente cuenta con Bluetooth y en este caso la tecnología LoRa, aunque pudiese ser la tecnología ZigBee. Esto depende del módulo que se coloque en el prototipo. En la figura 33 se puede apreciar esta parte del prototipo.

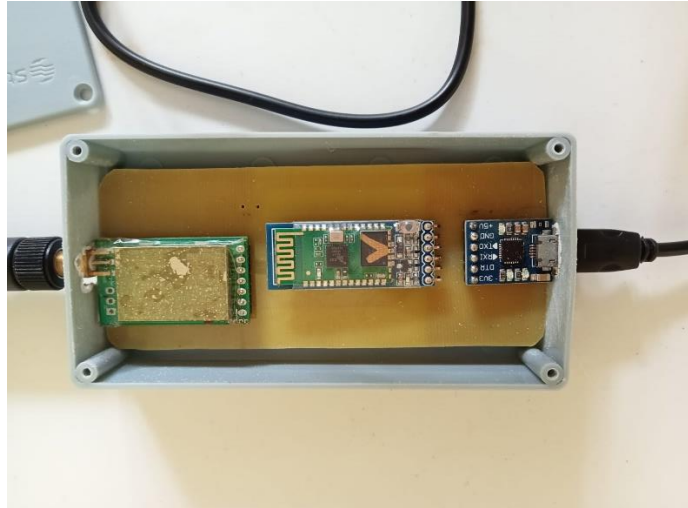


Figura 33. Componentes del transceptor de datos no comercial

Fuente: (Elaboración propia)

4.3.2 Extracción de la información

Después de obtener los datos necesarios a través del sensor de suelo y posteriormente extraerlos; es necesario convertir la información para su interpretación y comprensión total ya que esta se encuentra en formato hexadecimal. Los parámetros ambientales se logran visualizar en un puerto serial que el mismo transmisor realiza, es decir, no se requiere de un programa externo para ello. En la figura 34 se muestran los primeros datos obtenidos.

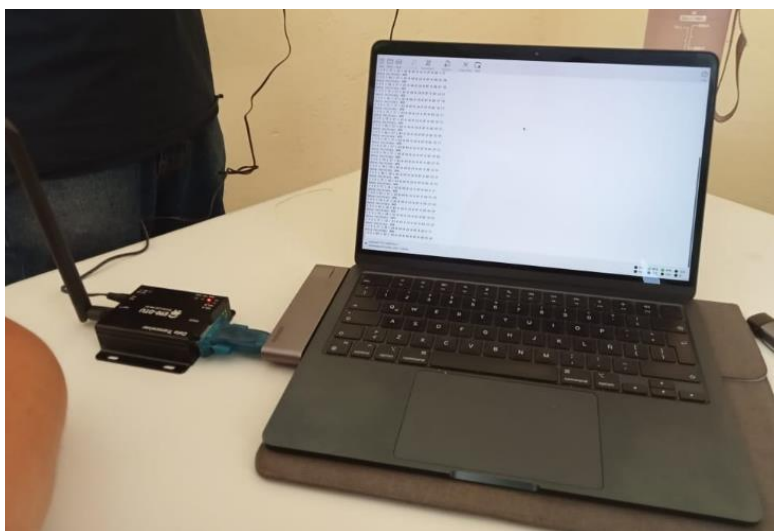


Figura 34. Primeros datos arrojados durante una prueba
 Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se presenta un ejemplo de los datos visualizados en pantalla y de lo que indica cada carácter:

Tabla 11. Ejemplo de la información recibida
 Fuente: (Elaboración propia)

Dí a	Funció n	Byte s	Humeda d		Temperatur a		Conductivida d		PH		N		P		K		Error	
01	03	0E	01	D0	01	4C	00	2C	0	5	0	2	0	5	0	6	7	2
									0	A	0	0	0	8	0	8	0	9

El número de caracteres que arroja el puerto serial es de 38.
 Para convertir los datos de hexadecimal a decimal, únicamente se toman de cada parámetro los caracteres que siguen después del cero o los ceros que se encuentran al principio, por ejemplo:

DIR (Dirección) = > 01

FUNCIÓN (Código de la función) = > 03

BYTES (Número de bytes) = > 0E

HUMEDAD = > 01, D0

TEMPERATURA = > 01, 4C

CONDUCTIVIDAD = > 00, 2C

PH = > 00, 5A

NITRÓGENO = > 00, 20

FÓSFORO = > 00, 58

POTASIO = > 00, 68

ERROR = > 70, 29

Quedando los valores de la siguiente manera:

Temperatura 14C H = 332 => Temperatura = 33.2°C

Humedad: 1D0 H= 464 => Humedad= 46.4%

Conductividad: 2C H= 44 => Conductividad = 44 us/cm

PH: 5A H= 56 => PH= 9

Nitrógeno: 20 H= 56 => N= 32 mg/kg

Fósforo: 58 H= 56 => P= 88 mg/kg

Potasio: 68 H= 104 => K= 104 mg/kg

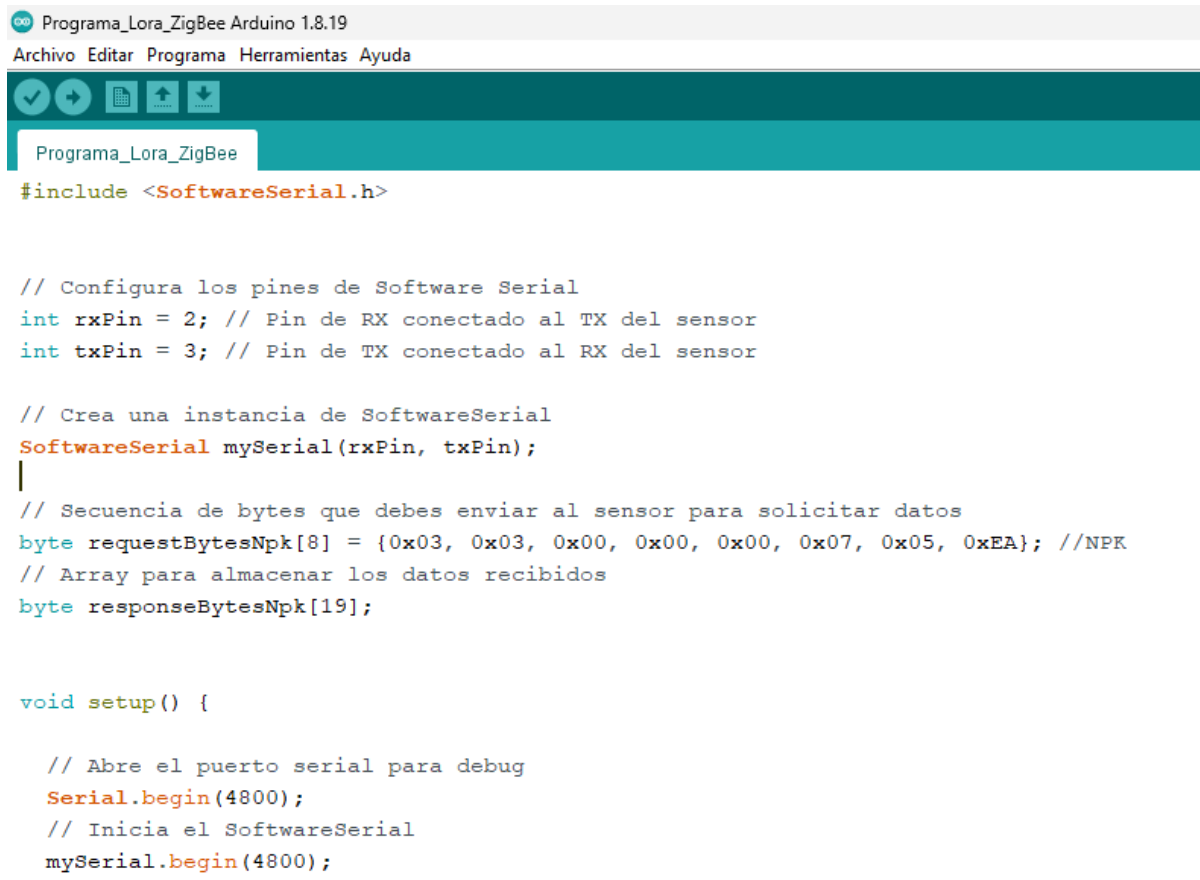
Los valores de dirección, código de la función, número de bytes y error son irrelevantes.

4.3.3 Visualización de los datos

La siguiente sección se subdivide en dos partes. Los dos constan de dos archivos creados en un entorno de desarrollo integrado. A continuación, se explican con detalle cada uno de ellos.

4.3.3.1 Programa en Arduino

Para extraer la información que arrojaba el sensor de humedad se requiere de un programa que tenga como función leer y mostrar cada uno de los parámetros ambientales. Por lo anterior, se implementa una lista de instrucciones en el IDE Arduino que cumpla con las funciones ya mencionadas. En la figura 35 y 36 se visualizan las instrucciones, así como un comentario breve de lo que significa cada una de ellas. Cabe destacar que con este programa se realizaron las primeras pruebas de los prototipos diseñados.



```
Programa_Lora_ZigBee Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

Programa_Lora_ZigBee
#include <SoftwareSerial.h>

// Configura los pines de Software Serial
int rxPin = 2; // Pin de RX conectado al TX del sensor
int txPin = 3; // Pin de TX conectado al RX del sensor

// Crea una instancia de SoftwareSerial
SoftwareSerial mySerial(rxPin, txPin);

// Secuencia de bytes que debes enviar al sensor para solicitar datos
byte requestBytesNpk[8] = {0x03, 0x03, 0x00, 0x00, 0x00, 0x07, 0x05, 0xEA}; //NPK
// Array para almacenar los datos recibidos
byte responseBytesNpk[19];

void setup() {

    // Abre el puerto serial para debug
    Serial.begin(4800);
    // Inicia el SoftwareSerial
    mySerial.begin(4800);
}
```

Figura 35. Programa creado para el dispositivo Arduino en las pruebas

Fuente: (Elaboración propia)



```
Programa_Lora_ZigBee Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

Programa_Lora_ZigBee

void loop() {

    // Envía la solicitud de datos al sensor NPK
    mySerial.write(requestBytesNpk, sizeof(requestBytesNpk));
    delay(2000); // Espera a que responda el sensor

    if (mySerial.available() >= 19) { // Espera a que estén disponibles 19 bytes
        for (int i = 0; i < 19; i++) { // Lee los 19 bytes
            responseBytesNpk[i] = mySerial.read();
        }

        // Procesa o muestra los datos recibidos
        // Serial.println("Datos recibidos: NPK");
        for (int i = 0; i < 19; i++) {
            Serial.print(responseBytesNpk[i], HEX);
            Serial.print(" ");
        }
        Serial.println();
        delay(2000);
    }
}
```

Figura 36. Programa creado para el dispositivo Arduino en las pruebas (parte 2)

Fuente: (Elaboración propia)

4.3.3.2 Interfaz en Android Studio

Para una mejor presentación de los parámetros ambientales se decide mostrarlos en una interfaz diseñada a través del IDE Android Studio. En dicha interfaz además de esta información, se encuentran dos botones. El primero permite generar un reporte mientras que el segundo exporta en Excel. Ambos botones realizan esas funciones con los datos.

En la figura 37 se visualizan los parámetros obtenidos haciendo uso del prototipo con la tecnología LoRa y en la figura 38 los mismos datos, pero con la diferencia de que se emplearon módulos ZigBee.

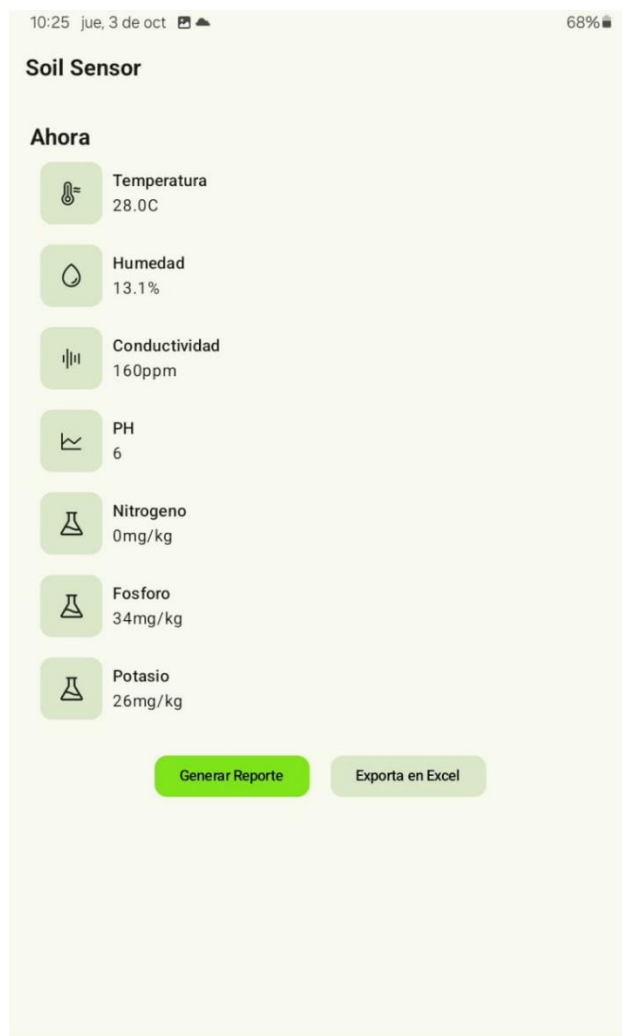


Figura 37. Información recolectada con el módulo LoRa

Fuente: (Elaboración propia)

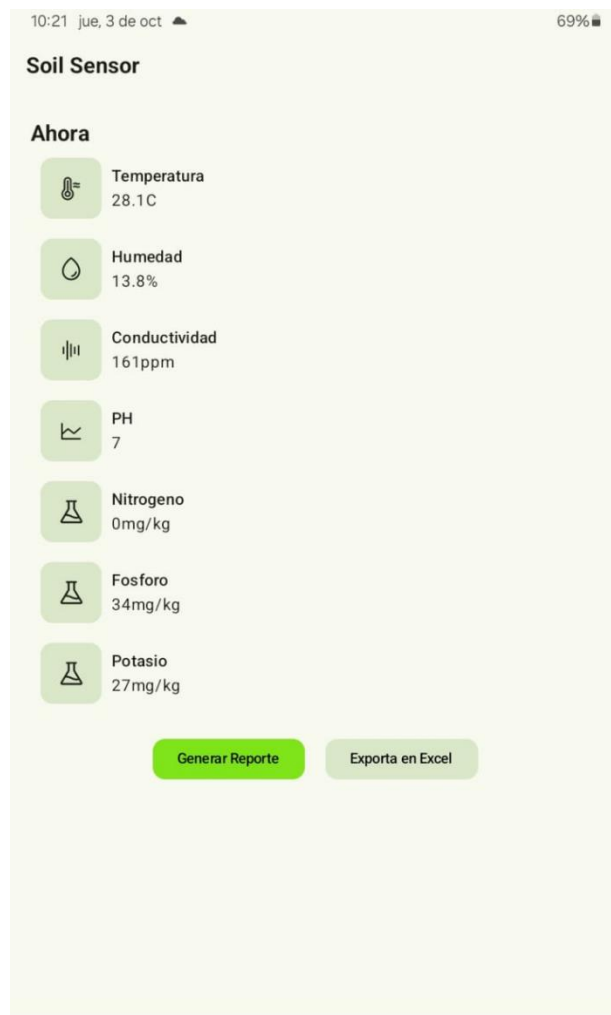


Figura 38. Información recolectada con módulos ZigBee

Fuente: (Elaboración propia)

4.3.4 Actuación en el campo

Implementación de Tecnología LoRa para el Monitoreo y Control de Riego en Invernaderos de Cholul, Cantamayec. En uno de los muchos proyectos del TecNM Campus Conkal, se implementa la tecnología LoRa en la comunidad de Cholul, Cantamayec, específicamente en los invernaderos de la localidad.

En esta comunidad, se tiene la oportunidad de visitar el hogar de la señora María, donde ella y su familia riegan sus plantas de manera manual, utilizando una manguera. Uno de los problemas que enfrenta la comunidad para el llenado de sus tinacos es la falta de agua en ciertas ocasiones, debido a que el municipio solo le permite el acceso al agua potable por algunas horas en la tarde. Por este motivo, se decide fabricar tinacos más grandes que puedan llenarse tanto con agua de la red municipal como con agua de lluvia.

Otro factor que afecta a la comunidad es el tiempo, ya que las familias no disponen del tiempo necesario para supervisar el llenado de los tinacos, debido a que muchas personas realizan actividades fuera de sus hogares para obtener ingresos económicos. En consecuencia, se opta por cambiar el sistema actual, diseñando un prototipo que riegue automáticamente las parcelas.

El prototipo incluye un temporizador que permite programar las horas de riego, de modo que el sistema realice la irrigación a la misma hora todos los días, una vez definida.

Además, debido a las dimensiones de los nuevos tinacos, no es posible saber a simple vista el nivel del agua, por lo que se instala un sensor de nivel que detecta la cantidad de agua disponible y posibles desperdicios. Este sensor también permite evitar el riesgo de dañar los tinacos al subirse a ellos o golpearlos para comprobar el nivel de agua. A petición de la comunidad, se implementa un sistema de control del nivel de agua (Ver figura 42). El sensor se alimenta de la corriente generada por una electroválvula y envía la información del nivel de agua a través de la tecnología LoRa hasta un prototipo ubicado dentro de los hogares, en una pequeña caja de madera. En esta caja se coloca una pantalla que muestra la cantidad de agua disponible. Esta se presenta en la figura 40.

Dado que en la localidad se ha detectado inestabilidad en el suministro eléctrico, especialmente durante las lluvias, se implementa un plan alternativo. Este plan consiste en que el riego de las parcelas se realice de manera automática en caso de que falle el sistema principal de agua.



Figura 39. Tinaco y el PVC hidráulico

Fuente: (Elaboración propia)

La figura 39 muestran los vasos comunicantes. Este término hace referencia al tinaco y al PVC hidráulico y quiere decir que, si uno de ellos se llena a cierto nivel, el otro vaso también tomara el mismo nivel. Cabe mencionar que en el PVC se encuentra el sensor de nivel ya que este tubo ayuda al sensor a mantenerlo estable.



Figura 40. Pantalla en donde se visualiza la información



Figura 41. Armado de uno de los vasos comunicantes

Fuente: (Elaboración propia)

En la figura 41 se observa cómo se coloca el sensor de nivel dentro del PVC hidráulico, el cual es uno de los vasos comunicantes como se había mencionado anteriormente.



Figura 42. Control del nivel del agua

Fuente: (Elaboración propia)

Se realizó una explicación a la señora responsable del huerto sobre el funcionamiento del control de riego además de que se le resolvieron las dudas que le surgieron en ese momento. (Ver figura 43)



Figura 43. Explicación a la señora responsable

Fuente: (Elaboración propia)

V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En base a las numerosas pruebas que se llevaron a cabo y las lecturas obtenidas en estas, se observó que con la tecnología LoRa y ZigBee, la información recibida es precisa y confiable, permitiendo un monitoreo efectivo de los parámetros ambientales en tiempo real. Ambas tecnologías demostraron ser capaces de transmitir datos de manera eficiente en condiciones diversas, aunque con diferencias notables.

Las tres diferencias principales entre ZigBee y LoRa son costo, consumo de corriente y alcance. ZigBee implica un mayor costo inicial en la implementación, y su rango de transmisión es más limitado, lo que puede requerir un mayor número de dispositivos para cubrir áreas extensas. En contraste, LoRa presenta un costo ligeramente menor, y su capacidad de transmisión a largas distancias reduce la necesidad de múltiples dispositivos, lo que puede resultar en una solución más económica a largo plazo en grandes extensiones. En cuanto al consumo de corriente, LoRa está diseñado para aplicaciones de baja potencia, permitiendo que los dispositivos operen durante largos períodos con baterías. ZigBee, aunque también es eficiente, tiende a consumir más energía en comparación, especialmente en redes con un alto número de nodos activos.

En general, el uso de estas tecnologías en la agricultura de precisión puede optimizar el riego, contribuir a un mejor uso de los recursos hídricos y mejorar la sostenibilidad de las prácticas agrícolas en zonas rurales.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta tesis, se ha logrado exitosamente la comparación entre dos tecnologías inalámbricas que actualmente son relevantes y tienen muchas aplicaciones en diversos ámbitos actualmente. Los resultados obtenidos respaldan el cumplimiento del objetivo general establecido debido a que gracias a esta comparación de LoRa y ZigBee se logra conocer que tecnología es idónea para la obtención de valores del control de riego a través del monitoreo de parámetros ambientales en las zonas rurales.

Partiendo de lo anterior descrito y de los resultados obtenidos, se puede afirmar que la tecnología LoRa es la opción más adecuada y rentable para cultivos en estas zonas.

El beneficio principal del prototipo implementado recae en que gracias a este se obtienen y se visualizan en tiempo real las lecturas del sensor. Lo anterior ayuda a la toma de decisiones en cualquier momento que se requiera ya que, el sistema de riego puede recibir actualizaciones constantes de las condiciones del suelo (como la humedad, PH, fósforo, etc.), lo que permite ajustar el riego de manera más precisa y basada en datos actualizados.

En cuanto a mejoras futuras respecto a la interfaz diseñada para la visualización de la información, se sugiere un apartado de reportes dentro de esta, es decir, sin la necesidad de que se genere externamente. Esta funcionalidad permite obtener información más detallada y rápida.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abhishek, K., & Kaur, S. (2019). Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.039>

Agro, R. (2022, julio 28). Agricultura de precisión. Rotoplas Agroindustria; Rotoplas. <https://rotoplas.com.ar/agroindustria/que-es-la-agricultura-de-precision/>

Alejandrino, J., Concepcion, R., Almero, V. J., Palconit, M. G., Bandala, A., & Dadios, E. (2020, December). A hybrid data acquisition model using artificial intelligence and IoT messaging protocol for precision farming. In 2020 IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM) (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HNICEM51456.2020.9400152>

Bahamonde J. (2022). Proyecto de titulación en opción al grado de magíster. Chicaiza, Quito, Ecuador.

Barrio, A. (2020). Internet de las cosas (2 ed.). Madrid, España, Editorial Reus. Recuperado de: <https://elibro.net/es/ereader/bibliotecaconkal/185096?page=26>

Catsensors. (2019, agosto 7). Soluciones LoRa para agricultura inteligente. iAgua.

<https://www.iagua.es/noticias/catsensors/soluciones-lora-agricultura-inteligente>

Chaudhary, S., Johari, R., Bhatia, R., Gupta, K., & Bhatnagar, A. (2019). CRAIoT: Concept, Review and Application(s) of IoT. Obtenido de 2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU):

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8777467>

Chulbi, C. (2020). Control del cultivo del caqui mediante tecnología IOT. (Universidad).

Eklund, C., & Johansson, K. (2021). A comparison of energy usage between LoRa 433Mhz and LoRa 868Mhz. Suecia: *Jönköping University.* [E-book]. Recuperado de:

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1581948/FULLTEXT01.pdf>

Espinosa, L. F. (2021). Implementación y Análisis de desempeño de una red de sensores inalámbricos inteligentes para una interfaz en monitoreo y control de variables. Tesis para obtener el grado de maestro en sistemas computacionales. Instituto Tecnológico de Chihuahua II.

Evans, D. (2017). *Internet de las cosas. Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo. Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG).

FAO. (2017). The future of food and agriculture (FAO).

Farías, G. (2024). Fundamentos teóricos de un proyecto o investigación. Universidad Central de Venezuela.

Hamidreza, S. (2015). Machine-Type Communications: Current Status and Future Perspectives Towards 5G Systems. IEEE Communications Magazine, 53(9), 10–17.

Igromi (2022). Recopilación de datos: Monitorización de máquinas desde una plataforma IOT. (Dakota del Norte). Igromi.com. Recuperado de: <https://igromi.com/recopilacion-de-datos-iot/>

NCyTU. (2018). Agricultura de Precisión. Oficina de Información Científica y Tecnológica para el congreso de la Unión.
https://www.foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_18-015.pdf

Ismail, D., Rahman, M., & Saifullah, A. (2018). Low-Power Wide-Area Networks: Opportunities, Challenges, and Directions.

Karkouch, A. (2016). Data Quality in Internet of Things: A state-of-the-art survey. Journal of Network and Computer Applications, 57–81.

Lin, J., Yu, W., Zhang, N., Yang, X., Zhang, H., & Zhao, W. (2017). Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications of Internet of Things: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(5), 1125–1142.

Ma, Y. W., & Chen, J. L. (2018). Toward intelligent agriculture service platform with lorabased wireless sensor network. En *Proceedings of 4th IEEE International Conference on Applied System Innovation 2018, ICASI 2018* (pp. 204–207). Chiba, Japan: IEEE.

<https://doi.org/10.1109/ICASI.2018.8394568>

Machado, M. (2019). Estudio de NB-IoT y comparativa con otras tecnologías LPWAN. Catalunya: Universitat Oberta de Catalunya.

Mayhua, E., Ludeña, J., Tamayo, J., Cuba, M., Nuñez, A., Gonzales, N., & Lozada, D. (2016). Sistema de riego por goteo automático utilizando una red de sensores inalámbricos. *Revista de Investigación (Arequipa)*, 7, 69–92. Recuperado de:

<http://ucsp.edu.pe/investigacion/wp-content/uploads/2017/01/4.-Sistema-de-riegopor-goteo-automatico.pdf>

Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2018). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1), 1–7.

<https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>

MOKO SMART. (2022, Mar.25). ¿Cuál es la tecnología detrás de la frecuencia LoRa? [Online]. Recuperado de: <https://www.mokosmart.com/es/lora-frequency/>

Mora, M. C., & Urrego, G. K., (2018). Monografía Internet de las Cosas: Modelos de Comunicación, Desafíos y Aplicaciones. Recuperado de: <https://repositorio.unillanos.edu.co/bitstream/handle/001/1486/Monograf%EDa%20Internet%20de%20las%20cosas%20modelos%20de%20comunicaci%F3n,desaf%EDos%20y%20aplicaciones..pdf?sequence=3>

Nabi, F., Jamwal, S., & Padmanbh, K. (2020). Wireless sensor network in precision farming for forecasting and monitoring of apple disease: a survey. International Journal of Information Technology, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s41870-020-00418-8>

Ramdoo, V. D., Khedo, K. K., & Bhoyroo, V. (2019). A flexible and reliable wireless sensor network architecture for precision agriculture in a tomato greenhouse. In Information systems design and intelligent applications (pp. 119-129). Singapore: Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-3338-5_12

Rayes, A., & Salam, S. (2019). Internet of Things From Hype to Reality. Springer International Publishing, 1–35. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99516-8>

Rizo, M., Vuelta, D. R., & Lorenzo, A. M. (2017). Agricultura, desarrollo sostenible, medioambiente, saber campesino y universidad. *Ciencia en su PC*, (2), 106-120. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/journal/1813/181351615008/html/>

Sadowski, S., & Spachos, P. (2020). Wireless technologies for smart agricultural monitoring using Internet of Things devices with energy harvesting capabilities. *Elsevier*, 172, 105338. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105338>

Sanjeevi, P., Prasanna, S., Siva Kumar, B., Gunasekaran, G., Alagiri, I., & Vijay Anand, R. (2020). Precision agriculture and farming using Internet of Things based on wireless sensor network. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 31 (12), e3978. <https://doi.org/10.1002/ett.3978>

Sepúlveda, J. (2019). El fenómeno tecnológico del Internet de las cosas. Su impacto en la sociedad española. (Trabajo Fin de Grado). Recuperado de: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle>