

UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

**Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada**

*Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.*

**Autores:**

Adrian Emilio Heredia Rivadeneria  
C.I: 010599929-6  
heredia.emilio95@gmail.com

Paúl Fernando Lucero Andrade  
C.I: 010581406-5  
paulf1694@hotmail.com

**Director:**

Ing. Darwin Fabián Astudillo Salinas, PhD  
C.I: 010390703-6

**Codirector:**

Ing. Andrés Marcelo Vázquez Rodas, PhD  
C.I: 030149684-0

**Cuenca - Ecuador  
10 de marzo de 2021**



---

---

## Resumen

El creciente desarrollo del Internet de las Cosas (*Internet of Things* (IoT)), ha diversificado sus campos de aplicación, mejorando no solo su enfoque original de interconexión de personas, sino también, optimizando la comunicación entre sistemas y maquinaria industrial (*Machine to Machine* (M2M)). Entre las características de IoT que pueden ser aprovechadas se encuentra el alcance, la escalabilidad y bajo costo de despliegue.

Las tecnologías *Long Range* (LoRa) y *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN) se muestran como una de las principales opciones de comunicación inalámbrica de bajo costo, facilitando la integración de diversos sistemas industriales con mira a los nuevos requerimientos de la Industria 4.0.

En este trabajo se realizó el diseño y despliegue de una red de sensores LoRaWAN compatible con *Open Platform Communications - Unified Architecture* (OPC-UA), siguiendo las directrices publicadas por *The LoRa Alliance* y *OPC Foundation*. En adición, se llevó a cabo una campaña de mediciones en ambientes industriales y en espacios urbanos despejados, donde se recopilaban variables de calidad del enlace como: *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) y tasa de pérdida de paquetes. Inicialmente se han considerado escenarios de corto alcance (<100 m) en los que se mantiene una línea de vista entre el transmisor y el receptor.

Con los datos obtenidos se evaluó la aplicabilidad de la tecnología LoRa y LoRaWAN dentro de ambientes industriales con varias fuentes de interferencia. La red de sensores inalámbricos presentada en este trabajo, es capaz de integrarse a sistemas industriales que cuenten con arquitectura OPC-UA.

El diseño y configuración de los componentes se basó en sistemas de código abierto y en plataformas de desarrollo de bajo costo, con el fin de facilitar la replicabilidad y la mejora del proyecto en trabajos futuros.

**Palabras clave : LoRa. LoRaWAN. OPC-UA. Industry 4.0**



---

## Abstract

The growing development of the Internet of Things (IoT) has diversified its fields of application, improving not only its original approach to interconnection of people, but also, optimizing communication between systems and industrial machinery (M2M). Among the IoT features that can be exploited are the reach, scalability and low cost of deployment.

The LoRa and LoRaWAN technologies are shown as one of the main low-cost wireless communication options, facilitating the integration of various industrial systems with a view to the new requirements of Industry 4.0.

In this work, the design and deployment of a LoRaWAN sensor network compatible with OPC-UA was carried out, following the guidelines published by *The LoRa Alliance* and *OPC Foundation*. In addition, a measurement campaign was carried out in industrial environments and in clear urban areas, where link quality variables such as: RSSI, SNR and packet loss rate were collected. Initially, short-range scenarios (<100 m) have been considered in which a line of sight is maintained between the transmitter and the receiver.

With the data obtained, the applicability of the LoRa and LoRaWAN technology within industrial environments with various sources of interference was evaluated. The wireless sensor network presented in this work is capable of being integrated into industrial systems with OPC-UA architecture.

The design and configuration of the components was based on open source systems and low-cost development platforms, in order to facilitate the replicability and improvement of the project in future work.

**Keywords :** LoRa. LoRaWAN. OPC-UA. Industry 4.0



---

---

## Índice general

<b>Resumen</b>	1
<b>Abstract</b>	2
<b>Índice general</b>	3
<b>Índice de figuras</b>	6
<b>Índice de tablas</b>	8
<b>Cláusula de Propiedad Intelectual</b>	9
<b>Cláusula de Propiedad Intelectual</b>	10
<b>Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional</b>	11
<b>Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional</b>	12
<b>Certifico</b>	13
<b>Certifico</b>	14
<b>Dedicatoria</b>	15
<b>Dedicatoria</b>	16
<b>Agradecimientos</b>	17
<b>Abreviaciones y acrónimos</b>	18
<b>1. Introducción</b>	<b>20</b>
1.1. Identificación del problema . . . . .	20
1.2. Justificación . . . . .	21
1.3. Alcance . . . . .	21
1.4. Objetivos . . . . .	21
1.4.1. Objetivo general . . . . .	21
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	22



---

<b>2. Marco teórico</b>	<b>23</b>
2.1. Internet industrial de las cosas . . . . .	23
2.2. Red de sensores inalámbricos . . . . .	24
2.3. LoRa . . . . .	24
2.4. LoRaWAN . . . . .	25
2.4.1. Clases de LoRaWAN . . . . .	26
2.4.2. Arquitectura . . . . .	26
2.5. OPC-UA . . . . .	27
2.5.1. Clases de dispositivos OPC . . . . .	28
2.5.2. Arquitectura de OPC-UA . . . . .	28
2.6. Path loss y shadowing . . . . .	29
2.7. Métricas de análisis estadístico . . . . .	29
2.7.1. Medidas numéricas . . . . .	29
2.7.2. Desviación estándar . . . . .	30
2.8. Conclusiones . . . . .	30
<b>3. Estado del arte</b>	<b>31</b>
3.1. LoRa y LoRaWAN . . . . .	31
3.2. OPC . . . . .	32
3.3. Conclusiones . . . . .	34
<b>4. Metodología</b>	<b>35</b>
4.1. Descripción de equipos . . . . .	35
4.1.1. Heltec WiFi LoRa 32 . . . . .	35
4.1.2. Raspberry Pi 3 modelo B . . . . .	36
4.1.3. Arduino NANO . . . . .	36
4.1.4. Disposición de equipos . . . . .	37
4.2. Configuración de los dispositivos . . . . .	37
4.2.1. Configuración del nodo sensor . . . . .	38
4.2.2. Configuración del <i>gateway</i> . . . . .	38
4.2.3. Configuración del servidor . . . . .	39
4.3. Descripción del ambiente . . . . .	39
4.3.1. Ambiente industrial 1 . . . . .	40
4.3.2. Ambiente industrial 2 . . . . .	41
4.3.3. Ambiente urbano abierto 1 - Parque El Paraíso . . . . .	42
4.3.4. Ambiente urbano abierto 2 - parque Los Alpes . . . . .	42
4.4. Descripción de la metodología de medición . . . . .	43
4.4.1. Intervalos de medición . . . . .	43
4.4.2. Envío de paquetes . . . . .	44
4.4.3. Descripción y almacenamiento . . . . .	44
4.5. Descripción del procedimiento de adquisición de datos mediante OPC-UA . . . . .	45
4.6. Conclusiones . . . . .	45

---



---

<b>5. Despliegue y resultados</b>	<b>47</b>
5.1. Red de pruebas LoRaWAN	47
5.1.1. Nodo sensor	47
5.1.2. Gateway	48
5.1.3. Servidor	49
5.2. Mediciones de RSSI, SNR y Pérdida de Paquetes	50
5.3. Análisis y comparación estadística	52
5.3.1. Análisis estadístico	52
5.3.2. Comparación estadística entre ambientes	52
5.4. Simulaciones	54
5.5. Integración con arquitectura OPC-UA	58
5.6. Tráfico OPC-UA	59
5.6.1. Resultados	60
5.7. Conclusiones	61
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>62</b>
6.1. Conclusiones	62
6.2. Recomendaciones	63
6.3. Trabajos futuros	63
<b>A. Configuración de dispositivos</b>	<b>65</b>
A.1. Diseño y configuración del nodo sensor	65
A.1.1. Diseño	65
A.1.1.1. Diseño de Carcasa	65
A.1.1.2. Diseño del PCB	68
A.1.2. Configuración	70
A.2. Diseño y Configuración del gateway	73
A.2.1. Diseño	73
A.2.2. Configuración	73
A.3. Configuración de servidores	75
A.3.1. Servidor LoRaWAN	76
A.3.2. Servidor MQTT	79
A.3.3. Interfaz Gráfica y Almacenamiento	80
<b>B. Configuración Cliente-Servidor OPC-UA</b>	<b>83</b>
B.1. Configuración del Cliente OPC-UA	83
B.2. Configuración del Servidor OPC-UA	84
<b>C. Artículo publicado</b>	<b>86</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>95</b>



---

---

## Índice de figuras

2.1. Arquitectura LoRaWAN [32] . . . . .	27
2.2. Diagrama Funcional de OPC-UA . . . . .	28
4.1. Tarjeta Heltec WiFi LoRa 32 (V2) [57] . . . . .	36
4.2. Raspberry Pi 3 modelo B [58] . . . . .	36
4.3. Arduino NANO V2.3 [58] . . . . .	37
4.4. Disposición de equipos en la red LoRaWAN . . . . .	37
4.5. Diagrama de la estructura del nodo sensor . . . . .	38
4.6. Diagrama de la estructura del <i>gateway</i> . . . . .	39
4.7. Diagrama de la estructura del servidor . . . . .	39
4.8. Ubicaciones del nodo sensor en ambiente industrial 1 . . . . .	40
4.9. Ubicaciones del nodo sensor en ambiente industrial 2 . . . . .	41
4.10. Ubicaciones del nodo sensor en ambiente urbano abierto 1 . . . . .	42
4.11. Ubicaciones del nodo sensor en ambiente urbano abierto 2 . . . . .	43
4.12. Encriptación de mensajes . . . . .	44
4.13. Almacenamiento de mensajes . . . . .	45
5.1. Nodo sensor . . . . .	48
5.2. Gateway . . . . .	49
5.3. Configuración de los servidores . . . . .	40
5.4. Resultados de SNR para los ambientes industriales y de control . . . . .	51
5.5. Resultados del RSSI para los ambientes industriales y de control . . . . .	51
5.6. Resultados de la Tasa de Pérdidas de Paquetes . . . . .	52
5.7. Desviación estándar para SNR . . . . .	53
5.8. Desviación estándar para RSSI . . . . .	53
5.9. Escenario de simulación sin restricciones. Nodos = 15 . . . . .	55
5.10. Simulaciones escenario 1 . . . . .	57
5.11. Simulaciones escenario 2 . . . . .	57
5.12. Escenario de simulación con restricciones. Nodos = 15 . . . . .	58
5.13. Tráfico entre cliente y servidor OPC-UA . . . . .	59
5.14. Mensajes OPC-UA . . . . .	60
5.15. Servidor OPC-UA: interfaz gráfica . . . . .	61
A.1. Sección inferior de carcasa para nodo sensor. . . . .	66
A.2. Sección inferior de carcasa para nodo sensor. . . . .	67



---

A.3. Diseño final de carcasa para nodo sensor. . . . .	67
A.4. Creación de librería para SX1278 ESP32 LoRa . . . . .	68
A.5. Diseño circuito esquemático para nodo sensor. . . . .	69
A.6. Diseño final de PCB para nodo sensor. . . . .	69
A.7. Configuración de <i>gateway</i> en el servidor LoRaWAN . . . . .	76
A.8. Configuración de la red: información general . . . . .	77
A.9. Configuración de la red: <i>Adaptive Data Rate (ADR)</i> . . . . .	77
A.10. Configuración de nodo: general . . . . .	78
A.11. Configuración de nodo: ADR . . . . .	78
A.12. Configuración del manejador . . . . .	79
A.13. Configuración del conector . . . . .	79
A.14. Mensajes MQTT . . . . .	80
A.15. Node-RED: cliente MQTT. . . . .	80
A.16. Node-RED: Cliente MQTT. . . . .	81
A.17. Interfaz de usuario: indicadores y gráficos históricos . . . . .	82
B.1. Comunicación cliente - servidor OPC-UA . . . . .	84
B.2. Dispositivos del servidor y cliente OPC-UA . . . . .	85





---

## Índice de tablas

2.1. Tecnologías de internet industrial de las cosas . . . . .	24
2.2. Bandas de frecuencias de operación de LoRa [25] . . . . .	25
5.1. Parámetros para simulaciones . . . . .	56



## Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Adrian Emilio Heredia Rivadeneira, autor de la tesis "Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 10 de marzo de 2021

Adrian Emilio Heredia Rivadeneira  
010599929-6



## Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Paúl Fernando Lucero Andrade, autor de la tesis "Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 10 de marzo de 2021

Paúl Fernando Lucero Andrade  
010581406-5



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Adrian Emilio Heredia Rivadeneira en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 10 de marzo de 2021

Adrian Emilio Heredia Rivadeneira  
010599929-6



### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Paúl Fernando Lucero Andrade en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 10 de marzo de 2021

Paúl Fernando Lucero Andrade  
010581406-5



---

## Certifico

Que el presente proyecto de tesis: Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada, fue dirigido y revisado por mi persona.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'D' and 'A' intertwined.

---

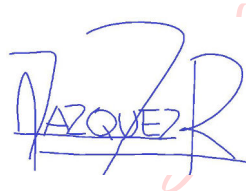
**Ing. Darwin Fabián Astudillo Salinas, PhD**  
**Director**



---

## Certifico

Que el presente proyecto de tesis: Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada, fue dirigido y revisado por mi persona.



Firmado digitalmente  
por Andres Marcelo  
Vazquez Rodas  
Fecha: 2021.03.11  
17:32:05 -05'00'

---

**Ing. Andrés Marcelo Vázquez Rodas, PhD**  
**Co-director**



---

## Dedicatoria

Para Chary y Cris, su cariño me ha guiado a buen puerto.  
Para Mamina, desde la eternidad celebra a mi lado.

**Emilio Heredia Rivadeneira**





---

## Dedicatoria

A mis padres Mario y Mónica, quienes con entrega, dedicación y cariño nunca dejaron de apoyarme a lo largo de mi carrera universitaria. Todos mis logros son por y para ustedes.

A mi hermana Maricela y mi sobrino Ismael, con su cariño y ocurrencias siempre lograron pintar una sonrisa en mi rostro a pesar de las adversidades.

**Paúl Lucero Andrade**



---

## Agradecimientos

En primera instancia queremos agradecer a Dios, por permitirnos culminar este trabajo con éxito, bajo su protección y amparo.

Este trabajo de titulación fue posible gracias al trabajo y dedicación de los docentes que nos formaron como grandes personas y profesionales, en especial al Ing. Fabián Astudillo Salinas y al Ing. Andrés Vázquez Rodas por los conocimientos impartidos para poder alcanzar esta meta.

Los autores de este trabajo agradecen de forma especial a las empresas Cartopel S.A y al Grupo empresarial Graiman por su apoyo a proyectos de innovación que afianzan los lazos entre la academia y la industria

**Emilio Heredia - Paúl Lucero**



---

---

## Abreviaciones y Acrónimos

**6LoWPAN** *IPv6 over Low -Power Wireless Personal Area Networks.* 33

**ADR** *Adaptive Data Rate.* 77

**ARM** *Advanced RISC Machines.* 36

**BLE** *Bluetooth Low Energy.* 33

**BW** *Bandwidth.* 44

**CSS** *Chirp Spread Spectrum.* 24

**CSV** *Comma Separated Values.* 52, 81

**GPIO** *General Purpose Input/Output.* 36

**HART** *Highway Addressable Remote Transducer Protocol.* 20, 23

**HTML** *Hypertext Markup Language.* 84

**I2C** *Inter-Integrated Circuit.* 36–38, 45, 46, 58, 60, 83

**IIoT** *Industrial Internet of Things.* 20, 23, 25, 30, 31

**IoT** *Internet of Things.* 20, 21, 23, 25, 31, 35, 47

**IP** *Internet Protocol.* 25, 27, 38, 58, 76, 83

**ISM** *Industrial, Scientific and Medical.* 23, 25

**JSON** *JavaScript Object Notation.* 80

**LAN** *Local Area Network.* 24

**LDR** *Light Dependent Resistor.* 84

**LoRa** *Long Range.* 20, 21, 23–25, 30–32, 34, 35, 37–39, 43, 44, 47, 48, 54–56, 58, 60–64, 66, 75, 76, 83

**LoRaWAN** *Long Range Wide Area Network.* 20–23, 25–27, 30–32, 34–37, 39, 44–50, 54, 58, 61–65, 73, 75, 76, 78–80, 83

**LPWAN** *Low Power Wide Area Network.* 23, 25

**M2M** *Machine to Machine.* 27, 32

**MAC** *Media Access Control.* 21, 31, 34, 35, 76

**MQTT** *Message Queuing Telemetry Transport.* 21, 33, 39, 44, 46, 49, 63, 65, 76, 78–81

**NB-IoT** *Narrow Band - IoT.* 25

**OPC** *Open Platform Communication.* 23, 27, 28, 30,



- OPC-AE** *Open Platform Communications Alarms and Events.* 28
- OPC-DA** *Open Platform Communications Data Access.* 28
- OPC-HAD** *Open Platform Communications Historical Data Access.* 28
- OPC-HDA** *OPC Historical Data Access.* 28
- OPC-UA** *Open Platform Communications - Unified Architecture Unified Architecture.* 20, 21, 23, 27–29, 31–34, 37, 39, 44–47, 49, 58–61, 63, 70, 76, 83, 84
- OSI** *Open Systems Interconnection model.* 21
- PC** *Personal Computer.* 27
- PCB** *Printed Circuit Board.* 38, 65, 68, 69
- PER** *Packet Error Rate.* 31, 32, 34, 62
- PLC** *Programmable Logic Controller.* 37, 45, 46, 58, 60, 61, 72, 83, 84
- RSSI** *Received Signal Strength Indicator.* 21, 29, 30, 32, 34, 43, 45, 46, 50–52, 54, 61–63
- SCADA** *Supervisory Control And Data Acquisition.* 33, 34
- SF** *Spreading Factor.* 21, 31, 38, 43, 44, 51, 56, 57, 62, 63, 71, 75, 77
- SNR** *Signal-to-Noise Ratio.* 21, 30, 32, 34, 43, 45, 46, 50–52, 54, 61–63
- SPI** *Serial Peripheral Interface.* 35, 36, 38
- TCP/IP** *Transmission Control Protocol/Internet Protocol.* 35, 59
- TTL** *Transistor-Transistor Logic.* 84
- UART** *Universal Asynchronous Receiver Transmitter.* 36, 37, 70
- UDP** *User Datagram Protocol.* 83
- USB** *Universal Serial Bus.* 37, 43, 66
- WiFi** *Wireless Fidelity.* 20, 25, 26, 37–39, 45, 46, 48, 73, 74
- WLAN** *Wireless Local Area Network.* 20
- WSN** *Wireless Sensor Network.* 20, 23, 24, 27, 29–33, 36, 39, 45, 50, 54, 61–63, 81
- XML** *eXtensible Markup Language.* 32



---

## Introducción

Este capítulo presenta la identificación del problema, justificación y los objetivos del presente proyecto.

### 1.1. Identificación del problema

Las primeras tres revoluciones industriales se caracterizan por la producción mecánica, dependiendo de recursos como agua, vapor, energía eléctrica y mano de obra masiva, luego asistida por electrónica y producción automatizada [1]. Mientras que la cuarta revolución (Industria 4.0), se basa en la comunicación de múltiples sistemas para la toma de decisiones descentralizadas y autónomas. Esto busca incrementar eficiencia, productividad, seguridad y transparencia [2]. Las tecnologías *Wireless Sensor Network (WSN)* han demostrado un gran potencial para aplicaciones industriales, especialmente en procesos de monitoreo y control, donde se recolectan diferentes variables a través de sensores y se transfieren de forma inalámbrica a un sistema central, para su operación y mantenimiento [3]. *Wireless Fidelity (WiFi)* es una opción para implementarse en ambientes comerciales e industriales, sin embargo requiere un considerable uso de energía y puede entrar en conflicto con redes *Wireless Local Area Network (WLAN)* existentes, por lo que tecnologías enfocadas en aplicaciones IoT e *Industrial Internet of Things (IIoT)* (LoRa, ZigBee, *Highway Addressable Remote Transducer Protocol (HART)*) pueden adaptarse a sistemas industriales tradicionales sin entrar en conflicto con las transmisiones de radio existentes [4].

Considerando la capacidad de las *WSN* y las tecnologías de Área amplia y bajo consumo, *LoRa* se destaca como una de las más exitosas tecnologías, por facilitar comunicaciones robustas a través de largas distancias sobre la red sin licencia sub-GHz (433 MHz), estas características han acrecentado su interés para aplicaciones para la Industria 4.0 y el Internet Industrial de las Cosas [5].

Las tecnologías *LoRa* y la arquitectura *LoRaWAN* han demostrado en múltiples estudios previos [6, 7] un comportamiento satisfactorio en diferentes entornos. La contribución de este trabajo es el diseño y despliegue de una red de sensores inalámbricos capaces de integrarse a los sistemas existentes en el entorno industrial (*OPC-UA*) con el fin de facilitar el reporte y monitoreo de variables involucradas en la producción y manufactura automatizada.



## 1.2. Justificación

LoRa es la definición de una capa física (modelo *Open Systems Interconnection model (OSI)*), que provee un enlace de comunicación de largo alcance, ha sido estandarizada y extendida, agregando una capa *Media Access Control (MAC)* conocida como LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), la que define la arquitectura de red y el protocolo de comunicación [8]. La principal ventaja de la tecnología LoRa, es la de crear un enlace de comunicación a larga distancia, utilizando baja potencia, sin intervenir con redes existentes y proveyendo movilidad a los dispositivos [9].

La arquitectura LoRaWAN se orienta a eventos y mensajes de *uplink*, donde se recolecta datos desde una gran cantidad de nodos desplegados en extensas áreas [5]. LoRaWAN define la capa de enlace de datos (*Data Link*) sobre la capa física definida por LoRa [10]. Está diseñada para trabajar con una baja tasa de transmisión de datos, ideal para soluciones IoT que requieran comunicación de larga distancia. Además cuenta con una gran escalabilidad, arquitectura celular y funciones de coordinación central.

LoRa y LoRaWAN son capaces de cubrir los requerimientos necesarios para su aplicación en ambientes industriales, donde se requiera una gran cantidad de nodos [11]. La arquitectura unificada OPC-UA, es un estándar independiente de plataforma, por el cual varias clases de sistemas y dispositivos pueden comunicarse enviando mensajes entre clientes y servidores, sobre varios tipos de redes, esto permite una integración sencilla con dispositivos de IoT [12].

## 1.3. Alcance

El proyecto se centra en el desarrollo e implementación de una red *testbed* con arquitectura LoRaWAN, capaz de integrarse a sistemas de producción y manufactura en ambientes industriales, basados en OPC-UA. Se busca dimensionar la red en base a estimaciones del patrón de propagación dentro de una planta industrial donde se evaluarán los niveles de interferencia y atenuación. Como variables para el análisis y dimensionamiento de la red, se utilizarán el *Received Signal Strength Indicator (RSSI)*, *Signal-to-Noise Ratio (SNR)* y el porcentaje de pérdida de paquetes.

El dispositivo a utilizarse en la capa física, (LoRa), tanto para el nodo como en el *gateway*, es el chip SX1278 de Semtech, el cual opera en la banda de 433 MHz, permitiendo modificar el *Spreading Factor (Spreading Factor (SF))* y la potencia de transmisión. El servidor LoRaWAN y *Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)*, destinados para la comunicación con aplicaciones externas, se montarán sobre un ordenador Raspberry PI 3.

Se realizarán pruebas y mediciones en dos de las principales plantas industriales de la ciudad de Cuenca, cuyas instalaciones serán elegidas en el análisis de la metodología. Para las pruebas de campo se desplegarán varios nodos, transmitiendo hacia un *gateway* manteniendo condiciones de línea de vista.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

Implementar un sistema de redes de sensores inalámbricos para el monitoreo de procesos industriales usando una arquitectura de red LoRaWAN.



### 1.4.2. Objetivos específicos

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el estado del arte sobre redes de sensores inalámbricos aplicados en ambientes industriales.
- Diseñar e implementar una red de pruebas con arquitectura [LoRaWAN](#) en plataformas ESP32, SX1278 y Raspberry PI para el monitoreo de procesos industriales.
- Diseñar, implementar y evaluar una aplicación industrial usando la solución de monitoreo basado en [LoRaWAN](#).
- Evaluar cómo los niveles de interferencia y atenuación en ambientes industriales afectan el sistema propuesto.
- Dimensionar la red de sensores valiéndose de estimaciones del patrón de propagación dentro de un ambiente industrial.



---

## Marco teórico

La investigación y desarrollo en redes de sensores inalámbricos ha expandido sus campos de aplicación, aportando con mejoras en fiabilidad, robustez y escalabilidad. Las tecnologías originalmente diseñadas para aplicaciones de **IoT**, en la actualidad, son capaces de un desempeño satisfactorio en ambientes hostiles para transmisiones de radio frecuencia.

**LoRa**, como tecnología de capa física y **LoRaWAN**, como protocolo de Red, destacan como la principal opción para aplicaciones de redes de sensores inalámbricos, caracterizadas por su amplio rango de transmisión, bajo costo y frecuencias de operación. Para la integración de las **WSN** a sistemas industriales se eligió el protocolo *Open Platform Communication (OPC)* de arquitectura unificada (**OPC-UA**). En el presente capítulo se presentan de forma detalla las tecnologías **LoRa**, **LoRaWAN** y **OPC-UA** para la recolección y transmisión de información.

### 2.1. Internet industrial de las cosas

El **IoT** es un concepto que describe conexiones a Internet ubicuas, convirtiendo objetos (sensores, máquinas, vehículos, edificios), en dispositivos conectados, capaces de sensar un ambiente. El fin principal de **IoT** es mejorar la percepción humana de su medio ambiente [13]. Por otro lado, el **IIoT** se basa en tecnologías de **IoT**, para conectar los bienes de producción, como máquinas y sistemas de control, buscando optimizar las operaciones industriales. [14]

Los despliegues actuales de **IIoT**, involucran protocolos cableados, por ende no soportan movilidad (**HART**, **6TiSCH**), requieren altos costos de instalación, o de ser inalámbricos (IEEE802.15.4), operan en bandas altamente congestionadas (2.4 GHz *Industrial, Scientific and Medical (ISM)*). En contraste con los actuales protocolos de **IIoT**, **LoRa** puede ofrecer una solución de largo alcance, mitigando limitaciones previas [15].

Una variedad de tecnologías inalámbricas de largo alcance (*Low Power Wide Area Network (LPWAN)*), han sido implementadas satisfactoriamente en soluciones de **IoT** para escenarios urbanos y forestales [16]. En el caso de ambientes industriales, las tecnologías principales se detallan en la Tabla 2.1 [17].



Tabla 2.1: Tecnologías de internet industrial de las cosas

	LoRa	Wi-Fi HaLow	NB-IoT	802.15.4g TSCH
<b>Banda</b>	libre sub-GHz	libre sub-GHz	licenciada (LTE)	libre sub-GHz
<b>Ancho de Banda</b>	125 kHz/250 kHz	1/2/4/8/16 MHz	180 kHz	200 kHz–1.25 MHz
<b>Topología</b>	estrella de estraltes	estrella/árbol	celular	estrella, malla p2p
<b>Alcance</b>	15 km	1 km	20 km	1 km
<b>Ciclo mínimo</b>	>1 s	> 20 ms	> 1.6 s	> 20 ms
<b>MAC</b>	LoRaWAN	EDCA/DCF	OFDMA (DL) & SC-FDMA (UL)	TSCH

## 2.2. Red de sensores inalámbricos

Las (WSN), se componen de sistemas embebidos capaces de interactuar con el ambiente por medio de transductores, procesando información para comunicarla de forma inalámbrica a dispositivos vecinos o hacia un nodo central. Cada nodo sensor se equipa al menos con un sensor, un radio transceptor, un procesador y una fuente de energía [18].

Los avances en las WSN y la implementación de sistemas embebidos de automatización y recopilación de datos, se han vuelto mucho más factibles para la interconexión de “islas” de monitoreo industrial [19]. Las WSN pueden ser usadas en aplicaciones industriales para la detección de eventos poco recurrentes y para la recolección periódica de información. [20]

Las redes de sensores inalámbricos cuentan con propiedades particulares, en contraste con las redes inalámbricas móviles convencionales (*Local Area Network (LAN)* inalámbrica, *Bluetooth*, servicio móvil avanzado) [21].

Las características de las WSN se muestran a continuación:

- **Capacidades de procesamiento:** Es limitada, debido al reducido espacio para programación y la capacidad de memoria.
- **Consumo energético:** Los protocolos y algoritmos deben ser optimizados para conservar la vida de la batería, de ser el caso. El consumo de energía del nodo al transmitir información es muchas veces mayor al empleado en procesamiento.
- **Dinámica:** La red debe ser capaz de reconfigurarse al sufrir cambios en su topología, debido al movimiento, falla o adición de nodos–sensores.
- **Descentralizada:** El despliegue de nodos sensores no debe requerir infraestructura de red previa. Los nodos sensores deben ser capaces de auto-ajustarse y formar parte de la red inmediatamente luego de ser encendidos.
- **Orientado a aplicaciones:** Las WSN son altamente dependientes de aplicaciones, siendo su función principal proveerlas de información recolectada del medio.
- **Seguridad:** Las redes deben soportar protocolos de seguridad para el tráfico entre objeto y usuario final.

## 2.3. LoRa

La tecnología LoRa, es un tipo de modulación de capa física basada en *Chirp Spread Spectrum (CSS)* [22], la cual consiste, en el uso de una señal *chirp*. Este método consiste en aumentar (*upchirp*), o disminuir (*downchirp*), la frecuencia de una señal senoidal durante un período de tiempo, usando todo el ancho de banda



asignado al canal ; esto permite un aumento en la resistencia a señales de interferencia, y además, reduce el desvanecimiento de la señal, debido a la propagación multicamino [23]. Al ser un estándar LPWAN, es posible reducir la velocidad de datos, siempre y cuando existan rangos de comunicación más amplios [23].

El bajo consumo energético y su gran alcance hacen que LoRa sea uno de los estándares más usados en el desarrollo de aplicaciones IIoT, esto permite que, los dispositivos usados en este tipo de desarrollos industriales, aumenten su tiempo de vida. Sin embargo, en algunos casos, LoRa presenta ciertos inconvenientes en cuanto a la latencia se refiere, puesto que, en la actualidad existen otros protocolos que proporcionan una latencia más baja y una velocidad de datos más alta, por ejemplo *Narrow Band - IoT* (NB-IoT) [24].

Una de las mayores ventajas de LoRa, radica en el uso de una amplia gama de frecuencias sin licencia, mismas que, pertenecen al espectro ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), esto garantiza la interoperabilidad [22]. En la tabla 2.2, se presentan las bandas de frecuencia sin licencia en las que LoRa puede operar:

Tabla 2.2: Bandas de frecuencias de operación de LoRa [25]

PLAN DE CANALES	NOMBRE COMÚN
Europa 863 – 870 MHz	EU868
Europa 433 MHz	EU433
Estados Unidos 902 – 928 MHz	US915
China 779 – 787 MHz	CN779
China 470 – 510 MHz	CN470
Australia 915 - 928 MHz	AU915
Australia 923 MHz	AS923
Rusia 864 – 870 MHz	RU864
Corea del Sur 920 – 923 MHz	KR920
India 865 – 867 MHz	IN865

## 2.4. LoRaWAN

LoRaWAN es una arquitectura de red inalámbrica de área amplia de largo alcance. Los protocolos para este tipo de red fueron desarrollados recientemente para su uso en diferentes aplicaciones [26]. La arquitectura está diseñada para dispositivos de bajo consumo energético, usados generalmente en el desarrollo de aplicaciones relacionadas al Internet de las Cosas IoT y el Internet Industrial de las Cosas IIoT.

Una red LoRaWAN, cuenta con una topología conocida como: Estrella de Estrellas (*Star of Stars*), compuesta por cuatro elementos principales: dispositivos finales (nodos), *gateways*, servidor de red y un servidor de aplicación. Los dispositivos finales generalmente, se encuentran conformados por sensores o actuadores, los cuales comparten con el *gateway* la información adquirida, haciendo uso de la capa física LoRa mediante nodos o motes. Por su parte, el *gateway* se encarga de recibir dicha información y compartirla con el servidor mediante una comunicación basada en un protocolo IP, como redes WiFi o redes móviles celulares [27].

Este protocolo cuenta con características que permiten recopilar datos en un solo *gateway* desde varios nodos ubicados a diferentes distancias, incluso kilómetros, mediante una comunicación unidireccional [10]. Sin embargo, en algunos casos se ha optado por la comunicación bidireccional entre nodo y *gateway*.



### 2.4.1. Clases de LoRaWAN

En [28], se definen 3 clases para los nodos LoRaWAN. Cada una de ellas está compuesta por diferentes características, las cuales, permiten al usuario realizar diferentes tipos de comunicaciones en base al consumo energético. A continuación se describen cada una de las clases establecidas:

- **Clase A:** comúnmente soportada por la mayoría de motes o nodos. Permite comunicación bidireccional, la transmisión *Downlink*, se realiza durante intervalos de tiempo, lo cual permite obtener menor consumo de energía. Este tipo de clase es recomendable para dispositivos que funcionen alimentados por batería.
- **Clase B:** Similar a la clase A. La clase B permite una comunicación bidireccional, con la única diferencia, que los *slots* de recepción están programados en base a un tiempo determinado por el *gateway*. Esto aumenta el consumo de energía del nodo [29].
- **Clase C:** Esta clase se encuentra continuamente escuchando, siempre y cuando no esté transmitiendo. Esto provoca un elevado consumo de energía, sin embargo, proporciona la latencia de *Downlink* más baja en comparación a las clases anteriores [28] [29].

### 2.4.2. Arquitectura

Como se mencionó al inicio de esta sección, y en [27], la arquitectura LoRaWAN se basa en un modelo *Star of Stars*, mismo que permite garantizar una comunicación eficaz entre dispositivos, además de un bajo consumo energético en los dispositivos finales.

Esta topología está conformada por cuatro componentes principales: *end-devices*, nodos o motes, *gateways*, un servidor de red y un servidor de aplicación [30]. Los nodos son los encargados de recolectar información perteneciente a diversos tipos de sensores, utilizados en este tipo de aplicaciones, y posteriormente enviar la información a los *gateways*, valiéndose de las directrices del protocolo LoRaWAN. La función de los *gateways*, radica en el envío de la información sin procesar, recolectada de cada nodo, hacia un servidor de red, mediante una interfaz de *back-haul* de mayor rendimiento ( $throughput \geq 100Mbps$ ,  $delay \leq 200ms$ ) como Ethernet, 3G / 4G, satélite o WiFi [31]. Finalmente, el servidor de red recibe la información enviada en forma de paquetes desde los nodos, los decodifica y aplica protocolos de seguridad, de manera que cada una de las aplicaciones puedan recibir los datos del servidor de red, usando a su conveniencia dicha información [30]. En la Figura 2.1, se puede observar cada uno de los componentes de la arquitectura descrita.

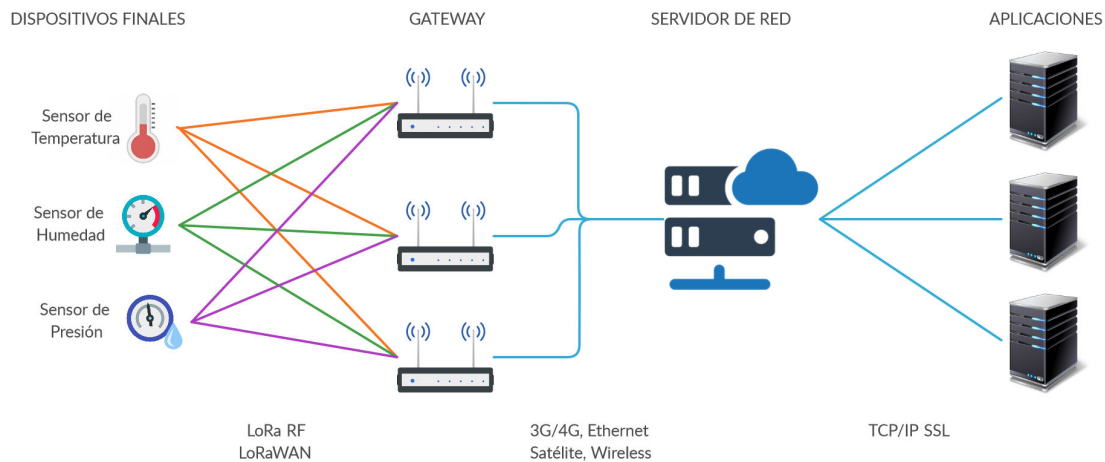


Figura 2.1: Arquitectura LoRaWAN [32]

## 2.5. OPC-UA

**OPC-UA** es un protocolo para la comunicación industrial, desarrollado en los últimos años por la fundación **OPC**, con el objetivo de transportar la gran cantidad de datos recolectados desde la maquinaria de manera segura, confiable e interoperable, pudiendo ser entre máquina a máquina, **M2M** (*Machine to Machine*), o entre máquina y **Personal Computer (PC)** (*Machine to PC*), [33]. Una de las grandes ventajas que presenta este protocolo es la unificación de todas las funciones existentes en versiones anteriores del estándar **OPC** [34], permitiendo así, el acceso a un grupo de nuevas características como: múltiples jerarquías y la proporción de métodos y programas [35].

Una de las características más relevantes de este protocolo es la simpleza de su manejo. Esto se debe a que el estándar basa su funcionamiento en tres conceptos principales: la capacidad de consultas, los mecanismos de publicación y el establecimiento de la conexión. La capacidad de consultas **OPC-UA** está orientada hacia arquitecturas industriales que presenten una gran cantidad de nodos de manera que la búsqueda de datos transmitidos al servidor sea eficiente. Para escenarios con un número menor de nodos no es necesario el uso de dichas consultas. La función del mecanismo de publicación, se asemeja a la emisión de mensajes de alerta, notificando a uno o varios clientes sobre cambios de datos. Finalmente el establecimiento de conexión crea un canal seguro para la capa de transporte, encriptando los mensajes existentes en la comunicación cliente-servidor [34].

En la figura 2.2, se presentan los protocolos y dispositivos que componen, tanto el cliente como el servidor **OPC-UA**. Se observa que toda la red **LoRaWAN** funciona como un único cliente **OPC-UA**, conectado al servidor por medio de una red **IP**. Para la **WSN**, las funciones y procesos del cliente **OPC-UA** son manejados por medio del software **Node-RED** instalado tanto, en el ordenador **Raspberry Pi**, como en un ordenador externo que cumple como servidor.

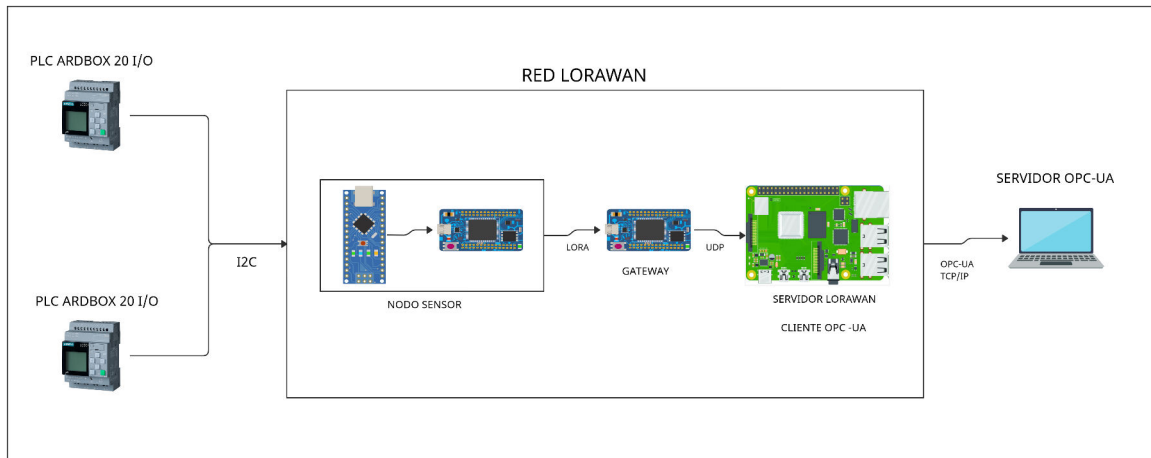


Figura 2.2: Diagrama Funcional de OPC-UA

### 2.5.1. Clases de dispositivos OPC

En [36] se presenta cuatro clases de dispositivos OPC relevantes en la industria: *Open Platform Communications Data Access (OPC-DA)*, *Open Platform Communications Alarms and Events (OPC-AE) (Alarms and Events)*, *Open Platform Communications Historical Data Access (OPC-HAD)* y *OPC-UA*. Una breve definición y las características de cada una de estas clases se presentan a continuación:

- **OPC-UA:** Es el encargado de direccionar las variables pertenecientes a cada uno de los procesos industriales, los cuales se ven involucrados en el uso de sensores para recolección de datos hacia las interfaces de usuario y de control de una planta, de modo que puedan ser usados de manera informativa, o a su vez, de una manera que permita controlar el entorno de trabajo. Cabe recalcar que dicha información recolectada, puede ser transmitida durante intervalos de tiempo o en tiempo real, puesto que los procesos industriales están sujetos a cambios repentinos, por lo que depende del usuario o de la empresa el control de los mismos [37].
- **OPC-AE:** A diferencia de OPC-DA, OPC-AE se encarga de presentar al usuario notificaciones sobre procesos anormales suscitados dentro de la industria, de manera que puedan ser registrados como una alarma y puedan ser intervenidos según la situación lo amerite [37].
- **OPC Historical Data Access (OPC-HDA):** Tiene como principal función el acceso a datos, eventos y alarmas, generados y almacenados en los sistemas de la industria. Esta información generalmente es usada para realizar un análisis estadístico, en busca de mejoras de rendimientos en base a gráficos de tendencia. Entre los principales datos a considerar, se encuentran: picos promedios y varianza [37].
- **OPC-UA:** Al inicio de la sección 2.5, se explicó más a fondo la función de OPC-UA, sin embargo, cabe agregar que, para realizar cada una de sus funciones, hace uso de tecnología *web*, obteniendo así mayor independencia de un sistema operativo [37].

### 2.5.2. Arquitectura de OPC-UA

OPC-UA se basa en una arquitectura cliente-servidor [33], mediante la cual, el servidor permite a cada uno de los clientes la interacción con la información almacenada, de modo que su uso se adapte a las necesidades del usuario [38].



En [33], se define el intercambio de información entre servidor y cliente como un proceso simple, dado que, para su eficaz accionar es necesario hacer uso de los servicios de lectura y escritura de OPC-UA. Esto permite que el cliente pueda interactuar con los datos de varios nodos.

Dado el caso, de la existencia de varias comunicaciones correspondientes a diferentes sistemas operativos, el cliente suele crear una pila de solicitudes que, necesariamente debe sincronizarse con la pila creada en el lado del servidor, para que así, este pueda atender las solicitudes creadas en el lado del cliente [39].

## 2.6. Path loss y shadowing

Entre los aspectos más importantes a considerar al diseñar una red inalámbrica, se encuentran las pérdidas producidas por factores externos, las cuales pueden influenciar en el bajo rendimiento de la red, produciendo niveles bajos de RSSI y a su vez afectando la recepción de paquetes enviados desde un nodo sensor al gateway.

El *Path loss* ocurre debido a que el patrón de radiación de una antena isotrópica, emite energía de manera uniforme en todas direcciones. Dicha energía se ve afectada por la distancia, mientras mayor sea la distancia de recepción de la señal, menor será la energía recibida. Aunque existen métodos para mejorar la distancia de transmisión de una antena; como aumentar su ganancia o incrementar la potencia de transmisión en ciertas direcciones, no son recomendables debido a la aleatoriedad en la que se encuentran los dispositivos receptores en las aplicaciones de WSN. [40].

En cuanto al *shadowing*, [40] hace referencia al desvanecimiento de la señal producido por obstáculos presentes en el ambiente como edificios y montañas. Gran parte de estos obstáculos están presentes en ambientes urbanos, por lo que la consideración de este tipo de pérdidas es común en enlaces inalámbricos aplicados en este tipo de escenarios.

En [41] se propone la Ecuación 2.1, como una manera de representar las pérdidas de trayectoria.

$$PL_{(dB)} = PL_{(d_0)} + 10 n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma} \quad (2.1)$$

En donde:

- $PL_{(d_0)}$  representa las pérdidas de trayectoria a una distancia referencial.
- $d_0$  representa la distancia referencial.
- $d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor.
- $n$  El exponente de pérdida de trayectoria.
- $x_{\sigma}$  representa el *shadowing*

En [40] se sugiere que el exponente de pérdidas de trayectoria  $n$  sea igual a 2 en vacío, un rango entre 2.7 y 3.5 para ambientes urbanos y un rango entre 2 y 2.7 si es que el ambiente de aplicación es un área suburbana.

## 2.7. Métricas de análisis estadístico

### 2.7.1. Medidas numéricas

Una vez concluido el levantamiento de datos en los diferentes ambientes propuestos, es necesario resumirlos con el objetivo de conseguir una medida representativa de cada lugar en el que se desarrolló este proyecto. Para ello, [42] sugiere realizar un procedimiento de muestreo de tal manera que se pueda hacer uso de medidas de posición y medidas de variabilidad para lograr el objetivo planteado.

- **Muestreo Aleatorio Simple:** Consiste en la obtención de datos que tienen la misma probabilidad de ser seleccionados desde un conjunto de muestras.
- **Medidas de posición:** Brindan una medida cuantitativa de donde se encuentra el centro de los datos en un conjunto de muestras. Uno de los principales parámetros de posición es la media, la cual representa un promedio numérico del conjunto de datos analizados y su representación matemática viene dada por la Ecuación (2.2).

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (2.2)$$

Donde  $x_1, x_2 \dots x_n$  son los datos recolectados, y  $n$  representa el número de datos recolectados.

- **Medidas de Variabilidad:** Permiten conocer si los valores de los datos recolectados son cercanos o distantes entre sí. Entre las principales medidas de variabilidad podemos encontrar, el rango, la desviación estándar de la muestra y la varianza.

### 2.7.2. Desviación estándar

La desviación estándar es una medida con la cual se puede analizar la variabilidad o dispersión existente en un conjunto de datos con respecto a su valor medio [43].

La expresión matemática que define a la desviación estándar se basa en el conjunto de datos a analizar, puede ser una desviación estándar muestral, si el conjunto de datos a analizar corresponde a una parte del total de los datos, mientras que la desviación estándar poblacional corresponde al análisis de todos los datos existentes [43].

En el caso de la desviación estándar poblacional, se requiere la existencia de una población de datos finita compuesta por  $N$  valores, de esta forma su expresión algebraica queda definida por la Ecuación [43].

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N} \quad (2.3)$$

## 2.8. Conclusiones

La tecnología **LoRa** puede representar una alternativa confiable para la transmisión de datos de manera inalámbrica, en especial el uso de **LoRaWAN** como protocolo de red, debido a su amplio rango de transmisión, bajo costo y variedad de frecuencias de operación. Estas características, permiten integrar a las **WSN** basadas en este protocolo, en el concepto de **IIoT**, en donde se busca optimizar la producción y acelerar procesos mediante la automatización de los mismos, sin embargo, es necesario el uso adicional de protocolos específicos para la comunicación industrial, es por ello que **OPC** desempeña un papel fundamental en la realización de este trabajo.

Con la selección de su clase UA, **OPC** permite transportar una gran cantidad de datos recolectados de manera eficaz, segura e interoperable. De esta forma el usuario final puede usar dicha información para el beneficio de su entorno laboral.

Para el diseño de la **WSN** se ha tomado en cuenta factores externos como *path loss* y *shadowing*, mismos que podrían implicar un riesgo en la confiabilidad de los resultados afectando de manera directa a parámetros de análisis como **SNR** y **RSSI**.



---

## Estado del arte

En la Sección 3.1 se exponen los principales trabajos de investigación sobre las tecnologías LoRa y LoRaWAN, y su aplicación en soluciones IIoT para el monitoreo de ambientes industriales, mientras que los trabajos sobre el protocolo OPC-UA se enfocan en su integración e implementación para cumplir funciones de integrador de sistemas y dispositivos, entre estos se incluyen las WSN, dichos trabajos se presentan en la sección 3.2.

### 3.1. LoRa y LoRaWAN

En los últimos años, varios trabajos se han referido a las tecnologías usadas para despliegues de IoT, destacando LoRa y LoRaWAN. De estas dos tecnologías, se ha realizado un análisis de su aplicabilidad y desempeño en ambientes con factores adversos (v.g. interferencia, ruido, reflexión), para las transmisiones de radio.

Una de las principales deficiencias de las tecnologías de IoT, es proveer datos en tiempo real. En [5], se describen estrategias para optimizar la capa de acceso MAC, tanto para transmisiones periódicas en tiempo real como para transmisiones ocasionales no periódicas. Para esto, se busca sincronizar la transmisión de los nodos finales con el fin de evitar colisiones. Estas optimizaciones permiten seguir explotando las ventajas de las WSN, como la alta escalabilidad y la reducida infraestructura necesaria para su despliegue.

En [8], se evalúa la capacidad de la tecnología LoRa para comunicaciones de largo alcance, siendo posible lograr máximos de hasta 10 kilómetros con línea de vista.

En [44], se describe un trabajo donde se muestra como las capacidades de largo alcance de LoRa pueden ser aprovechadas en aplicaciones industriales de corto alcance, donde el principal atenuante es la interferencia de equipos de alta potencia y estructuras metálicas. El desempeño de la tecnología LoRa no es equivalente al de sistemas cableados, pero con una tasa de error de paquetes cercana al 2 %, se muestra como una solución para sistemas industriales no críticos.

El despliegue de una red basada en LoRaWAN expuesto en [45], se realizó dentro de las instalaciones de un barco militar. Las condiciones son adversas debido a que la estructura de metal provoca reflexiones de las señales de radio; además, no existe línea de vista para la transmisión de los nodos sensores. La red logró un desempeño aceptable, utilizando un SF con valor de 12, alcanzando un *Packet Error Rate* (PER) inferior al 5 %





en una longitud de 110 m entre compartimientos de la nave. En este estudio, **LoRaWAN** se presenta como una alternativa al despliegue de cable de cobre o fibra óptica, que en el caso de navíos, implica gran complejidad y elevados costos de instalación.

**LoRaWAN** permite que la red sea escalable y facilita la movilidad de los nodos sensores. En [46] se analiza el desempeño de una **WSN** en el interior de una mina; este ambiente requiere un monitoreo continuo debido a que sufre cambios constantes en su estructura, variaciones en niveles de gases, humedad y temperatura. El monitoreo se realiza tanto de la maquinaria como de las condiciones ambientales a las que se expone el personal. En este trabajo se reduce el retardo y la latencia en la transmisión de paquetes, priorizando los diferentes tipos de tráfico, lo cual mejora el desempeño de la red en caso de transmisiones de emergencia, que requieren el menor número de retransmisiones cuando se pierden paquetes o existen errores en los paquetes.

En [47] y [48], se presentan trabajos que enfocan su análisis en métricas como **RSSI**, **SNR** y **PER** dentro de ambientes industriales. Observamos además, el uso de un SF de 7, mismo que se utilizó en este trabajo. Para [48], se considera aceptable mantener un promedio de 20 dBm por encima del límite de sensibilidad (-120 dBm), de los equipos, la cual incluso mantuvo en cero la cantidad de paquetes perdidos. Los niveles de **SNR** difieren en ambos trabajos, en el caso de [48], los valores de esta métrica se mantienen superiores a 5 dB, con equipos capaces de operar con normalidad hasta con valores de -20 dB. En el trabajo de [47], con valores promedio de **RSSI** de -101 dBm y **SNR** de 4.7 dB, la pérdida de paquetes se mantienen en valores inferiores al %1. Debido a la particularidad de cada escenario industrial, cada despliegue puede estar sujeto a diferentes límites en cuanto a métricas de la calidad del enlace.

Las capacidades de la tecnología **LoRa** para comunicaciones de largo alcance, se han analizado profundamente en múltiples trabajos, logrando distancias superiores a la 10 km en línea de vista. Para esto, las redes basan su arquitectura en una estructura de estrella, empleando el protocolo **LoRaWAN**. Por otro lado, [49] analiza que este tipo de estructura de red es dependiente de la línea de vista entre dispositivos, no siendo esto posible en el medio estudiado. El trabajo se enfoca en la detonación de explosivos dentro de minas, empleando tecnología **LoRa** para la transmisión en una red multi-salto, capaz de superar obstáculos en ambientes irregulares.

### 3.2. OPC

Debido al desarrollo en la última década del protocolo **OPC-UA**, una gran cantidad de trabajos han orientado su investigación a la aplicación de este estándar industrial, enfocándose principalmente en la comunicación **M2M** o *Machine to PC*. Sin embargo, otros trabajos orientan su análisis al rendimiento de este protocolo en diferentes ambientes, así como también en diferentes aplicaciones, ya sean industriales, agropecuarias o médicas.

En el trabajo de [50], se propone la creación de un sistema de bajo costo, cuyo propósito es el intercambio de datos entre equipos a nivel de planta, con niveles de control, haciendo uso de **OPC-UA**. Este sistema busca integrar una arquitectura física de equipos de bajo costo, con una arquitectura de software basada en la comunicación cliente-servidor, proporcionada por un software denominado *4DIAC-IDE*, dicho programa permite configurar el servidor, mediante un archivo de extensión *eXtensible Markup Language (XML)*, permitiendo de esta manera los servicios de lectura y escritura síncrona entre dichos elementos, logrando así, una infraestructura eficiente que permite la comunicación **M2M**.

El uso de este protocolo, permite el intercambio de datos entre equipos de planta e interfaces de usuario, facilitando el monitoreo y control de sistemas industriales, que pueden parecer complejos. En [51] se presenta una nueva estrategia para el acceso de clientes a servidores **OPC-UA**. En esta estrategia se diseña un *Wrapper*, que consta de 2 componentes principales, un servidor y un cliente. Estos se comunican entre sí, vía memoria



compartida y un semáforo; de manera que el cliente pueda suscribirse, escribir o leer los datos del servidor de manera síncrona. Sin embargo, este diseño puede presentar problemas de retardo, latencia y *throughput*. Por otro lado, [51, 52] han creado una aplicación basada en OPC, para el monitoreo de carbono en ambientes industriales, donde la comunicación se da mediante un enlace entre módulos Zigbee, de manera que los datos recolectados puedan ser transferidos a un servidor OPC. Este servidor a su vez, transmite los datos recolectados a una aplicación *Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)*, haciendo uso de OPC-UA. Esta aplicación permite la transferencia de gran cantidad de datos en tiempo real con un reducido porcentaje de pérdidas, facilitando el análisis de la emisión de gases contaminantes en ambientes industriales.

En varias ocasiones, la industria tiene como uno de sus principales objetivos, la reducción de recursos informáticos, en especial los recursos que hacen referencia a hardware. Es por ello que en los últimos años, una gran cantidad de empresas optan por contratar servicios que proporcionen el uso de *Cloud Servers* (Servidores en la Nube). En [53] se realiza un análisis comparativo entre OPC-UA y MQTT. Este análisis trata sobre el intercambio de datos entre plantas industriales y servidores en la nube, considerando el retardo como uno de sus principales puntos de revisión. La comparación se realiza en base a factores como: la longitud del mensaje, la región desde donde se envía el mensaje y la participación de múltiples clientes, tanto para OPC-UA como para MQTT. Teniendo en cuenta los parámetros mencionados, los protocolos estudiados presentan tanto ventajas como desventajas. Como resultado del trabajo se sugiere el uso de MQTT, si se requiere un menor retardo; por el contrario, se sugiere el uso de OPC-UA, si el retardo no es de gran importancia en las aplicaciones que se estén desarrollando o se requiere del manejo de eventos y alarmas. Lo cual hace que OPC-UA sea el protocolo más adecuado para el manejo de datos dentro de la industria.

El protocolo analizado en esta sección, es usado mayormente en el ámbito industrial; sin embargo, existen diversas aplicaciones en las que OPC-UA puede ser de gran utilidad. Este es el caso presentado en [54], cuyo objetivo es crear un controlador de tareas para maquinaria agrícola, haciendo uso de este protocolo. Para ello, el autor ha creado un modelo de información similar a [55], y para realizar pruebas, ha implementado un servidor OPC-UA, el cual recibirá las ordenes dadas por este controlador. Se evaluó la duración en el intercambio de datos, de acuerdo a la longitud de los mismos, el rendimiento al escribir los datos en el servidor, y el rendimiento al realizar una llamada al servidor creado. En términos generales, el autor busca mostrar como la cantidad de datos intercambiados, afecta el tiempo que toma realizar esta acción, mostrando valores entre 50 y 60 ms de retardo. Cabe recalcar que la comunicación realizada, entre el controlador y el servidor se efectuó entre dos diferentes computadoras conectadas por un cable Ethernet. Al finalizar dicho trabajo, se concluyó que la cantidad de datos enviados al servidor, influye en la variación del tiempo de respuesta del mismo; sin embargo, el modelo basado en OPC-UA es viable para este tipo de aplicaciones.

Otro de los ámbitos en donde se ha incluido OPC-UA, es en el campo de la medicina. Los autores de [56], realizaron un análisis de este protocolo en aplicaciones para el cuidado de la salud; el análisis es de tipo comparativo en relación con otros métodos usados en el ámbito de la salud, como *IPv6 over Low -Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN)* o ZigBee. A diferencia de estos últimos, OPC-UA tiene la ventaja de usar dispositivos Bluetooth *Bluetooth Low Energy (BLE)*, por lo que se ha creado una arquitectura basada en estos dispositivos, donde la disposición consiste en separarla en 2 secciones: la primera es una red local, ubicada en la casa de un paciente, donde las WSN y los equipos médicos están conectados a un *gateway*; mientras que la segunda sección, se trata de una red central, donde los datos recolectados son expuestos para el control por parte del médico tratante. Al concluir la revisión de este trabajo, sus autores sugieren el uso de OPC-UA por encima de otras tecnologías mencionadas anteriormente, debido a que incorpora a las aplicaciones de salud al concepto de Industria 4.0; además, OPC-UA presenta servicios como: seguridad a nivel de aplicación e infraestructura, y



control de eventos y alarmas. Estas cualidades representan una gran ventaja para cuidados médicos a personas residentes en ambientes de vida asistida.

### 3.3. Conclusiones

En los últimos años, los trabajos relacionados con la tecnología **LoRa** y **LoRaWAN** han extendido su aplicación que tradicionalmente se enfocaba a soluciones para consumidores, y que en la actualidad presenta sistemas compatibles con los requerimientos del campo industrial, donde las soluciones se dirigen a la comunicación entre equipos y sistemas.

La tecnología de capa física **LoRa**, ofrece una serie de ventajas en comparación con tecnologías inalámbricas tradicionales. En especial destacan características como el largo alcance y el consumo reducido de energía. Dentro del campo industrial, se convierte en una opción para el monitoreo, por su fácil despliegue con dispositivos de bajo costo, y que no requieren una infraestructura previa. En su mayoría, los trabajos analizados en esta sección, se enfocan en frecuencias de 868 MHz y 915 MHz, debido a que son las frecuencias habilitadas en países de Europa y en los Estados Unidos, donde se ha concentrado la investigación de estas tecnologías. Debido a esto, en la banda de 433 MHz se necesitan una mayor cantidad de estudios, considerando las ventajas de trabajar en frecuencias más bajas.

Es importante destacar la robustez de **LoRa** en ambientes hostiles, perfilándola como opción viable en la aplicación de alarmas y alertas, que aporten a la reducción de riesgos laborales y mejora en producción y rentabilidad. A pesar de sus múltiples ventajas, **LoRa** y otras tecnologías inalámbricas, no presentan condiciones para ser un reemplazo de sistemas cableados, por lo que en la actualidad, su aplicación se restringe al monitoreo y reporte de eventos no críticos.

Varios trabajos enfocados en la capa **MAC** realizan modificaciones y optimizaciones al protocolo **LoRaWAN**. Esto se hace con el fin de mejorar factores como: retransmisiones y latencia. Además, se agregan funciones de comunicación multisalto, la cual no está disponible por defecto en las versiones de **LoRaWAN** publicadas por *The LoRa Alliance*.

Los trabajos revisados, consideran parámetros como **RSSI**, **PER** y **SNR**, obteniendo niveles aceptables para diferentes extensiones y ambientes. Un aspecto que todavía requiere análisis en trabajos de investigación, es la evaluación de la escalabilidad de la arquitectura **LoRaWAN**. Estas características facilitan un escenario donde los despliegues masivos de nodos y *gateways*, son propensos a problemas de estabilidad, a causa de la interferencia y pérdida de paquetes.

El uso de la tecnología **OPC-UA** facilita en la industria, la comunicación entre equipos encargados de capturar información con sistemas de control, permitiendo la compatibilidad con sistemas **SCADA**. Esto agiliza el análisis de los datos recolectados, logrando que las empresas corrijan a tiempo errores en producción. **OPC-UA** genera un mayor retardo, latencia y *throughput*, sin embargo, no impide su despliegue, gracias a que mantiene su rendimiento en ambientes industriales.

Una de las ventajas de **OPC-UA**, es su diseño de arquitectura cliente-servidor. Este permite reducir la carga computacional operando con servidores desde la nube; sin embargo, el retardo se convierte en un factor a considerar, puesto que depende de parámetros externos como ubicación y longitud de mensaje. Gracias a su sencillez, este protocolo puede ser utilizado no solo en el ámbito industrial, sino también, ser una alternativa eficaz para el transporte de datos en el área agrícola y varios campos de la medicina. Puesto que en la actualidad, estas industrias buscan automatizar los procesos de captura de datos.



---

## Metodología

En este capítulo se presenta las características técnicas de los dispositivos empleados en la red [LoRaWAN](#), tanto en la capa física como en la de enlace de datos [MAC](#), se describe la configuración y disposición física de cada equipo. Además, se detallan los ambientes industriales elegidos para las pruebas, junto con los métodos y condiciones de las diferentes campañas de mediciones realizadas. Finalmente, se realiza un análisis estadístico para evaluar la operatividad y desempeño de la red en el ambiente propuesto.

### 4.1. Descripción de equipos

En esta sección se describe las tarjetas de desarrollo Arduino NANO y Heltec WiFi LoRa 32. Este último es empleado tanto en el nodo sensor como en el *gateway*. Se describe además, el miniordenador Raspberry Pi 3, configurado para cumplir funciones de servidor y administrador de la red [LoRaWAN](#).

#### 4.1.1. Heltec WiFi LoRa 32

El equipo Heltec WiFi LoRa 32 (ver Figura 4.1) es un dispositivo orientado a [IoT](#), diseñado y producido por *Heltec Automation*. La tarjeta de desarrollo basa su funcionamiento en el microcontrolador ESP32, y se vale del chip integrado SX1278, para las funciones de comunicación [LoRa](#), estos dos dispositivos interactúan por medio de una interfaz [Serial Peripheral Interface \(SPI\)](#) [57].

Este dispositivo está diseñado para operar como nodo; sin embargo, puede configurarse como un *gateway* para una red [LoRaWAN](#). El dispositivo se comunica con el servidor utilizando el protocolo [Transmission Control Protocol/Internet Protocol \(TCP/IP\)](#). La limitación más importante de la tarjeta Heltec es que no transmite mensajes hacia los sensores (mensajes *downlink*).

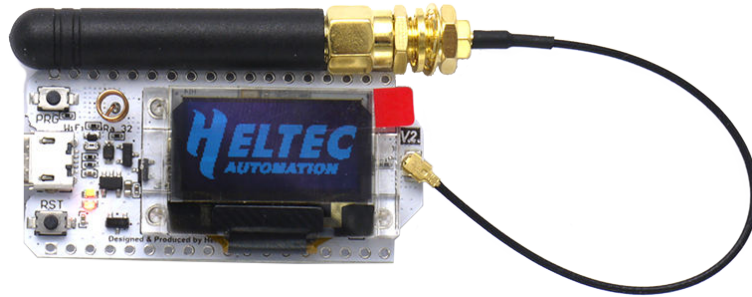


Figura 4.1: Tarjeta Heltec WiFi LoRa 32 (V2) [57]

### 4.1.2. Raspberry Pi 3 modelo B

La Raspberry Pi (ver Figura 4.2) es una computadora de reducidas dimensiones, originalmente diseñada con fines educativos por la fundación Raspberry Pi. Puede soportar una variedad de distribuciones Linux, además del sistema operativo windows. La arquitectura del procesador del Raspberry Pi es *Advanced RISC Machines (ARM)*. El ordenador cuenta con periféricos que incluyen pines *General Purpose Input/Output (GPIO)*, los cuales permiten la comunicación y control de dispositivos externos [58].

En este trabajo se utilizó la Raspberry Pi 3 modelo B, como administrador de la red *LoRaWAN* y servidor web. El servidor web permite establecer una conexión con aplicaciones e interfaces gráficas con el objetivo de presentar los datos recolectados de una forma amigable al usuario.

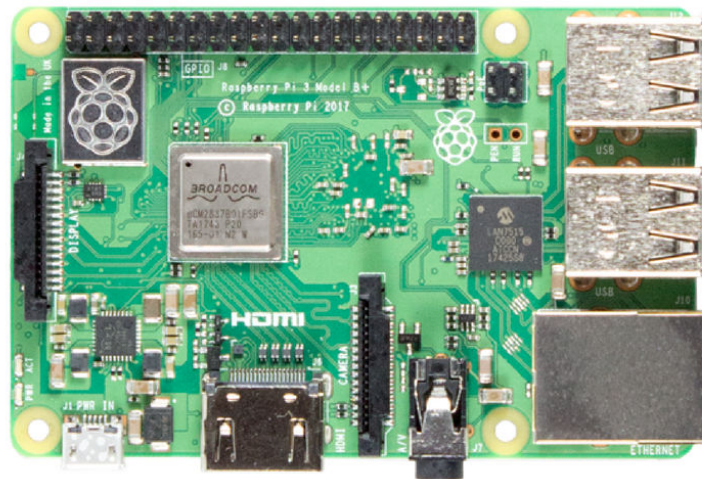


Figura 4.2: Raspberry Pi 3 modelo B [58]

### 4.1.3. Arduino NANO

La tarjeta de desarrollo Arduino NANO (ver Figura 4.3), basa su funcionamiento en el microcontrolador de 8 bits, ATmega328. Este microcontrolador cuenta con varias entradas y salidas de tipo analógicas y digitales, a más de puertos de comunicación serial: *Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART)*, *Inter-Integrated Circuit (I2C)* y *SPI* [59]. Su bajo costo y reducido tamaño, lo hacen una opción para su uso en nodos de *WSN*.

En este trabajo el dispositivo descrito se utilizó para la comunicación serial *I2C* entre el *Programmable Logic Controller (PLC)* encargado de recopilar información y el nodo sensor.

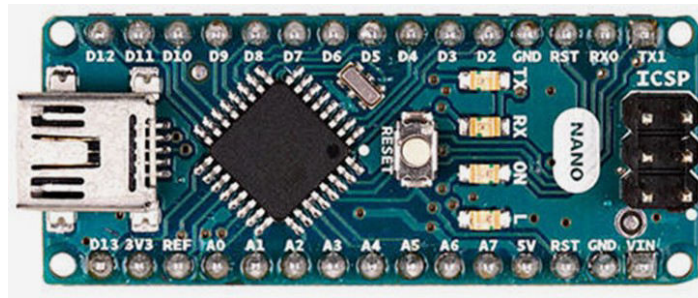


Figura 4.3: Arduino NANO V2.3 [58]

#### 4.1.4. Disposición de equipos

En la Figura 4.4 se muestra la disposición de los equipos en la red *LoRaWAN*. El nodo sensor está compuesto por un microcontrolador ESP32, encargado de recopilar mediciones del ambiente, empleando una tarjeta Arduino NANO. Las mediciones recopiladas son transmitidas a través de un puerto serial hacia el módulo Heltec WiFi LoRa 32. Una vez que las mediciones se han recibido por el módulo Heltec, estas son transmitidas empleando la tecnología *LoRa*. Los datos recibidos por el *gateway* (receptor), se transmiten hacia el servidor por medio de la red *WiFi*. Este último, se encuentra montado sobre un Raspberry Pi, de manera que cumpla con funciones de administrador de la red *LoRaWAN* y como servidor web para la interfaz de usuario y cliente *OPC-UA*.

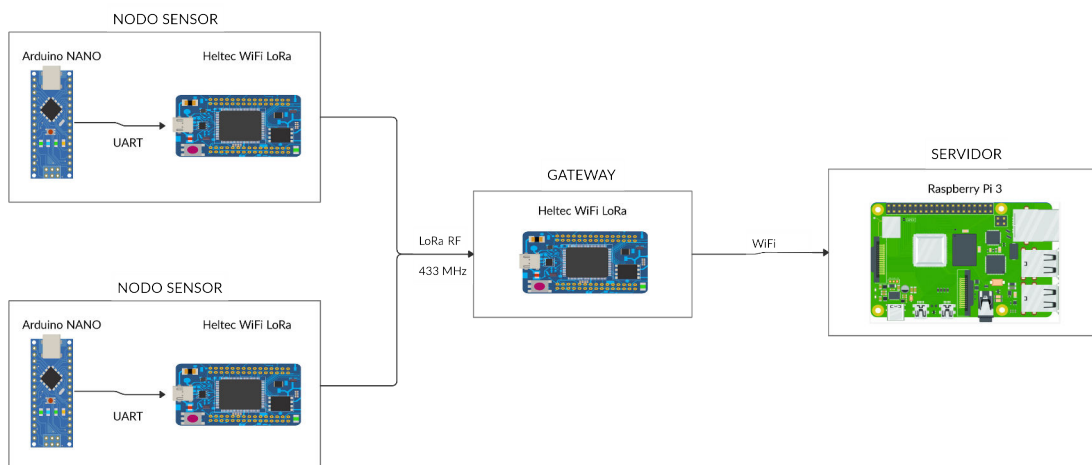


Figura 4.4: Disposición de equipos en la red *LoRaWAN*

## 4.2. Configuración de los dispositivos

La configuración de los equipos utilizados en este trabajo se basa en las directrices de *The LoRa Alliance* [60], para la topología de una red *LoRaWAN*. En la capa física se utiliza una frecuencia de 433.175 MHz dentro de la banda EU433, empleando el chip SX1278 de SEMTECH, tanto para el transmisor como para el receptor. El servidor se montó sobre un ordenador Raspberry Pi para la administración y monitoreo de la red.

### 4.2.1. Configuración del nodo sensor

Los datos a transmitirse desde el nodo sensor son recompilados por medio de una tarjeta Arduino NANO, conectada como periférico por medio de un puerto serial al módulo Heltec WiFi LoRa 32 (ver Figura 4.5). La tarjeta Arduino permite la interacción con equipos que cuenten con puertos seriales **UART**, **I2C** o **SPI**. La información de sensores y periféricos está cifrada usando el método Cayenne LPP [61]. Esto reduce el tamaño de los mensajes (*payload*), permitiendo enviar varias mediciones por mensaje.

El microprocesador ESP32 de la tarjeta Heltec, maneja el chip SX1278 (**LoRa**) y sus parámetros de transmisión (frecuencia, potencia, **SF**), así como las claves de seguridad de la red. La programación de las tarjetas Arduino y Heltec se muestra a detalle en el Anexo A.1.2.

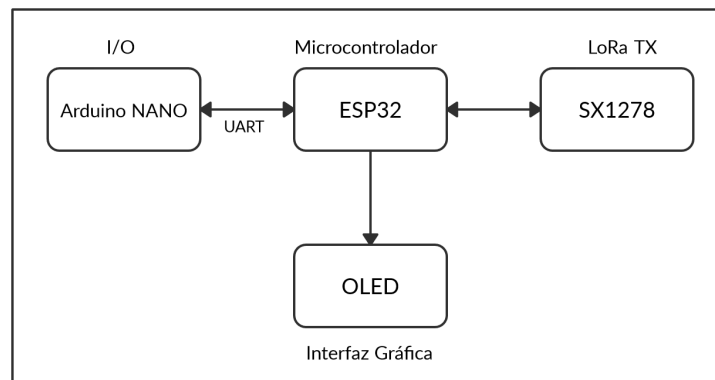
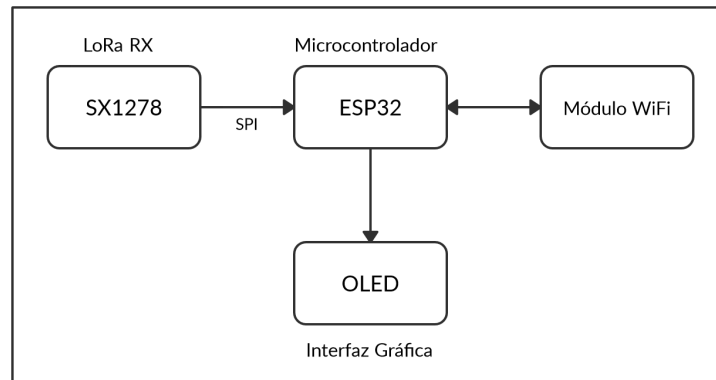


Figura 4.5: Diagrama de la estructura del nodo sensor

Para el nodo sensor, se diseñó una carcasa y un *Printed Circuit Board (PCB)* (ver Anexo A.1.1.2). El nodo incluye las tarjetas Arduino y Heltec, junto con un regulador de voltaje para la alimentación.

### 4.2.2. Configuración del gateway

El chip SX1278 de la tarjeta Heltec WiFi LoRa 32 se encarga de recibir las transmisiones **LoRa**. Estas son procesadas por el microcontrolador ESP32, el cual las empaqueta y transmite por la red **IP** utilizando el módulo **WiFi** integrado (ver Figura 4.6). La programación se basó en el trabajo de [62], para un *gateway* de canal sencillo (ver Anexo A.2). El *gateway* no es capaz de soportar diferentes tipos de **SF** debido a que el chip SX1278 está elaborado para cumplir funciones únicamente de nodo. Las opciones como salto de frecuencia no son implementables en este *gateway*. El *gateway* es alimentado por medio del puerto *Universal Serial Bus (USB)* disponible en la tarjeta Heltec, misma que cuenta con una carcasa diseñada para su protección ante factores ambientales dentro los escenarios de prueba (ver Anexo A.1.1.1).

Figura 4.6: Diagrama de la estructura del *gateway*

### 4.2.3. Configuración del servidor

El servidor [LoRaWAN](#) cumple funciones de configuración y administración de la red. El servidor se montó sobre un Raspberry Pi 3 modelo B. Además, se configuró un servidor [MQTT](#) para la comunicación con aplicaciones externas, y un servidor *web* para la interfaz de usuario. Las funciones de cliente [OPC-UA](#) permiten a la [WSN](#) integrarse a sistemas que utilizan este protocolo industrial. En la Figura 4.7 se presenta un diagrama con los diferentes servidores y sistemas instalados en el Raspberry Pi.

Para el envío de datos entre el servidor y el *gateway*, se estableció una comunicación mediante la red [WiFi](#). Posteriormente los datos recolectados por el servidor, son procesados y almacenados en una base de datos con formato CSV. La instalación y configuración de los servidores se detalla en el Anexo [A.3](#).

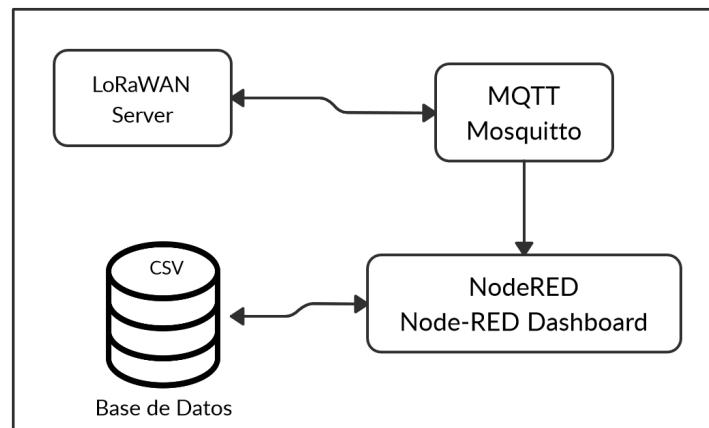


Figura 4.7: Diagrama de la estructura del servidor

## 4.3. Descripción del ambiente

El aporte de este trabajo se centra en evaluar el comportamiento y la aplicabilidad de la tecnología [LoRa](#) en ambientes industriales. Para esto, se eligieron dos instalaciones de la localidad que cuentan con diferentes



tipos de maquinaria y procesos de producción. Las mediciones se desarrollaron manteniendo una línea de vista entre nodo sensor y *gateway*. Además, se realizaron pruebas en dos ambientes libres de obstáculos y fuentes de interferencia directa, esto para contrastar los resultados.

### 4.3.1. Ambiente industrial 1

La nave principal del ambiente industrial 1 cuenta con una altura aproximada de 20 m, una longitud superior a los 150 m y se compone de dos niveles. En la planta baja se ubican en su mayoría, motores de alta potencia (50-120HP). Además, esta superficie funciona como área de almacenamiento y preparación de producto terminado. En la planta alta se tienen dos líneas de producción extendidas a lo largo de la nave. Ambas plantas se encuentran divididas por un pasillo central que comunica los ambientes y permite el acceso a la maquinaria.

Para el primer grupo de pruebas en la planta alta, el *gateway* fue colocado en el extremo sur del pasillo, mostrado en la Figura 4.8, con una altura de 1.5 m con respecto al suelo, mientras que el nodo sensor fue ubicado a diferentes distancias a lo largo del pasillo (Figura 4.8).

En la segunda planta de la nave principal, se colocó el *gateway* en el extremo sur a una altura de 1.5 m con respecto al suelo, y el nodo sensor fue colocado alejándolo una distancia de 90 m con respecto al *gateway*.

En las mediciones en la planta alta y baja, se mantuvo una línea de vista entre el nodo sensor y el *gateway*. En las áreas de medición, se observó un reducido tránsito de personas y maquinaria pesada (montacargas). Es importante mencionar que debido a las restricciones de seguridad, no fue posible realizar mediciones dentro de los límites de las líneas de producción.

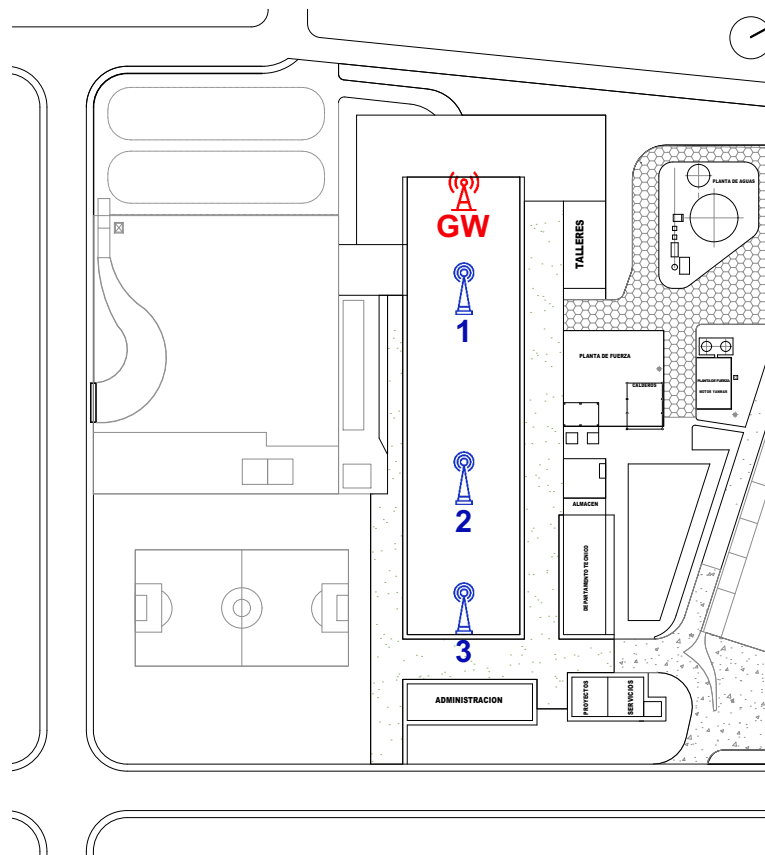


Figura 4.8: Ubicaciones del nodo sensor en ambiente industrial 1

### 4.3.2. Ambiente industrial 2

La fábrica del ambiente industrial 2 se compone de una nave principal dividida en dos alas (Figura 4.9). Cada una de estas cuenta con una longitud superior a 100 m y una altura aproximada de 20 m. La fábrica se compone de varias líneas de producción, en las que en cada etapa del proceso, se cuenta con una maquinaria diferente, teniendo como principales actuadores a motores de alta potencia (50-120HP).

El *gateway* fue ubicado en la segunda planta de las oficinas del área técnica a una altura de cuatro metros con respecto al suelo. Desde este punto se logró mantener una línea de vista hacia las ubicaciones de los nodos sensores.

El primer grupo de pruebas se realizó en el ala norte, colocando el nodo sensor a una altura de 1.5 m sobre el suelo. En esta parte de la fábrica se tiene un tráfico moderado de personal y montacargas ( $\approx 100$  personas/hora), mientras que existe una gran cantidad de maquinaria para producción y empaquetado. El segundo grupo de pruebas se las realizó en el ala sur, ubicando el nodo sensor en el extremo este de la nave, y manteniendo la posición del *gateway* como en las mediciones previas. En esta parte de la fábrica, la maquinaria de producción tiene alturas variables, alcanzando hasta 10 m de altura. En el ala sur, el tránsito de personal y maquinaria es reducido ( $\approx 30$  personas/hora).

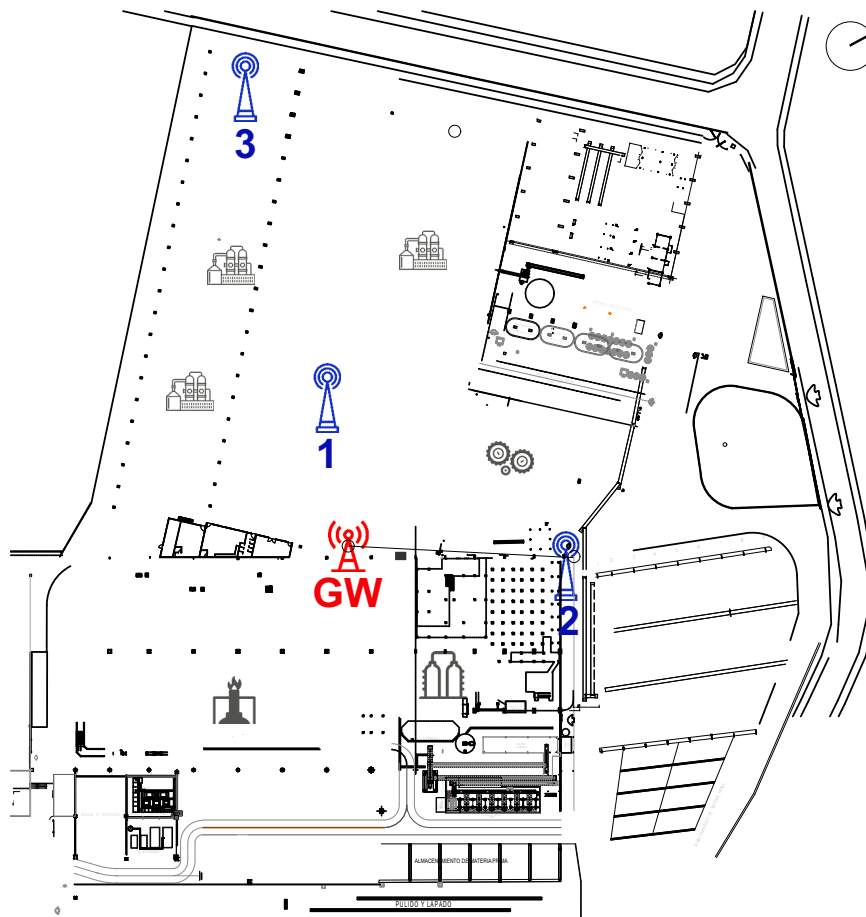


Figura 4.9: Ubicaciones del nodo sensor en ambiente industrial 2

### 4.3.3. Ambiente urbano abierto 1 - Parque El Paraíso

Las pruebas de control se realizaron con el fin de contrastarlas con mediciones en ambientes industriales, y evaluar sus variaciones. Se eligió el área del ambiente urbano 1, indicada en la Figura 4.10. Este ambiente cuenta con una extensión dentro de un parque sin obstáculos y un reducido gradiente, permitiendo mantener una línea de vista desde el nodo sensor hasta el *gateway*.

El *gateway* fue colocado a una altura de tres metros y el nodo sensor se ubicó a diferentes distancias como se muestra en la Figura 4.10. En las cercanías del parque no existen fuentes de interferencias visibles (maquinaria, torres celulares, antenas HF). El tráfico de peatones fue reducido durante el periodo de pruebas.



Figura 4.10: Ubicaciones del nodo sensor en ambiente urbano abierto 1

### 4.3.4. Ambiente urbano abierto 2 - parque Los Alpes

La segunda prueba de control se realizó en otro parque, ubicado en un área urbana al sureste de la ciudad de Cuenca. El parque cuenta con una longitud aproximada de 130 m y un gradiente reducido por lo que permite mantener una línea de vista entre el *gateway* y el nodo sensor.

El *gateway* fue colocado en el extremo sur del parque a una altura de 3 m. El nodo fue colocado a diferentes distancias a una altura de 1.5 m (Figura 4.11). En las cercanías del predio no se presentaron fuentes de interferencia. El tráfico de peatones y vehículos en la zona fue moderado.



Figura 4.11: Ubicaciones del nodo sensor en ambiente urbano abierto 2

## 4.4. Descripción de la metodología de medición

Los procesos de medición, consistieron en el envío de paquetes desde el nodo sensor (transmisor) hacia el *gateway*, manteniendo el *SF* en un valor de 7 y una frecuencia de transmisión constante de 433.175 MHz. El equipo transmisor se colocó a una altura de 1.5 m sobre el nivel del suelo. El *gateway* fue colocado a diferentes alturas para lograr mantener una línea de vista con el nodo sensor, esto dependió de las condiciones de los ambientes, como se indica en la Sección 4.3.

En cada punto de medición, fueron transmitidos 100 paquetes, de los cuales se recolectó y almacenó el *RSSI*, *SNR* y el identificador de cada paquete para determinar el porcentaje de pérdidas. Por las limitaciones de los equipos empleados, no se pudo variar el *SF*, además no se pudo aplicar saltos de frecuencia, debido a que esto no es soportado por el chip del receptor (SX1278) [63]. El transmisor y receptor fueron equipados con una antena de 1 dBi de ganancia y alimentados por medio de baterías conectadas a los puertos micro-*USB*.

Las fábricas donde se realizaron las mediciones para ambientes industriales, limitaron el acceso a las instalaciones debido a estrictas medidas de seguridad, esto redujo la cantidad de mediciones y los puntos a analizar.

### 4.4.1. Intervalos de medición

Los intervalos utilizados en las campañas de medición, se eligieron basándose en la longitud máxima y media de las naves industriales de los ambientes de prueba. Además se consideró el limitado acceso a las instalaciones y las estrictas medidas de seguridad establecidas por las fábricas durante la realización de este trabajo. Considerando esto, se decidió realizar las campañas de medición a tres distancias: 105 m, 75 m, 25 m (Figuras 4.8 y 4.9). Los resultados, de ser satisfactorios, demostrarían una posible aplicabilidad de la tecnología *LoRa* para las naves industriales de mayor dimensión ubicadas en la localidad.

#### 4.4.2. Envío de paquetes

Los equipos utilizados permiten una amplia gama de configuraciones para la transmisión, pero debido a que se utilizó el chip SX1278 como *gateway*, se restringió estas opciones a un solo valor de **SF**, manteniendo un ancho de banda (*Bandwith (BW)*) de 125 KHz, como se indica en la especificación de parámetros regionales [25]. El contenido de los paquetes incluye mediciones de sensores de luminosidad, humedad y temperatura, además de valores aleatorios. Todos estos valores están codificados usando el protocolo Cayenne [61], el cual facilita la transmisión de varias mediciones por paquete.

Con el fin de probar la robustez del sistema, se redujo el tiempo entre transmisiones para enviar cerca de 10 paquetes por minuto desde el nodo sensor, de esta forma se incrementa considerablemente el tráfico dentro de la red. Para la configuración de SF7, se transmitirá cada paquete con un ancho de banda de 125 KHz y una tasa de bits de 5.4 kbps. Al variar el intervalo entre transmisiones se busca aumentar o disminuir la probabilidad de colisiones, y debido a que el sistema diseñado no provee retransmisiones, esto provocará pérdida de paquetes cuando el *gateway* reciba paquetes simultáneos.

#### 4.4.3. Descripción y almacenamiento

Para realizar el proceso de descifrado, se utilizó las herramientas del servidor **LoRaWAN** para el manejo de mensajes **LoRa** y sus claves claves: *AppSKey* y *NwkSKey*. Una vez descifrada la información, aplicamos la decodificación tipo Cayenne para obtener los valores de las diferentes mediciones transmitidas. Una vez descifrados los mensajes, estos son enviados, utilizando el servidor **MQTT**, hacia la aplicación Node-RED, donde se encuentran las configuraciones para la interfaz gráfica y las funciones de cliente **OPC-UA** (Figura 4.12).

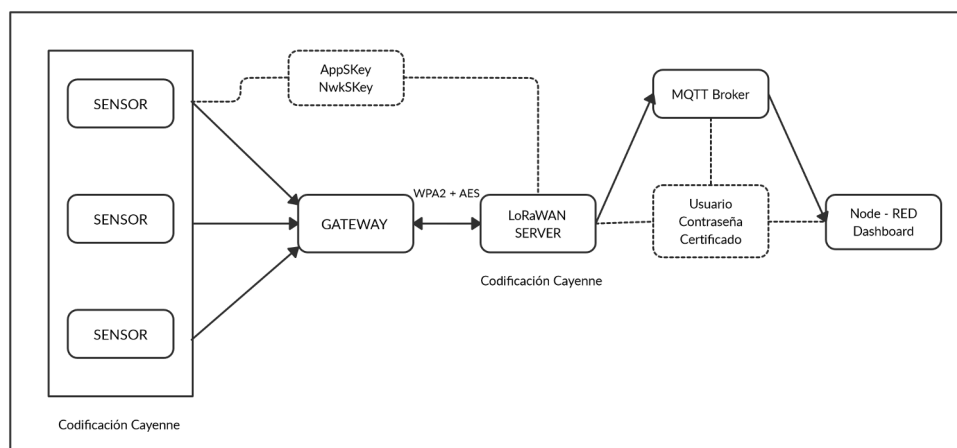


Figura 4.12: Encriptación de mensajes

Los datos clasificados son enviados al servidor **MQTT** para su posterior manejo por la aplicación Node-RED. Esta aplicación se encarga de presentar al usuario los resultados en una interfaz gráfica y almacenarlos en un archivo con extensión *.CSV* (ver Figura 4.13). Se decidió utilizar este formato para el almacenamiento, considerando que la cantidad de datos a recopilar es reducida y no requiere una base de datos relacional SQL.

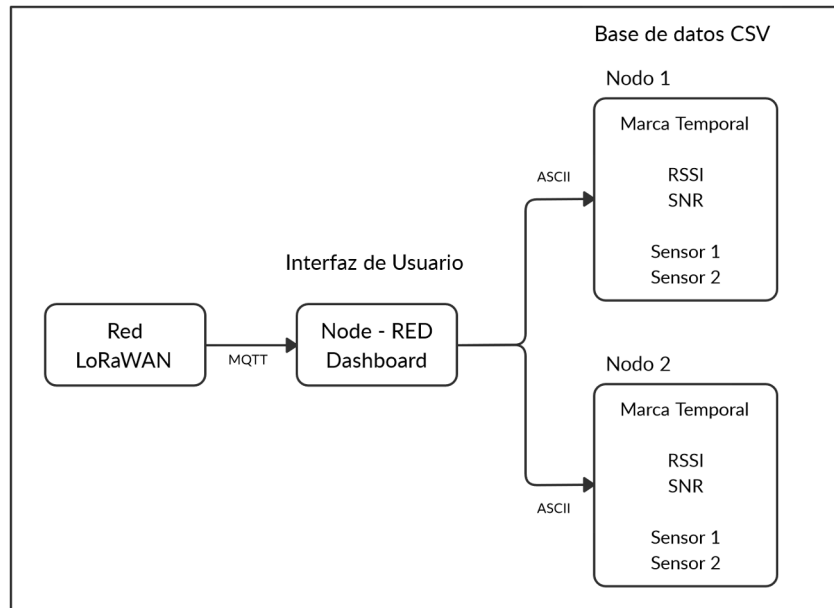


Figura 4.13: Almacenamiento de mensajes

## 4.5. Descripción del procedimiento de adquisición de datos mediante OPC-UA

El PLC fue configurado para recopilar la datos de los tres sensores mencionados en la Sección B.2. Esta información es recibida por el nodo sensor, empleado la tarjeta Arduino NANO, la cual cuenta con la configuración para la comunicación por medio del puerto I2C. Una vez el nodo sensor recopila la información de los tres sensores, se empaqueta utilizando la codificación Cayenne. De esta forma se envían al *gateway* varias mediciones por mensaje y posteriormente al servidor LoRaWAN.

Los mensajes son procesados por el servidor LoRaWAN, para ser presentados en una interfaz gráfica, donde se tienen las opciones de visualizar los últimos valores medidos, así como una gráfica histórica de los valores previos. En la interfaz se presentan valores recopilados por el *gateway* como: RSSI, SNR y la dirección del nodo sensor. Esto permite determinar las condiciones de radio frecuencia en las que esta operando el nodo sensor y el *gateway*. Un proceso similar al descrito se realiza en el servidor OPC-UA diseñado para este trabajo.

El ordenador Raspberry Pi tiene configuradas las funciones de cliente OPC-UA para transmitir las mediciones obtenidas y procesadas por el servidor LoRaWAN. El servidor OPC-UA montado sobre un ordenador, recibe las peticiones desde los clientes por medio de una red WiFi.

Los sensores fueron expuestos a diferentes condiciones. Se observó el funcionamiento de los sensores en función de las condiciones. Además, se determinó el tiempo aproximado que toma a la WSN actualizar los valores medidos en la interfaz de usuario.

## 4.6. Conclusiones

Con la finalidad de reducir costos, y mantener la eficiencia de la red de sensores propuesta, se han seleccionado equipos que cumplan con este propósito. El dispositivo Heltec WiFi LoRa 32, muestra capacidades



para ser configurado como nodo sensor, así también como *gateway* de un solo canal. Por otro lado, el ordenador Raspberry Pi y el sistema operativo basado en Linux con el cual opera, son compatibles para manejar los servidores LoRaWAN Server, Mosquitto y la plataforma Node-RED, esta última encargada de la interfaz gráfica y del cliente OPC-UA. Finalmente, la tarjeta de desarrollo Arduino NANO, permite una configuración para manejar la comunicación serial entre el equipos industriales como el PLC usado en pruebas y el nodo sensor.

Debido a sus capacidad tanto como nodo sensor y como *gateway*, el dispositivo Heltec WiFi LoRa 32 ha mostrado ser una opción confiable para la transmisión de datos en ambientes industriales con dispositivos de bajo costo. Por otro lado, la Raspberry Pi 3, ha mostrado su efectividad administrando la red LoRaWAN y actuando como un servidor *web*. Este dispositivo permite que los datos recolectados por los nodos sean presentados en una interfaz gráfica, permitiendo así el monitoreo de diferentes fuentes de información. Finalmente, la tarjeta de desarrollo Arduino NANO, muestra su utilidad facilitando la comunicación serial entre el equipos industriales como el PLC usado en las pruebas y el nodo sensor.

El dispositivo LoRa presenta una configuración diferente tanto para su uso como nodo sensor, como para *gateway*. En el caso del nodo sensor, es necesario establecer una conexión serial I2C con el dispositivo Arduino NANO, de esta manera se puede obtener los datos recolectados desde equipos industriales para su posterior procesamiento y envío hacia el *gateway*. Este último, presenta una configuración distinta puesto que, no debe interactuar directamente con equipos. Su configuración, permite que los datos recibidos desde el nodo sensor sean empaquetados y transmitidos mediante tecnología WiFi, hacia un servidor *web*. En adición al servidor LoRaWAN, se ha implementado un servidor MQTT, mismo que permite la interacción con aplicaciones externas, para la creación de una interfaz gráfica y agregar funciones de cliente OPC-UA.

Para comprobar la efectividad de las configuraciones mencionadas, se ha elegido ambientes industriales y ambientes urbanos abiertos, en donde se pueda lograr línea de vista para las diferentes pruebas. Los ambientes industriales seleccionados, se encuentran ubicados en el parque industrial de la ciudad de Cuenca. Estas industrias, cuentan con fuentes de interferencia, en su mayoría, motores de alta potencia y líneas de alta tensión, mientras que para las mediciones realizadas en ambientes urbanos abiertos, se ha elegido parques en sectores urbanos, que cuenten con un terreno plano, que al igual que en los ambientes industriales, permitan tener una línea de vista entre el nodo sensor y el *gateway*.

Cada una de las pruebas de envío de paquetes, se realizó a distancias de entre 25 y 105 m y a una frecuencia de transmisión de 433.175 MHz. Se recolectaron de cada uno de los paquetes, valores como RSSI, SNR, además del porcentaje de paquetes que no fueron recibidos por el *gateway*. Cada uno de estos parámetros serán analizados estadísticamente en el Capítulo 5.



---

## Despliegue y resultados

En este capítulo se presentan diseños y configuraciones de los dispositivos y *software* utilizados en el despliegue de la red de pruebas [LoRaWAN](#). Además, se incluyen los resultados y análisis de las campañas de medición, con el fin de sustentar la aplicabilidad de la red en ambientes industriales.

### 5.1. Red de pruebas LoRaWAN

La red de sensores diseñada en este trabajo, se basó en las directrices de *The LoRa Alliance* y *The OPC Foundation*, estas recomendaciones fueron las directrices para la configuración de los dispositivos que integran la arquitectura [LoRaWAN](#), y para las funciones de cliente [OPC-UA](#) agregadas al servidor *web*.

En esta sección se presentan las principales características y configuraciones de los dispositivos: nodo sensor, *gateway* y el servidor montado sobre el ordenador Raspberry Pi 3.

#### 5.1.1. Nodo sensor

El nodo sensor diseñado en este trabajo, es capaz de interactuar con sistemas industriales por medio de sus puertos de comunicación serial, posteriormente, procesa y adecua los datos recolectados para ser transmitidos. En la interacción con sistemas industriales se utilizó una tarjeta de desarrollo Arduino NANO, la que además, cumple funciones de protección, aislando a la tarjeta Heltec, en caso de mal funcionamiento de los dispositivos industriales que se desea monitorear.

El procesador ESP32, ubicado en la tarjeta Heltec WiFi LoRa V2, se encarga de manejar la información recopilada y controlar el módulo [LoRa SX1278](#), encargado de transmitir mensajes usando esta tecnología de largo alcance. En la Figura 5.1, se presenta el dispositivo diseñado, se destaca la adecuación de un ventilador, con el fin de reducir la temperatura dentro de la carcasa, debido a que el nodo sensor transmite a intervalos más cortos de lo que se acostumbra en aplicaciones de [IoT](#) (<a 30s y >a 5 min. ), en donde los dispositivos son alimentados por baterías y el consumo de energía es reducido. El dispositivo también incluye circuitería para la regulación de voltaje de alimentación, el cual se beneficia de la ventilación instalada.



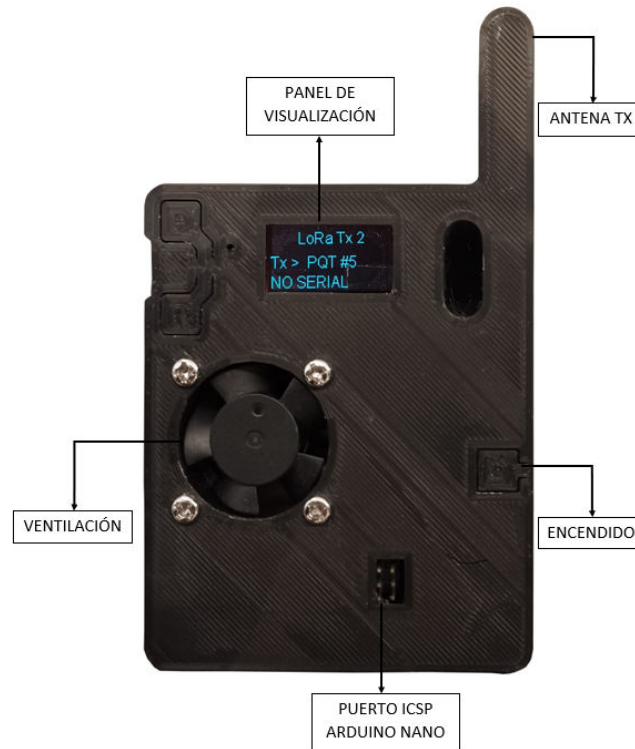


Figura 5.1: Nodo sensor

### 5.1.2. Gateway

El *gateway* diseñado se basa, al igual que el nodo sensor, en la tarjeta Heltec WiFi LoRa V2, permitiendo la comunicación con tecnología **LoRa** para recibir los mensajes de los nodos, mientras que, mediante el módulo **WiFi**, se comunica con el servidor **LoRaWAN**. El chip SX1278, de tecnología **LoRa**, permite la comunicación con los nodos, pero no es posible establecer una comunicación bidireccional.

Al igual que el nodo sensor, el *gateway* fue adecuado con una carcasa, para proteger los componentes sensibles y mantener una posición adecuada de la antena. En la Figura 5.2 se presenta el dispositivo. En la pantalla OLED se muestra información sobre el último mensaje, proveniente de uno de los nodos de la red.

En las pruebas realizadas, el *gateway* fue capaz de soportar los dos nodos disponibles, transmitiendo mensajes a una tasa de bits de 5.47 kbps cada uno, a intervalos de aproximadamente 10 segundos, generando tráfico, con el fin de comprobar el funcionamiento de la red.



Figura 5.2: Gateway

### 5.1.3. Servidor

Los servidores configurados para la red [LoRaWAN](#), fueron montados sobre un ordenador Raspberry Pi 3. El principal servidor es [LoRaWAN Server](#), encargado de administrar y controlar los diferentes dispositivos de la red [LoRaWAN](#). El servidor descripta los mensajes y los comparte con aplicaciones externas.

Dentro del ordenador Raspberry, también se cuenta con un servidor [MQTT](#) Mosquitto, encargado de manejar la comunicación entre los servidores y las aplicaciones externas a la red [LoRaWAN](#). El principal tráfico que maneja el servidor [MQTT](#), proviene de los mensajes descriptados del servidor [LoRaWAN](#) hacia el servidor Node-RED, que se encarga de presentar la información recopilada en una interfaz gráfica y almacenarlas en archivos con formato CSV. Con Node-RED, también se maneja las funciones del cliente [OPC-UA](#), con las que cuenta la red diseñada. En la [Figura 5.3](#) se presenta un diagrama de la configuración de los servidores montados sobre el ordenador Raspberry Pi. En el [anexo A.3](#) se detalla la configuración de cada elemento del servidor de la red.

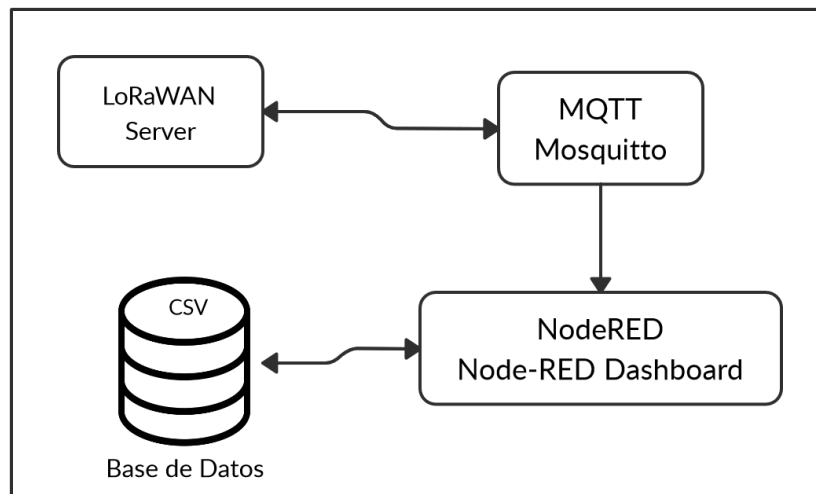


Figura 5.3: Configuración de los servidores

## 5.2. Mediciones de RSSI, SNR y Pérdida de Paquetes

La WSN se evaluó en dos ambientes industriales con diferentes instalaciones y distribución de equipos (Secciones 4.3.1,4.3.2). Así también, se realizó pruebas en dos ambientes urbanos abiertos (Secciones 4.3.3,4.3.4), en los que no existen obstáculos ni fuentes de interferencia cercanas.

Los resultados de SNR (Figura 5.4) y RSSI (Figura 5.5) recopilados por el servidor LoRaWAN, muestran niveles similares para los dos ambientes industriales, esto a pesar de las diferencias en maquinaria y la disposición de su infraestructura. Los valores de SNR y RSSI son similares a los medidos por [64] en ambientes urbanos y por [65] en ambientes forestales. En estos casos, los niveles para una distancia aproximada de 100 m bordean un valor de SNR cercano a 10 dB y el RSSI en niveles cercanos a -80 dBm. Es necesario resaltar que la potencia de transmisión utilizada para el envío de paquetes en este trabajo fue de 14 dB, con una sensibilidad de -110 dbm.

Los valores de SNR y RSSI, permitieron un enlace estable en el que el porcentaje de pérdidas de paquetes se mantuvo por debajo del 6 % para todos los casos (Figura 5.6).

En las mediciones para los escenarios de control, se utilizaron parámetros iguales en la configuración, tanto en el nodo sensor, como en el gateway. Los valores de SNR obtenidos en estas mediciones, muestran niveles de ruido superiores a los obtenidos en ambientes industriales (Figura 5.4). Las mediciones de RSSI indican una mayor atenuación en todas las distancias analizadas, esto en comparación con los valores obtenidos dentro de las fábricas. A pesar de las condiciones obtenidas en los ambientes de control, fue posible establecer un enlace con pérdidas de paquetes inferiores al 8 %, en la mayoría de los casos.

Se observa en la figura 5.6, que para mediciones en la distancia de 105 m, el porcentaje de pérdida de paquetes disminuye, una mejora también se observa en la figura 5.8. La variación anormal en estos resultados se debe a la aleatoriedad del canal, donde pueden presentarse interferencias que alteren las métricas de la calidad del enlace. Las mediciones realizadas en ambientes industriales son vulnerables a estas condiciones, debido a la reducida cantidad de datos recopilados en los ambientes industriales.

Los niveles de SNR medidos en los ambientes industriales y de control, indican un posible solapamiento de la señal debido a la propagación multi-camino [66, 67]. En los ambientes industriales este solapamiento parece impactar de forma constructiva en la señal recibida, debido a las dimensiones y materiales de las naves

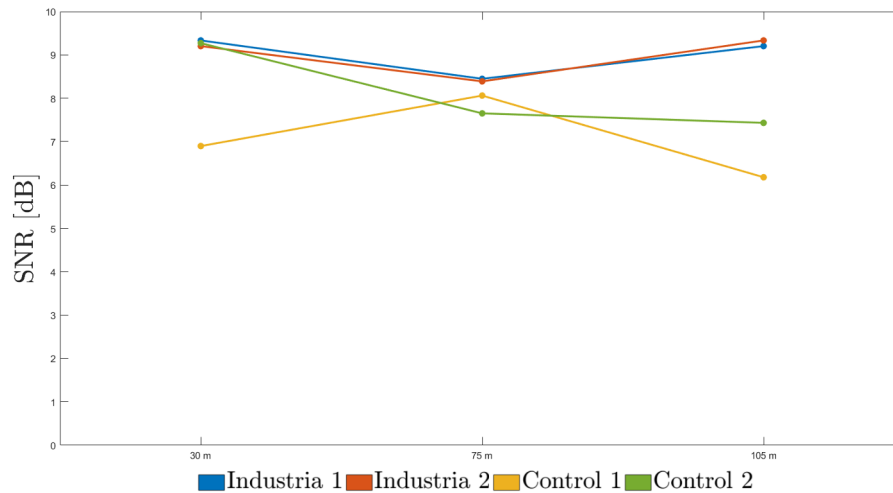


Figura 5.4: Resultados de SNR para los ambientes industriales y de control

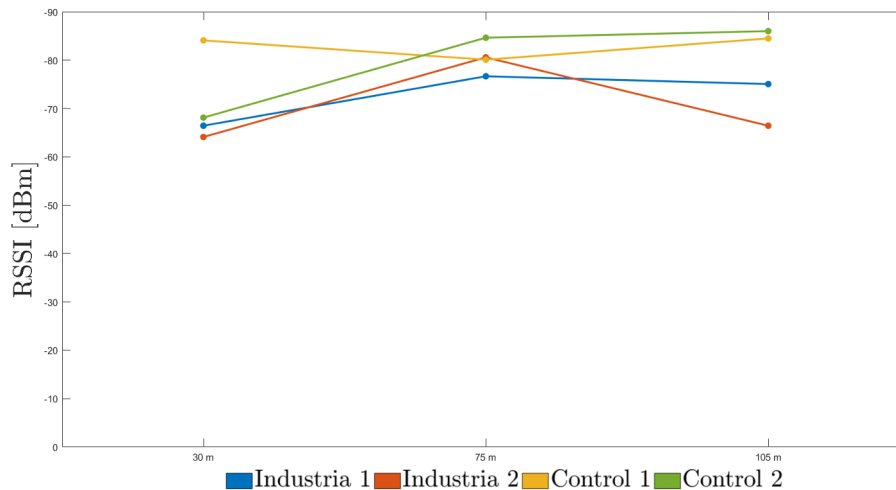


Figura 5.5: Resultados del RSSI para los ambientes industriales y de control

industriales donde se realizaron las pruebas. En el caso de los escenarios de control, se observa un solapamiento de la señal con efectos de cancelación, provocando los bajos niveles de **SNR** medidos.

El parque elegido como segundo escenario de control, mostró mejores niveles de **SNR** y **RSSI**, en contraste con el primer escenario de control. El segundo parque contaba con una menor área despejada, al estar rodeado por una zona urbana residencial. Estas condiciones aparentemente, afectaron de menor manera el desfase y retardo de la señal. Por las limitaciones de los equipos empleados, se utilizó solo un **SF** de 7. Según [67] esta configuración permite una gran sensibilidad a los efectos de la propagación multi-camino en un canal Rayleigh [68].

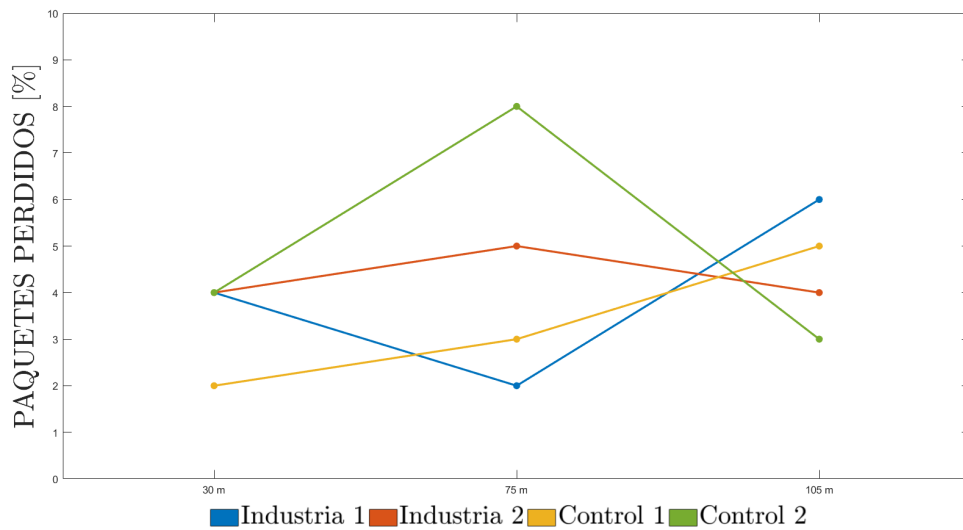


Figura 5.6: Resultados de la Tasa de Pérdidas de Paquetes

### 5.3. Análisis y comparación estadística

En base a los conceptos presentados en la sección 2.7.1, se realizó un análisis de los resultados obtenidos en las campañas de medición, en cada uno de los ambientes descritos en la sección 4.3, esto con la finalidad de evaluar el comportamiento de la red de sensores propuesta en este trabajo. Cabe resaltar que, para cada ambiente en el que se realizaron las campañas de medición, se realizaron 3 experimentos, uno por cada distancia entre nodo sensor y *gateway*.

#### 5.3.1. Análisis estadístico

Para poder presentar un resumen de los valores correspondientes a los parámetros más importantes, es necesario el cálculo de la media de los valores a analizar. Para ello, se consideró el número de paquetes enviados en cada medición (100 paquetes), además del valor del parámetro a analizar en cada paquete, dicho valor se ha obtenido de archivos de extensión *Comma Separated Values (CSV)* generados como un reporte por parte del *gateway*. Para los parámetros *SNR* y *RSSI* se ha hecho uso de la Ecuación 2.2 para el cálculo del valor medio de dichos parámetros, a distancias de 30, 75 y 105 metros.

La Figura 5.7 muestra los valores promedios de *SNR* con sus respectivas barras de error, que representan la desviación estándar, mientras que la Figura 5.8 presenta valores medios de *RSSI*, incluidas barras de error para la identificación de la desviación estándar de dicho parámetro. Estos datos fueron obtenidos a partir de las campañas de medición realizadas en cada uno de los ambientes mencionados en la Sección 4.3.

#### 5.3.2. Comparación estadística entre ambientes

En base a los resultados expuestos en las Figuras 5.7 y 5.8, podemos analizar el valor medio, tanto para *SNR* como para *RSSI*. Estos valores bordean los 9 dB para *SNR* en ambientes industriales y entre 6 y 7 dB para ambientes abiertos, mientras que para el parámetro *RSSI*, se han obtenido valores entre -64.11 dBm y -80.59 dBm en ambientes industriales y para ambientes abiertos en su mayoría, los valores de *RSSI* se encuentran en el rango de -80 dBm. Estos valores resultan contra intuitivos a los valores esperados, puesto que la red de

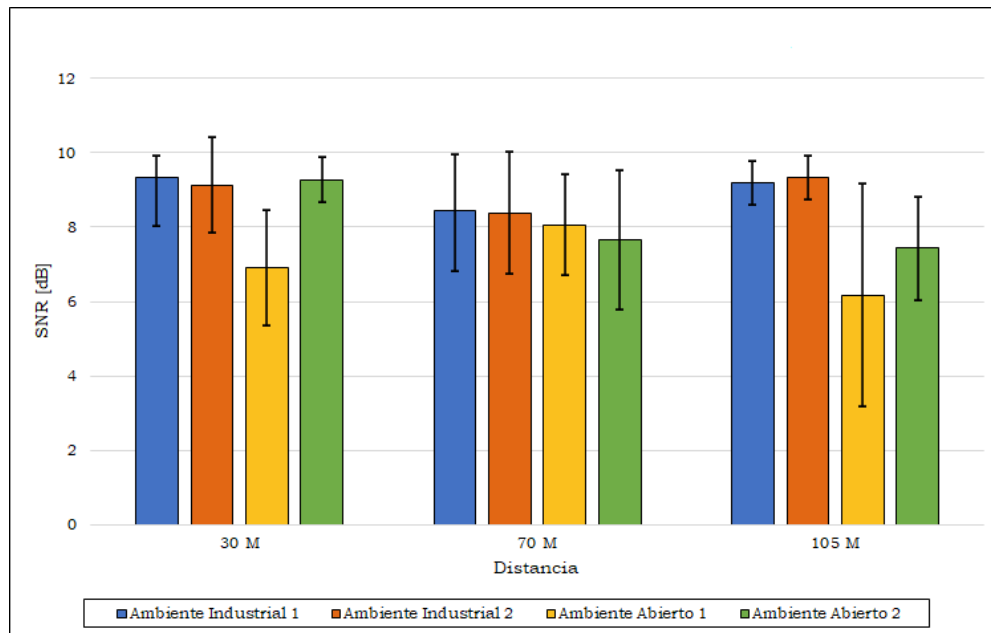


Figura 5.7: Desviación estándar para SNR

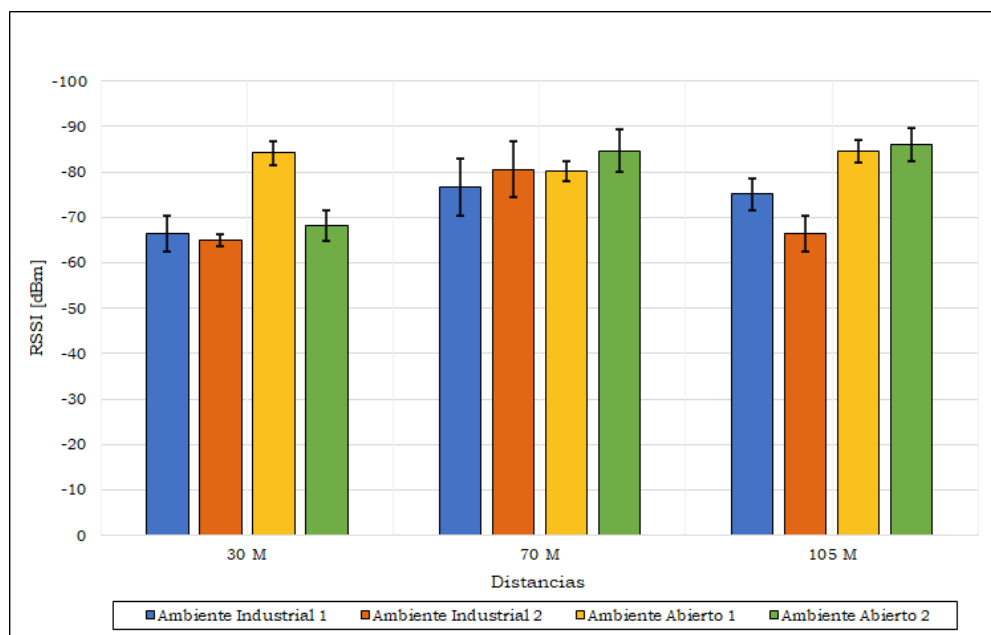


Figura 5.8: Desviación estándar para RSSI

sensores propuesta presenta mejores condiciones para su aplicabilidad en el entorno industrial, en donde a pesar de las fuentes de interferencia existente, los parámetros analizados muestran mejores resultados. En caso de existir mediciones que difieran en gran cantidad a los valores de la media, es recomendable realizar una mayor cantidad de mediciones, las que no fueron posibles en este trabajo debido a las restricciones impuestas por las industrias debido a la pandemia por COVID-19, limitando el acceso a un día y a un intervalo de tiempo determinado.

En cuanto a los resultados correspondientes a los ambientes abiertos, como se mencionó, presentan peores condiciones en relación a los resultados expuestos en el entorno industrial. A pesar de no existir fuentes de



interferencia en este tipo de ambientes, la propagación multicamino puede afectar la recepción de paquetes por el *gateway*. Estos resultados inferen que la red sensores propuesta, podría funcionar de mejor manera en ambientes industriales debido a la estructura metálica presente, sin embargo es necesario analizar la dispersión presente en cada una de las mediciones realizadas.

Para el análisis de dispersión y la variabilidad de los datos recolectados, se calculó la desviación estándar para cada una de las series de datos recolectados en función del ambiente, parámetros y distancia a la que se realizó la medición. La representación gráfica de los datos obtenidos del **SNR** se muestra en la Figura 5.7 y del **RSSI** en 5.8. Es necesario resaltar que cuanto mayor sea el valor de la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos.

Al analizar el entorno industrial, gran parte de los valores, tanto para **SNR** como para **RSSI**, no muestran mayor variabilidad debido a que la desviación estándar presenta valores bajos, lo que indica que gran parte de los datos recolectados son cercanos a la media de estos parámetros. Así mismo, existen paquetes que presentan aún mejores condiciones en relación al valor medio, sin embargo, un mínimo porcentaje de paquetes presentarán peores condiciones, lo cual no altera significativamente el valor medio.

Luego de analizar cada uno de los datos existentes, en ambas gráficas de los ambientes industriales, se puede evidenciar que no existe una variación importante en los datos recolectados, por lo que el enlace podría presentar estabilidad en este tipo de entornos. En cuanto a los parámetros analizados en ambientes abiertos, se observan variaciones considerables en los datos recolectados, puesto que la desviación estándar es mayor a la presentada en ambientes industriales, esto podría presentar complicaciones en la estabilidad del funcionamiento de la red propuesta en lugares abiertos.

Al comparar ambos entornos, el entorno industrial presenta mejores condiciones en los parámetros **SNR** y **RSSI**. Si bien a distancias cortas la red de sensores propuesta funciona sin complicaciones y con parámetros estables y de buena calidad en ambos entornos, a distancias más largas la eficiencia en transmisión y recepción de paquetes no decae en ambientes industriales. Esto presenta una gran ventaja al recolectar datos de maquinaria que se encuentre alejada del área de control. Si bien la existencia de interferencias en el área industrial podría presentar inconvenientes en la recepción de paquetes y en la calidad de los parámetros, en relación a la interferencia presentada por la propagación multicamino en ambientes abiertos, son mínimos, por lo que el porcentaje de paquetes perdidos en estos entornos es menor al porcentaje de paquetes perdidos en ambientes abiertos. En la Figura 5.6, se observa que el porcentaje de paquetes perdidos alcanza un máximo de 6 %, mostrando así el correcto funcionamiento de la **WSN** en ambientes industriales. Se debe tomar en cuenta que el porcentaje máximo de paquetes perdidos, depende de los requerimientos del sistema donde se implemente la **WSN**. En [44] y [48], se muestra como las pérdidas de paquetes se pueden superar el 1 % promedio determinado en sus mediciones, siempre que no se maneje información crítica y que el intervalo promedio no supere los 60 s, según las normas del protocolo **LoRaWAN** para SF7.

## 5.4. Simulaciones

En esta sección, se describe las simulaciones realizadas utilizando el *software* LoRaSim, este programa permite simular eventos discretos y colisiones empleando SimPy, facilitando así, el análisis y escalamiento de redes **LoRa**. LoRaSim está escrito en lenguaje Python y su código se puede obtener de forma gratuita [69].

Las simulaciones en este trabajo, tienen como objetivo, el dimensionamiento de la red, basándose en el patrón de propagación obtenido en las mediciones, más no la comparación de resultados obtenidos con los simulados. De esta manera, se evalúa la escalabilidad de la red basando en las colisiones generadas en un

ambiente donde los nodos transmiten hacia el mismo *gateway*. Para este trabajo se diseñó dos grupos de pruebas para la simulación de la red, en los cuales se utiliza el *script loraDir.py* como base de las pruebas. El primero de estos escenarios, plantea una red LoRa única, con un solo *gateway*, además en este se configuró antenas omnidireccionales para los nodos, mientras que en el segundo escenarios se agregaron zonas restringidas, donde no se pueden ubicar los nodos generados por el programa, esto con el fin de emular un ambiente industrial donde existen restricciones para la colocar los nodos.

En la Figura 5.9 se presenta la distribución de los nodos con respecto al *gateway*, la ubicación de cada nodo se genera de forma aleatoria, manteniendo una distancia mínima entre ellos y una máxima con respecto al *gateway*. La simulación además genera un archivo de texto con las principales estadísticas, incluyendo paquetes transmitidos, paquetes recibidos y colisiones.

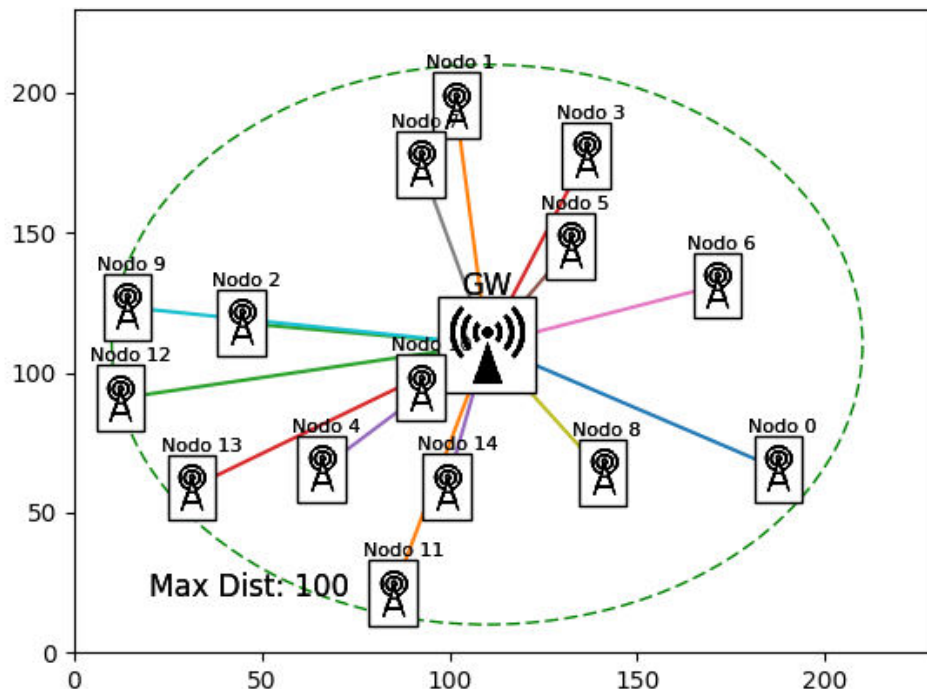


Figura 5.9: Escenario de simulación sin restricciones. Nodos = 15

En el caso de la red de pruebas diseñada, no se cuenta con opciones de bidireccionalidad, por lo que los nodos no son capaces de retransmitir paquetes en el caso de que ocurra una colisión o una pérdida de paquetes, debido a esto, consideramos que la colisión de un paquete, es equivalente a la pérdida del mismo, debido a que no se puede realizar una retransmisión.

LoraSim utiliza la Ecuación de *Path Loss* (Eq. 2.1). Para esto se han determinado los valores de los parámetros  $\gamma$  (varianza) y  $n$  (exponente de *Path Loss*) por medio de los datos recopilados en las mediciones, con el fin de modelar las condiciones de los escenarios. En las Figuras 5.10 y 5.11, se muestran los resultados de las simulaciones para los ambientes industriales 1 y 2. Para cada ambiente se varió tanto el número total de nodos, como el tiempo promedio de transmisión de cada nodo, esto para realizar un dimensionamiento de la red en el ambiente analizado. Se impuso un porcentaje de pérdidas de paquetes inferior al 10 %, para que la red se





considere estable y con poca degradación. En la Tabla 5.1, se presentan los parámetros utilizados para las simulaciones, adecuando los valores para los escenarios industriales analizados.

Tabla 5.1: Parámetros para simulaciones

Parametros	Escenarios	
	Industrial 1	Industrial 2
Potencia (dB)	14	
SF	7	
Frecuencia (MHz)	433.175	
Tx Promedio (seg)	10, 20, 30	
gamma	3.5	1.9
Varianza	19.8	4.45

En las simulaciones se eligió un tiempo mínimo de 10 segundos, debido a que es el menor tiempo en el que cada nodo sensor es capaz de recopilar información, empaquetarla y transmitirla hacia el *gateway*. Los tiempos de 20 y 30 segundos son valores arbitrarios, considerando que cada aplicación puede requerir valores particulares en el tiempo mínimo al que se recolecta cada paquete.

Las resultados en el ambiente industrial 1 (Figura 5.10) muestran que para un tiempo promedio de transmisión de 10 segundos, es posible desplegar hasta 20 nodos, manteniendo un porcentaje de pérdidas de paquetes cercano al 10%. Se observa también, que la cantidad de colisiones, decrece considerablemente al incrementar el tiempo promedio de transmisión a 20 segundos, permitiendo en este caso desplegar 25 nodos con un porcentaje de pérdidas menor al 9%, esta reducción se debe, que al aumentar el intervalo promedio de transmisión, se reduce también, la probabilidad de que un nodo transmita al mismo instante que otro, provocando así una colisión. La tasa de datos para la configuración de SF7 es de 5.4k kbps, con un tiempo de  $\approx 100$  ms, el tiempo mínimo para el estándar.

Con tiempo promedio de transmisión de 30 segundos, el porcentaje de pérdidas de paquetes se reduce a valores inferiores al 5%. Los intervalos promedio de transmisión ayudan en el dimensionamiento la red, considerando que las aplicaciones pueden requerir diferentes valores para este parámetro. Una opción adicional para reducir la cantidad de perdidas de paquetes, a causa de la calidad del enlace, es utilizar un SF cercano a 12, donde la tasa de bits es de 250 bps, pero con un tiempo de transmisión de casi 1 s, por lo que las colisiones son mas probables.

En el segundo escenario (Figura 5.11), se observa una mayor degradación en la red, obteniendo un porcentaje de pérdidas de paquetes superior al 10%, para 15 nodos con un tiempo promedio de transmisión de 10 segundos. En el caso de un tiempo de transmisión igual a 20 segundos, se observa que es posible aumentar la cantidad de nodos hasta 25 sin sobrepasar el 10% de pérdidas, un caso similar se presenta para un tiempo de 30 segundos.

Al agregar zonas de restricción a las simulaciones (Figura 5.12), se observó que estas generan un ligero aumento en el porcentaje de pérdidas de paquetes (Figuras 5.10 y 5.11), debido que se incrementa la probabilidad de las colisiones entre paquetes, al existir una mayor cantidad de transmisiones desde las mismas áreas lejanas al *gateway* y con similar potencia. Sin embargo el incremento de pérdidas de paquetes generado por las zonas restringidas, no muestra una degradación importante en la red, por lo que no afectaría el despliegue de redes LoRa. Cabe destacar que, en caso de una red con funciones de bidireccionalidad, muchas de las colisiones generarán retransmisiones por parte de los nodos, por lo que se reducirá la pérdida de paquetes pero aumentará la latencia de la red.

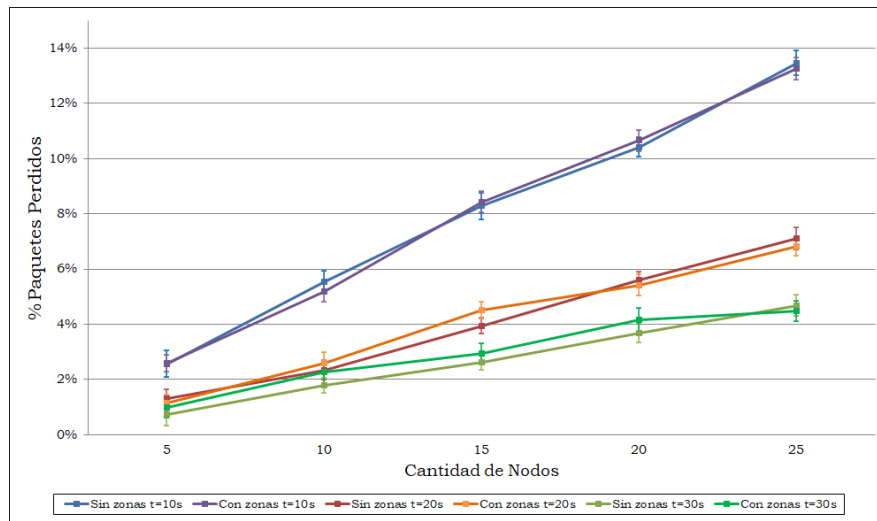


Figura 5.10: Simulaciones escenario 1

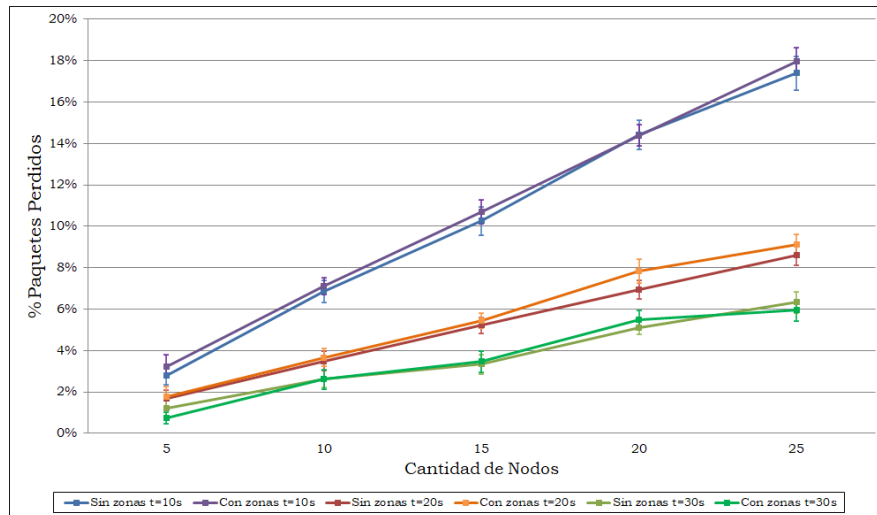


Figura 5.11: Simulaciones escenario 2

Se realizó una simulación con 25 nodos, aumentando el área máxima de simulación a 1000 m. Los resultados de estas pruebas mostraron que en un área tan extensa, las colisiones son casi inexistentes, pero las pérdidas de paquetes superan el 90 % debido a la potencia de transmisión y a que se tiene un SF configurado de 7, el cual es sensible a la dispersión multicamino.

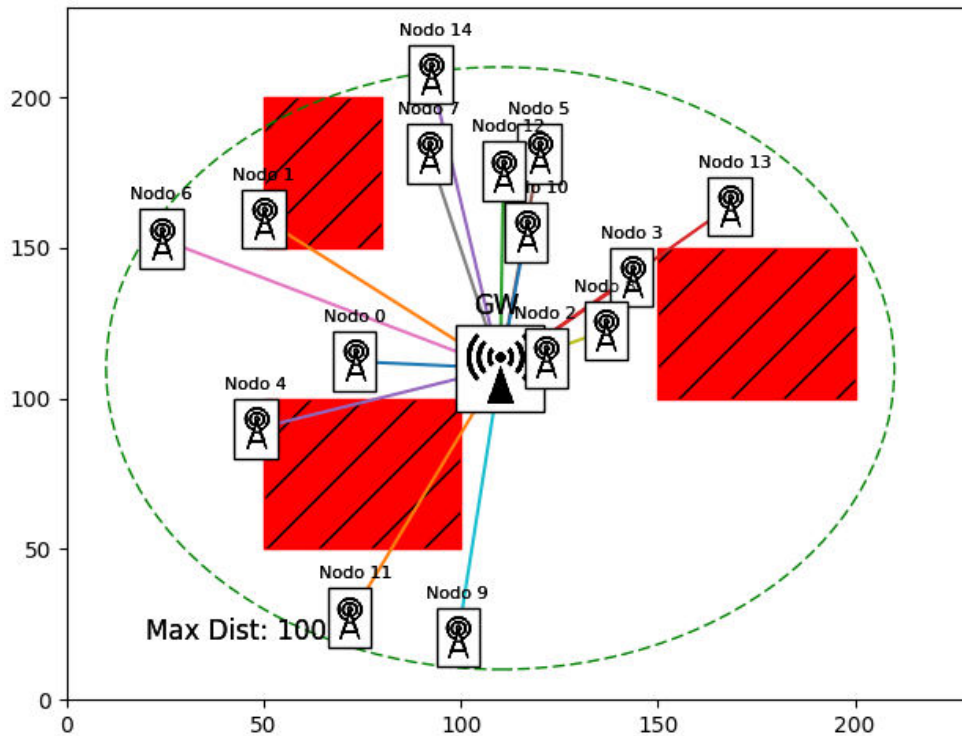


Figura 5.12: Escenario de simulación con restricciones. Nodos = 15

## 5.5. Integración con arquitectura OPC-UA

El nodo sensor diseñado en este trabajo, se comunica por medio de una conexión **I2C** con un **PLC** (ARDBOX I/O 20). Para esto, el nodo sensor cuenta con una tarjeta Arduino NANO capaz de recopilar la información del **PLC** y comunicarla al procesador del nodo sensor. La tarjeta Arduino también cumple funciones de protección, en el caso de sobre voltajes o mal funcionamiento por parte de los puertos del **PLC**, de esta forma se aíslan componentes delicados como el chip **LoRa** SX1278.

El primer paso en el proceso de comunicación, consiste en enviar las mediciones de los diferentes sensores del **PLC** al nodo sensor. La comunicación se realiza por medio del puerto **I2C**. La información luego es procesada y transmitida utilizando tecnología **LoRa**, hasta el *gateway*. Posteriormente los mensajes se envían al servidor por la red **IP**. Se necesitó realizar una adecuación de los valores recibidos por medio del puerto **I2C**, esto con el fin de adaptarlos para el empaquetado Cayenne, y así facilitar el envío de varias mediciones por cada paquete transmitido con tecnología **LoRa**. El manejo de los puertos **I2C** y empaquetado de datos se muestran en detalle en el Anexo **A.1.2**.

En este trabajo se utilizó como cliente **OPC-UA**, al ordenador Raspberry Pi, donde se montaron el servidor **LoRaWAN** y el *software* Node-RED, para la interfaz gráfica. En trabajos futuros se puede analizar la opción de que cada *gateway* de la red, opere como cliente **OPC-UA**.

Para las diferentes pruebas se configuró un servidor **OPC-UA** en un ordenador con sistema operativo Linux de distribución Ubuntu 18.04. El servidor **OPC-UA** cuenta con una interfaz gráfica, donde se presentan las mediciones actuales, además de gráficos históricos. En el anexo **B**, se detallan las configuraciones realizadas tanto para el cliente como para el servidor **OPC-UA**.

## 5.6. Tráfico OPC-UA

Los protocolos de la arquitectura **OPC-UA** utilizados en este trabajo, se transportan sobre el protocolo **TCP/IP**, para la comunicación entre clientes y servidor. En la Figura 5.13 se puede observar el tráfico entre cliente y servidor **OPC-UA** capturado con el software Wireshark, se destaca el intercambio de mensajes con protocolo **OPC-UA** que se transporta sobre **TCP/IP**, además de los mensajes de **ACK** enviados luego de cada transmisión.

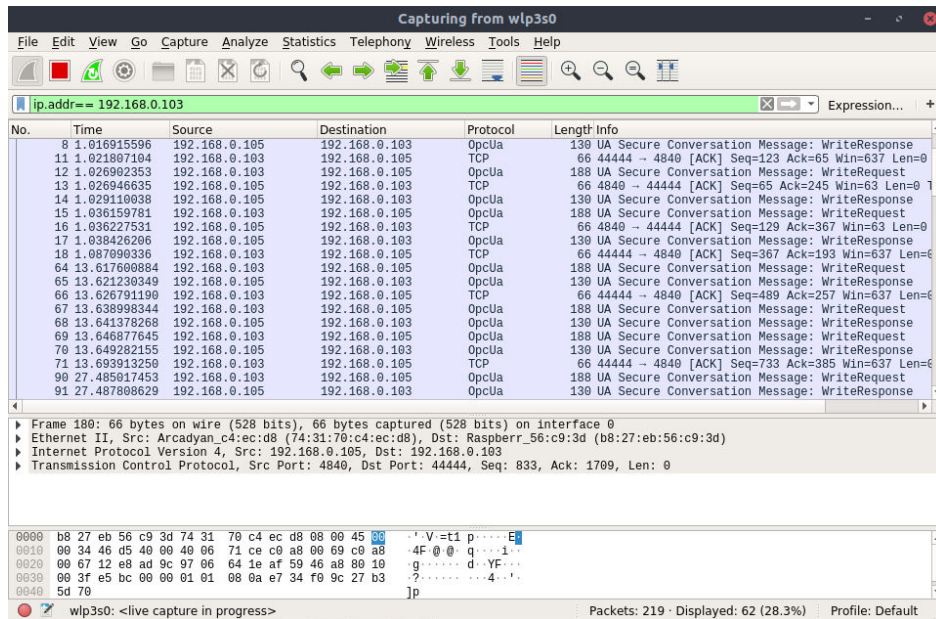
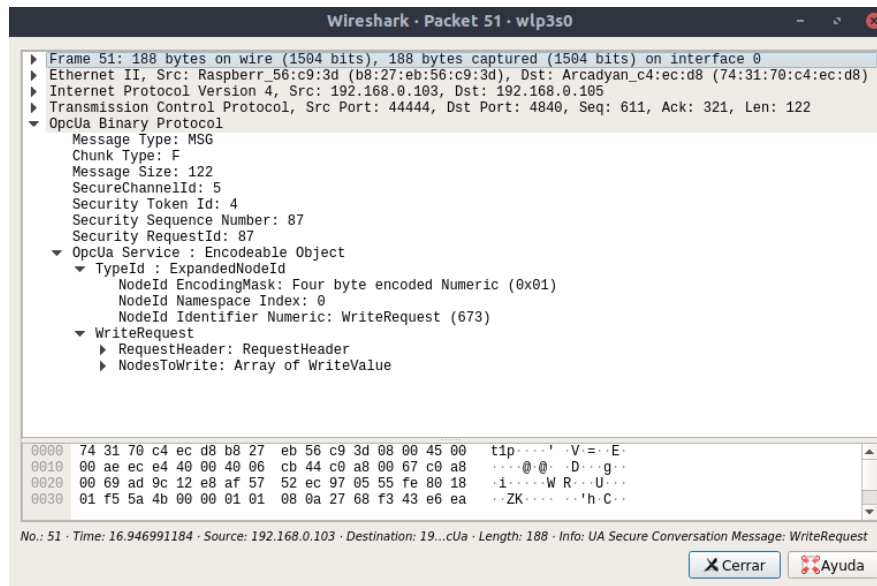
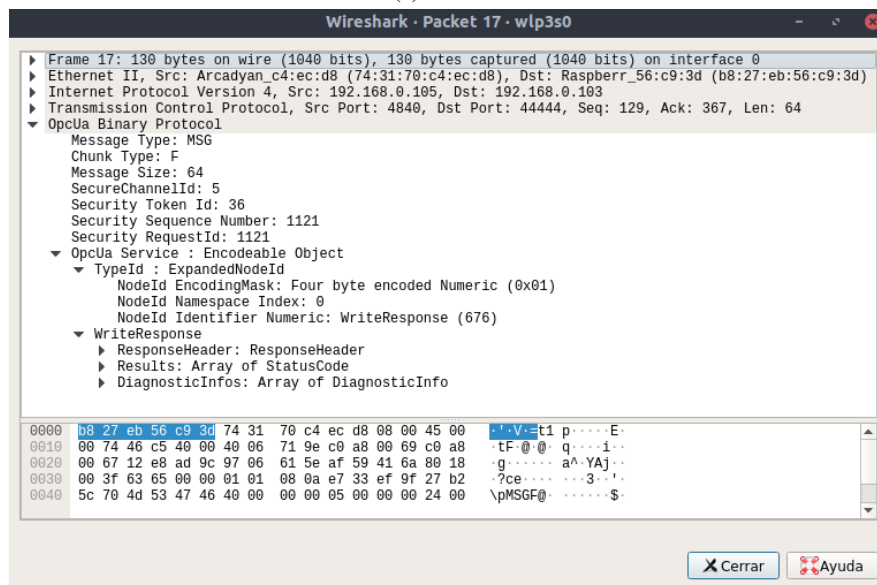


Figura 5.13: Tráfico entre cliente y servidor OPC-UA

La comunicación entre cliente y servidor consiste en un intercambio de mensajes de “petición” y “respuesta”. En la Figura 5.14 se observa el contenido de los mensajes tanto de cliente (Figura 5.14a) y servidor (Figura 5.14b). En estos mensajes se destaca los métodos de seguridad utilizados por el estándar, además de las cabeceras e identificadores propios de este protocolo.



(a) Petición



(b) Respuesta

Figura 5.14: Mensajes OPC-UA

### 5.6.1. Resultados

En la conexión entre servidor y cliente **OPC-UA**, se observó que existe un retardo considerable en el proceso de envío de solicitudes y en la transmisión del mensaje, utilizando la tecnología **LoRa**. Se determinó que esto se debe principalmente a las conexiones y procesos dentro del nodo sensor, donde se recopila y adecua la información para su transmisión. El envío de información por medio del puerto **I2C** es otra fuente importante de retardo. Este puerto es el encargado de comunicar el nodo con el **PLC**. Los nodos sensores se han configurado para transmitir cada siete segundos. Por lo que los retardos en la recopilación de información, pueden ocurrir dentro de este intervalo de tiempo, sin afectar la transmisión de información hacia el *gateway*.

La arquitectura **OPC-UA** permitió compartir información de diferentes sensores analógicos desde un **PLC** con limitadas opciones de conectividad. Esto demuestra la capacidad de la **WSN** diseñada, para integrarse a sistemas industriales convencionales.

En la interfaz gráfica creada con Node-RED Dashboard (ver Figura 5.15), se puede observar los indicadores de cada sensor junto con un gráfico histórico de los valores recopilados previamente. En casos como el sensor de temperatura, se aprecia picos en los valores históricos, esto se debe a que se sometió al sensor a fuentes de calor, para determinar el retardo en la actualización del valor. De igual forma se puede apreciar estas variaciones en el sensor de humedad.

En las pruebas realizadas, se observó que a la **WSN**, le toma cerca de siete segundos en actualizar los valores de la interfaz gráfica, con los valores obtenidos de los sensores conectados al **PLC**. Este valor de retardo es adecuado para aplicaciones no críticas, donde el tiempo de respuesta no necesita ser inmediato.

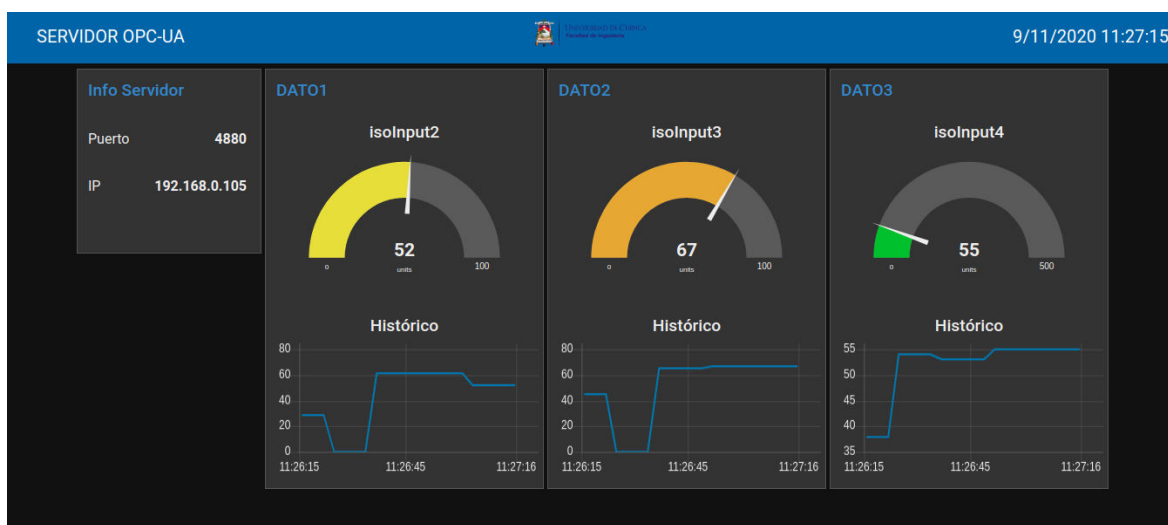


Figura 5.15: Servidor OPC-UA: interfaz gráfica

## 5.7. Conclusiones

Los dispositivos diseñados en este trabajo (nodo, *gateway*, servidor), conformaron satisfactoriamente una red **LoRaWAN**. Esta red fue desplegada dentro de ambientes industriales y en ambientes urbanos abiertos. La **WSN** cuenta con la capacidad de integrarse a sistemas con arquitectura **OPC-UA**, esto gracias a la funcionalidad integrada en el servidor de la red.

Las mediciones realizadas en los escenarios industriales y en los escenarios urbanos abiertos, indicaron que la red diseñada es capaz de mantener un enlace con niveles de **SNR**, **RSSI** y porcentaje de pérdida de paquetes, en niveles adecuados para mantener un enlace de calidad y una red estable. Los datos obtenidos en los ambientes industriales, muestran indicios de niveles de ruido inferiores a los ambientes urbanos, por lo que la red mostró un mejor rendimiento dentro de las fábricas.

Las simulaciones realizadas en *LoRaSim*, muestran las capacidades de escalabilidad de la tecnología **LoRa**, permitiendo desplegar en áreas reducidas (<1 hectárea), hasta 20 sensores transmitiendo a intervalos de 10 segundos hacia un mismo *gateway*.



---

## Conclusiones y recomendaciones

En el presente capítulo, se presentan las conclusiones finales del trabajo realizado, además se exponen las limitaciones y problemas encontrados en el diseño y configuración de los equipos, junto con las interpretaciones de los datos obtenidos en las campañas de medición.

### 6.1. Conclusiones

Los resultados presentados en este trabajo, muestran una importante evidencia de la aplicabilidad de la tecnología **LoRa** y la arquitectura **LoRaWAN** en comunicaciones de corto alcance, para ambientes industriales. La **WSN** provee una robustez y escalabilidad adecuada para el monitoreo de eventos recurrentes y aleatorios, que influyen en procesos de producción y mantenimiento.

El reducido costo, baja complejidad, junto con la seguridad de los nodos sensores y *gateways*, facilitan su despliegue e interoperabilidad, sin la necesidad de una compleja infraestructura existente.

Las fuentes de ruido e interferencia (motores trifásicos, acometidas de alta tensión, estructuras metálicas, redes inalámbricas), identificadas en los ambientes de pruebas, no influyeron de forma considerable en la calidad de enlace, a pesar de que tanto el nodo sensor como el *gateway* se ubicaron en alturas cercanas al nivel del suelo (<1.5 m).

Los parámetros de **SNR**, **RSSI** y **PER** muestran poca degradación en la calidad del enlace dentro de los ambientes industriales analizados. En contraste, en las pruebas de control, se observó que los ambientes industriales 1 y 2, cuentan con niveles considerablemente superiores de **SNR**, y valores similares de **RSSI** y **PER**. Esto lleva a intuir que la nave metálica de las fábricas, atenúa interferencia y ruido del exterior, además de reducir efectos destructivos de la propagación multi-camino, a la cual es más sensible el enlace configurado con un **SF** de 7.

Durante las pruebas, tanto el nodo sensor como el *gateway* cumplieron satisfactoriamente sus funciones. El chip SX1278, cumplió satisfactoriamente las funciones de transmisor en el nodo sensor. Al ser configurado como *gateway*, la fiabilidad del chip de la tarjeta Heltec WiFi LoRa se vió afectada, mostrando un incremento considerable en la pérdida de paquetes, en comparación con las mediciones realizadas con los nodos configurados como Tx y Rx, esto debido a que la tarjeta Heltec no está diseñada para cumplir con este tipo de funciones.



El servidor **LoRaWAN** montado en la Raspberry Pi, es capaz de administrar los dispositivos de la red, facilitando los procesos de descifrado y verificación de credenciales. Además de permitir la conexión con aplicaciones externas a la red, por medio de sus funciones de cliente **MQTT**. El *software* Node-RED, permite la creación de aplicaciones para la interacción con el servidor **LoRaWAN**, por medio del servidor **MQTT**, presentando una interfaz gráfica interactiva, para el monitoreo de los dispositivos de la red por parte del usuario.

Las funciones de cliente **OPC-UA**, agregadas a la red **LoRaWAN**, permiten una interoperabilidad entre sistemas basados en arquitectura **OPC-UA**. Esto facilita el acceso a información de dispositivos y sistemas con limitadas capacidades de comunicación.

Las simulaciones realizadas, muestran una importante capacidad para escalar la red **LoRaWAN** en ambientes industriales, manteniendo en niveles aceptables los parámetros de calidad de enlace analizados en este trabajo. Se determinó que la cantidad de nodos que pueden componer la **WSN**, está ligada no solo a la potencia y frecuencia sino también al área del ambiente y a los intervalos de transmisión que se requieran de cada nodo.

## 6.2. Recomendaciones

Durante el desarrollo de este trabajo, se observaron algunos aspectos y consideraciones, que deben ser tomados en cuenta en las **WSN**, desplegadas con tecnología **LoRa** en ambientes industriales:

- Las pruebas en ambientes industriales, se realizaron en naves de longitudes cercanas a los 100 metros y 20 metros de alto, por lo que se recomienda realizar campañas de mediciones para naves con menores dimensiones, así también, con diferentes procesos de producción, con el fin de evaluar los efectos provocados en el enlace, en este tipo de ambientes.
- Durante las pruebas se observó que dentro de las fábricas, la ubicación óptima para el *gateway*, debe ser cercana a la altura del techo de las naves metálicas, esto para permitir una línea de vista, hacia la mayoría de las áreas de producción, mejorando así, las condiciones del enlace y además se reduciría la cantidad de dispositivos de la red.
- Este trabajo empleó dispositivos de bajo costo con características limitadas, se recomienda utilizar dispositivos con mayor sensibilidad y de una gama superior, para obtener valores de **RSSI** y **SNR** más confiables.
- Para las mediciones, fueron utilizadas las antenas provistas por el fabricante de los dispositivos Heltec. Para una mejora en la calidad del enlace, se sugiere utilizar antenas con una mayor ganancia ( $>3\text{dBi}$ ) y con una frecuencia de resonancia similar a la utilizada para la transmisión y recepción.
- El equipo SX1287 no fue diseñado para operar como *gateway* en una red **LoRaWAN**; por lo que sería recomendable en despliegues más extensos, utilizar chips de la familia SX1301 o similares, diseñados para manejar el tráfico de múltiples nodos, mejorando parámetros de sensibilidad y potencia de transmisión.

## 6.3. Trabajos futuros

En trabajos futuros, sería conveniente complementar las campañas iniciales de medición, analizando con mayor detalle los escenarios de control, la cantidad de paquetes y aumentando las repeticiones por medición. Es oportuno, el análisis de los efectos de dispersión multi-camino dentro de naves y estructuras metálicas, así como en ambientes urbanos, en especial para **SF** superiores al analizado en este trabajo.

Otro aspecto a evaluar, sería la ubicación de los *gateways* en niveles más elevados de las naves industriales; esto para facilitar una línea de vista desde cualquier punto de las instalaciones. Este trabajo, también es un





primer paso para evaluar la factibilidad en la implementación de soluciones industriales concretas, basadas en la tecnología [LoRa](#), en las industrias locales.

Para la aplicación de las tecnologías abordadas en este trabajo, sería oportuno emplear estándares, que faciliten la comunicación por múltiples saltos desde el nodo, hasta el *gateway*. A la fecha de realización de este trabajo, el estándar [LoRaWAN](#), permite únicamente una topología de estrella de estrellas.



---

## Configuración de dispositivos

En este Anexo se detalla el diseño del hardware utilizado para adecuar los equipos, incluyendo: circuitos impresos, carcasas y ventilación. Además, se presenta la configuración de los dispositivos utilizados para el despliegue de la red, detallando la codificación del nodo sensor y del *gateway*, así como las diferentes configuraciones del servidor [LoRaWAN](#) y [MQTT](#). Para la interfaz de usuario se detalla la codificación realizada en Node-RED.

### A.1. Diseño y configuración del nodo sensor

En esta sección se presenta a detalle el diseño del hardware necesario para la operación del nodo sensor, incluyendo carcasas, circuitos impresos e interconexiones. Además se muestra las partes principales del código utilizado en las configuraciones para la interacción del nodo sensor con la red [LoRaWAN](#).

#### A.1.1. Diseño

El diseño del nodo sensor se dividió en dos sub secciones; una para el diseño de la carcasa, donde se detalla al nodo sensor con todos sus elementos, y otra en la que se detalla la creación de un [PCB](#) para la conexión con cables entre los equipos utilizados.

##### A.1.1.1. Diseño de Carcasa

Para cada uno de los nodos propuestos, se ha diseñado una carcasa. Esta permite ajustar los equipos utilizados de acuerdo a su forma, y conectarlos mediante un [PCB](#), de manera que se facilite las conexiones externas. Además, en caso de necesitarlo, permite ajustar los botones correspondientes a cada equipo, con la carcasa, de modo que no existan fallas en su funcionamiento. El reducido tamaño de esta carcasa, permite que el nodo sea manejado con seguridad y confort, facilitando las mediciones y toma de datos desde los distintos sensores existentes.

Para el diseño de estos elementos, se usó el *software* Autocad 2018. Para conseguir una carcasa que se adapte a los equipos desarrollados, fue necesario dividir dicho elemento en secciones inferior y superior.

##### Sección inferior

La sección inferior (Figura A.1), consiste de un elemento sólido, en donde se ubican los equipos y el circuito impreso. Esta sección cuenta con agujeros que se adaptan a los puertos USB, tanto para el dispositivo Heltec WiFi LoRa, como para el Arduino NANO. Además, cuenta con un agujero para una fuente de alimentación. Su forma permite que la antena del equipo LoRa, se ajuste en la parte superior de la carcasa.

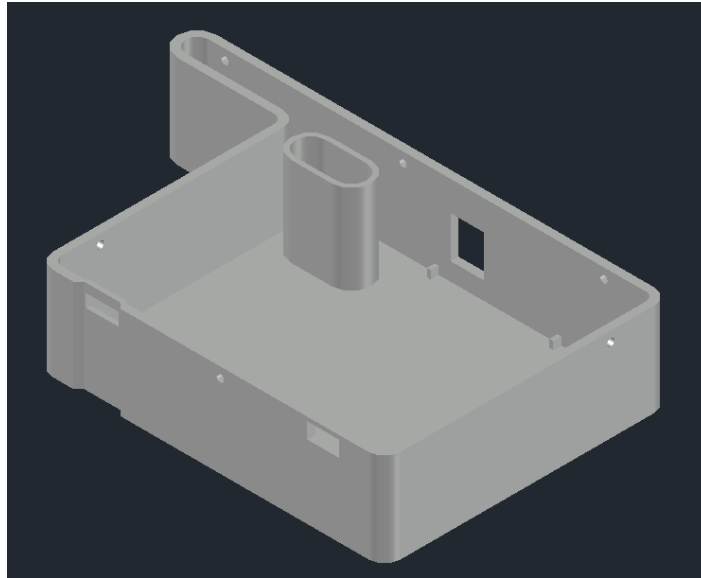
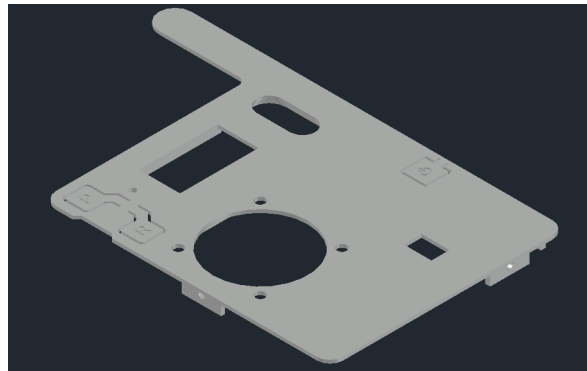


Figura A.1: Sección inferior de carcasa para nodo sensor.

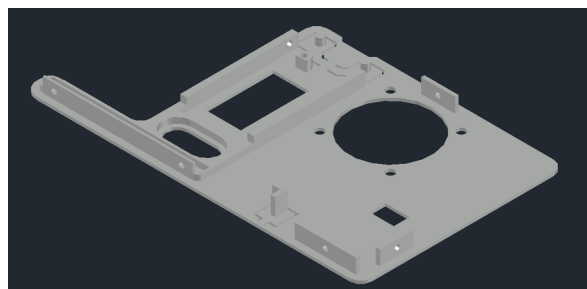
### Sección superior

La parte superior de la carcasa, cumple con la función de cerrar el contenedor y mantener a los equipos protegidos de factores como humedad y polvo. La sección cuenta con aberturas, que permiten visualizar la pantalla OLED del dispositivo Heltec, de manera que se pueda observar información sobre el envío de paquetes, entre el nodo y el *gateway*. Se agregó un orificio, para un ventilador, mismo que permite el ingreso de flujo de aire al interior de la carcasa. El contenedor cuenta con un botón de encendido general, y botones para el reinicio y *boot* del equipo Heltec.

La Figura A.2a presenta la parte superior del elemento diseñado, en donde se pueden observar los orificios mencionados en el párrafo anterior. Mientras que la Figura A.2b muestra la parte interior de la tapa, diseñada para ajustarse con la sección inferior de la carcasa. Este diseño se basó en el modelo de carcasa creado por la compañía Heltec Automation. La Figura A.3 muestra el diseño completo de la carcasa adaptada al nodo diseñado en este trabajo.



(a) Lado 1 sección superior



(b) Lado 2 sección superior

Figura A.2: Sección inferior de carcasa para nodo sensor.

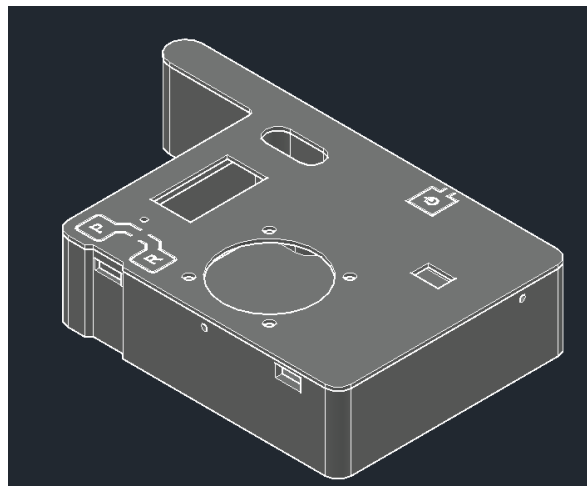
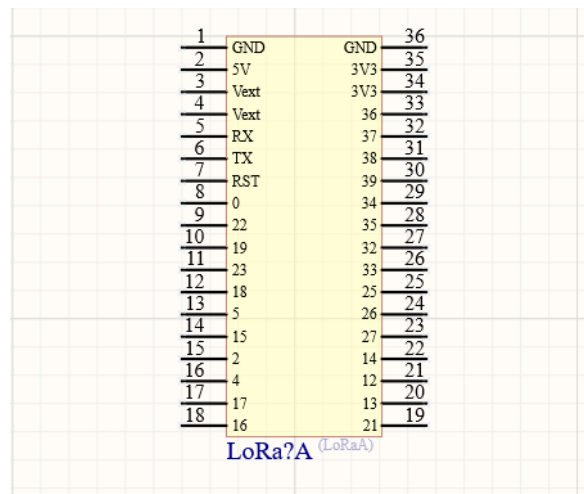


Figura A.3: Diseño final de carcasa para nodo sensor.

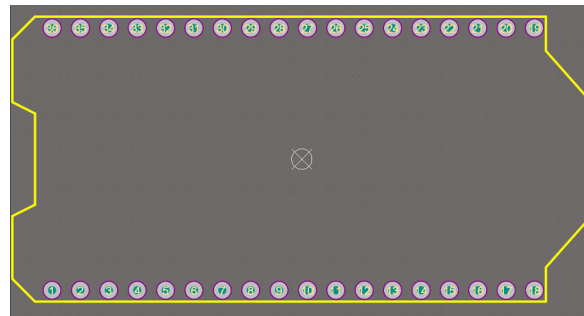
### A.1.1.2. Diseño del PCB

Con el propósito de realizar las conexiones necesarias entre los dispositivos en uso, sin la necesidad de usar cables, se creó un PCB, que permite realizar las conexiones necesarias entre cada equipo. El circuito se diseñó con las ranuras para encajar en la carcasa diseñada en la Sección referencial. Para esto, se ha hecho uso del programa Altium Designer en su versión más reciente.

Al usar equipos de fabricación reciente, no se han podido acceder a librerías que cuenten con el dispositivo Heltec Wifi LoRa V2, por lo que se ha creado una librería que cuente con un diseño, tanto para el circuito esquemático, como para el PCB. En la Figura A.4a, se puede observar el esquemático y en la Figura A.4b se puede observar el *Footprint* para el diseño del PCB.



(a) Diseño esquemático para SX1278 ESP32 LoRa



(b) Diseño footprint para SX1278 ESP32 LoRa

Figura A.4: Creación de librería para SX1278 ESP32 LoRa

Una vez creadas la librerías, se procede a diseñar un circuito esquemático, en el que constan los elementos del circuito impreso. La Figura A.5 muestra el diseño del circuito diseñado.

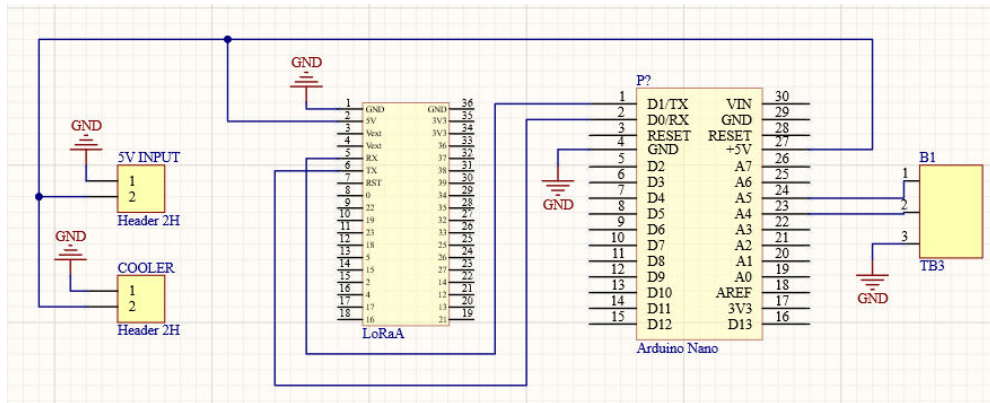
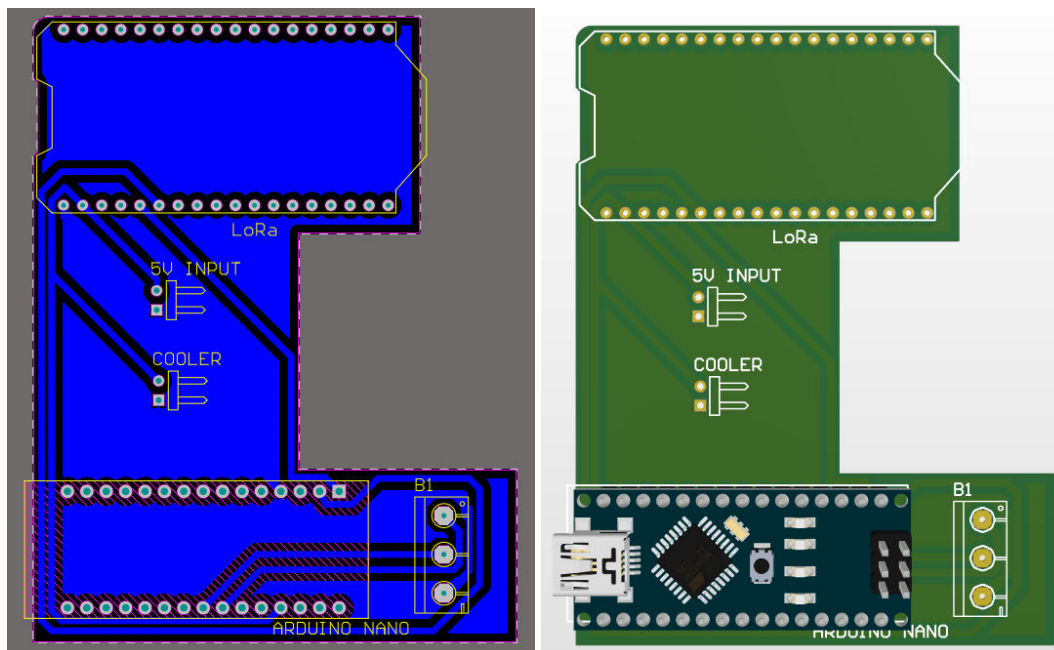


Figura A.5: Diseño circuito esquemático para nodo sensor.

Para poder crear el circuito impreso, se ha tomado en cuenta las recomendaciones básicas, relacionadas al ancho de pistas, así como, la separación entre cada una de ellas. El ancho designado para las pistas es de 0.9 mm. Este valor está ligado a la corriente máxima que pueden soportar las pistas. Debido a que los equipos que utilizamos (Arduino, Heltec), no suelen superar los 50 mA, se ha seleccionado el rango entre 0.5mm y 1 mm de manera que la corriente máxima soportada, sea hasta de 3 A. En cuanto a la separación entre pistas, depende de la tensión soportada, para señales digitales entre 5 y 10 V es recomendable usar una separación de 0.3 mm, en nuestro caso se utilizó el valor propuesto por el software, de 0.254 mm. En adición a las reglas mencionadas, se insertó un plano de tierra, que cubre gran parte de la superficie del PCB. En la Figura A.6a se visualiza el circuito impreso en 2 dimensiones, mientras que la Figura A.6b muestra el diseño del PCB en 3 dimensiones.



(a) Diseño final de PCB para nodo sensor en 2 dimensiones. (b) Diseño final de PCB para nodo sensor en 3 dimensiones.

Figura A.6: Diseño final de PCB para nodo sensor.



## A.1.2. Configuración

Para la configuración de las tarjetas Arduino NANO y Heltec WiFi LoRa, se utilizó el entorno de desarrollo integrado Arduino (Ardino IDE), esto considerando las recomendaciones de los fabricantes de los dispositivos, mismos que facilitan librerías y *drivers* a usar en este *software*.

### Recopilación de datos

La tarjeta Arduino NANO recibe el comando desde el ESP32 de la tarjeta Heltec y realiza las consultas al servidor OPC-UA utilizando el puerto serial (UART). Las respuestas son enviadas por un segundo puerto serial de regreso al ESP32.

En el Listado A.1 se presenta el código para la recopilación de dato.

```
1 void loop()
2 {
3 // Lectura de Comando desde ESP32
4 if(Serial.available()>0 && Serial.readString()=="D"){
5 // Envio de Etiquetas
6 mySerial.print("A5\r");
7 delay(5);
8 if (mySerial.available()){
9 //Lectura de Valores
10 val_A5 = mySerial.readString();
11 val_A5.trim();
12 }
13 mySerial.print("A6\r");
14 delay(5);
15 if (mySerial.available()){
16 //Lectura de Valores
17 val_A6 = mySerial.readString();
18 val_A6.trim();
19 }
20 mySerial.print("A7\r");
21 delay(5);
22 if (mySerial.available()){
23 //Lectura de Valores
24 val_A7 = mySerial.readString();
25 val_A7.trim();
26 }
27 // Envio de respuesta a ESP32
28 Serial.print(val_A5+";"+val_A6+";"+val_A7);
29 }
30 }
```

Listado A.1: Recopilación de datos



## Credenciales

Dentro de cada mensaje, el nodo sensor envía las credenciales de seguridad, que incluyen la clave de red (*NWKEY*), la clave de aplicación (*APPSKEY*) y la dirección del dispositivo (*DEVADDR*). En el Listado A.2 se presenta el código para el envío de credenciales.

```
1 static const PROGMEM u1_t NWKSKEY[16] = { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0
    x00,
2 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
3 0x00, 0x00 };
4 // LoRaWAN AppSKey
5 static const u1_t PROGMEM APPSKEY[16] = { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0
    x00,
6 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
7 0x00, 0x00 };
8 // LoRaWAN end-device address (DevAddr)
9 static const u4_t DEVADDR = { 0x26041938 }; // NODO_1
10
11 void os_getArtEui (u1_t* buf) { }
12 void os_getDevEui (u1_t* buf) { }
13 void os_getDevKey (u1_t* buf) { }
```

Listado A.2: Envío de credenciales de seguridad

## Inicio de Sesión

Una vez ingresadas las claves y credenciales, es necesario iniciar una sesión, para esto utilizamos la librería *LMIC*, esta permite configurar las credenciales como valores estáticos y ajustar parámetros de transmisión como *SF* y potencia. En el Listado A.3 se presenta el código para el inicio de sesión.

```
1 //Creamos la sesion
2 os_init();
3 LMIC_reset();
4 LMIC_startJoining();
5
6 uint8_t appskey[sizeof(APPSKEY)];
7 uint8_t nwkskey[sizeof(NWKSKEY)];
8 memcpy_P(appskey, APPSKEY, sizeof(APPSKEY));
9 memcpy_P(nwkskey, NWKSKEY, sizeof(NWKSKEY));
10 LMIC_setSession (0x0000000, DEVADDR, nwkskey, appskey);
11 // Rango de frecuencias
12 LMIC_setAdrMode(0);
13 LMIC_setLinkCheckMode(0);
14 // SF, Potencia
15 LMIC_setDrTxpow(DR_SF7, 16);
16
17 // Ejecutar envio
18 do_send(&sendjob);
```

Listado A.3: Inicio de sesión





## Lectura y Transmisión de Datos

El equipo Heltec WiFi LoRa recibe los datos de las mediciones del Arduino NANO, en las pruebas realizadas, cuyos datos provienen de un PLC. La información recopilada se procesa para ser enviada por medio del sistema de empaquetado Cayenne, facilitando así el envío de varias mediciones por mensaje. En el código a continuación, se puede observar la configuración de la pantalla OLED de la tarjeta HELTEC, donde se indica información del nodo y del mensaje a enviar. En el Listado A.4 se presenta el código para la lectura y transmisión de datos.

```
1 void do_send(osjob_t* j)
2 {
3   if (LMIC.opmode & OP_TXRXPEND)
4   {
5     /*Serial.printf("OP_TXRXPEND, not sending\r\n");
6   }
7   else
8   if (!(LMIC.opmode & OP_TXRXPEND))
9   {
10    val_serial="";
11    display.clear();
12    display.setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
13    display.drawString(30, 0, "LoRa Tx 2");
14    display.drawString(0, 25, "Tx > ");
15    display.display();
16
17    Serial.print("D");
18    delay(100);
19    if(!Serial.available()==0)
20    { val_serial=Serial.readString();
21      String A5 = getValue(val_serial, ';', 0);
22      String A6 = getValue(val_serial, ';', 1);
23      String A7 = getValue(val_serial, ';', 2);
24
25      A5.trim();
26      A6.trim();
27      A7.trim();
28
29      A5_int = A5.toFloat();
30      A6_int = A6.toFloat();
31      A7_int = A7.toFloat();
32
33      delay(5);
34      display.drawString(0, 45,String(A5_int));
35      display.drawString(60, 45,String(A7_int));
36      display.display();
37
38    }else{ display.drawString(0, 45,"NO SERIAL");
39          display.display();
40    }
```



```
41 // Empaquetado Cayenne
42 lpp.reset();
43 lpp.addDigitalInput(1, 1);
44 lpp.addDigitalOutput(2, 0);
45 lpp.addAnalogInput(3, A5_int/100);
46 lpp.addAnalogInput(4, A6_int/100);
47 lpp.addAnalogInput(5, A7_int/100);
48
49 LMIC_setTxData2(1, lpp.getBuffer(), lpp.getSize(), 0);
50
51 display.drawString(40, 25, "PQT #" + String(var1));
52 display.display();
53
54 var1 ++;
55 if (var1 >= 255) {var1=0;}
56 }
57 }
```

Listado A.4: Configuración de pantalla de la tarjeta HELTEC

## A.2. Diseño y Configuración del *gateway*

### A.2.1. Diseño

### A.2.2. Configuración

El *gateway*, al igual que el nodo sensor, utiliza la tarjeta Heltec WiFi LoRa, por lo que se usó el mismo entorno de programación (Arduino IDE). El código del dispositivo se basó en el trabajo de [62] para un *gateway* de un canal. A este trabajo se le realizó modificaciones para adaptarlo a nuestra tarjeta de desarrollo y a la frecuencia de transmisión. A continuación se presenta partes del código utilizado.

#### Credenciales

El *gateway* se conectó al servidor por medio de una red WiFi, para esto es necesario declarar las credenciales de esta red, además de la dirección del servidor, que en este caso se encuentra en la misma red local, montado sobre un ordenador Raspberry Pi 3. En el código a continuación se puede observar las credenciales necesarias para el registro del *gateway* en el servidor LoRaWAN. En el Listado A.5 se presenta la configuración de credenciales en el *gateway*.

```
1 // Puerto servidor
2 #define _THINGPORT 1680
3 // Direccion Servidor
4 #define _THINGSERVER "192.168.0.103"
5
6 //Credenciales
7 #if GATEWAYNODE==1
8 #define _DEVADDR { 0x26, 0x00, 0x00 0x00 }
```



```
9 #define _APPSKEY { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
10 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
11 0x00, 0x00, 0x00 }
12 #define _NWKEY { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
13 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
14 0x00, 0x00, 0x00 }
15 #define _SENSOR_INTERVAL 300
16 #endif
17
18 wpas wpa[] = {
19   { "", "" },
20   { "Heredia2", "*fh09176921" },
21   { "", "" }
22 };
```

Listado A.5: Credenciales de red gateway

### Frecuencias de operación

Los equipos de la red operan en la banda EU433, por lo que se configuró la lista de frecuencias para que el *gateway* funcione en los canales del 0 al 4. En los procesos de medición se observó que el chip SX1278 no es capaz de soportar saltos de frecuencias, por lo que es recomendable la operación en una sola frecuencia. En el Listado A.6 se presenta la configuración de frecuencias para el *gateway*.

```
1 // Listas de Frecuencias
2 int freqs [] = {
3   433175000, // Channel 0,
4   433375000, // Channel 1,
5   433575000, // Channel 2,
6   434175000, // Channel 3,
7   434375000, // Channel 4,
8
9 };
```

Listado A.6: Configuración de frecuencias para el gateway

### Intervalos de transmisión

Considerando las capacidades reducidas del microcontrolador ESP32, el cual funciona como *gateway*, se modificó los intervalos de medición para no sobre cargar el módulo WiFi con el envío de mensajes desde y hacia el servidor. En el Listado A.7 se presenta la configuración de los intervalos de transmisión del *gateway*.

```
1 // Timing
2 #define _MSG_INTERVAL 10
3 #define _PULL_INTERVAL 2 // Envío de mensajes al servidor downstream
   in milliseconds
4 #define _STAT_INTERVAL 120 // Mensaje de Estadísticas
5 #define _NTP_INTERVAL 3600 // NTP Sincronización
```



```
6 #define _WWW_INTERVAL 60 // recarga de WWW
```

Listado A.7: Configuración de intervalos de medición del gateway

### Servidor NTP

Para su operación, el *gateway* requiere actualizar periódicamente la hora del sistema, por lo que se configuró los parámetros para las solicitudes al servidor mas cercano. De no contar con acceso a internet el *gateway* puede operar con servidor NTP local. En el Listado A.8 se presenta la configuración del servidor NTP en el *gateway*.

```
1 #define NTP_TIMESERVER "ec.pool.ntp.org" // NTP ECUADOR
2 // #define NTP_TIMESERVER "192.168.0.103"
3
4 #define NTP_TIMEZONES -5
5 #define SECS_PER_HOUR 3600
6 #define NTP_INTR 0
```

Listado A.8: Configuración servidor NTP

### Disposición de pines

La tarjeta Heltec WiFi LoRa V2, cuenta con una disposición de pines particular, por lo que es necesario la configuración de los pines conectados al chip SX1272, para la transmisión y recepción utilizando tecnología LoRa. La forma en como se conectan los pines en esta tarjeta no permite la configuración de parámetros como SF para la recepción, limitando las funciones del *gateway*. En el Listado A.9 se presenta la disposición de pines para la tarjeta Heltec WiFi LoRa V2.

```
1 uint8_t dio0=26; // GPIO5 / D1. Dio0
2 uint8_t dio1=35; // GPIO4 / D2.
3 uint8_t dio2=34; // GPIO0 / D3.
4 uint8_t ss=18; // GPIO15 / D8.
5 uint8_t rst=14; // GPIO0 / D3.
6 // Pines para WIFI LoRa 32
7 #define SCK 5 // GPIO5
8 #define MISO 19 // GPIO19
9 #define MOSI 27 // GPIO27
10 #define SS 18 // GPIO18
11 #define RST 14 // GPIO14
12 #define DI00 26 // GPIO26
```

Listado A.9: Disposición de pines de la tarjeta Heltec WiFi LoRa V2

## A.3. Configuración de servidores

La red de sensores cuenta con tres servidores montados sobre el ordenador Raspberry Pi 3. El primero es el servidor LoRaWAN *Server*, que se encarga del tráfico de paquetes y el manejo de la red de dispositivos LoRa. En este servidor se configura las credenciales de los equipos, las conexiones con servidores y aplicaciones



externas. El servidor MQTT Mosquitto, se encarga de manejar los mensajes entre el servidor LoRaWAN y Node-RED, este último es el encargado del almacenamiento de valores, la interfaz gráfica y las funciones de cliente OPC-UA.

### A.3.1. Servidor LoRaWAN

El servidor LoRaWAN Server [70], es de código abierto y se basa en la especificación LoRaWAN v 1.0.3 [71], permite configurar un servidor de manera local para el manejo de nodos y gateways. Además cuenta con funciones de conectores y manejadores para interactuar y compartir información con aplicaciones externas.

Para acceder a la terminal del servidor se puede usar un navegador web, e ingresar la dirección IP, seguida del puerto del servidor, i.e. `http://192.168.0.103:8080/admin`.

#### Configuración del gateway

Para agregar un gateway utilizamos la terminal del servidor LoRaWAN donde introducimos parámetros como dirección MAC, área, ganancia de la antena y la descripción del dispositivo (ver Figura A.7). La dirección MAC es única para cada equipo con tecnología LoRa, en el caso de los dispositivos utilizado se puede obtener este dato utilizando el software Arduino IDE.

Edit gateway #3C71BFFFFFFAB7BBC

General Status

MAC \* 3C71BFFFFFFAB7BBC

Area area\_1

TX Chain \* 0

Antenna Gain (dBi) 3

Description Gateway\_1

Figura A.7: Configuración de gateway en el servidor LoRaWAN

#### Configuración de la red

El servidor LoRaWAN, es capaz de manejar varias redes con diferentes dispositivos. En la Figura A.8 se presenta la configuración general, donde se agrega el nombre e identificadores de la red, así como parámetros de radiofrecuencia para la recepción de transmisiones.



## Edit network #redlora

General ADR Channels

Name *	redlora
NetID *	000000
Region *	EU 433MHz
Coding Rate *	4/5
RX1 Join Delay (s) *	5
RX2 Join Delay (s) *	6
RX1 Delay (s) *	1
RX2 Delay (s) *	2
Gateway Power (dBm) *	16

Figura A.8: Configuración de la red: información general

En la Figura A.9 se muestra la configuración de las capacidades de transmisión de los equipos (*ADR*, *Adaptive Data Rate*), estas determinan límites para parámetros importantes de la red, como: *SF* y potencia de transmisión y el ciclo de trabajo.

## Edit network #redlora

General ADR Channels

Max EIRP (dBm) *	14
Max Power *	Max - 6 dB
Min Power *	Max - 4 dB
Max Data Rate *	SF7 125 kHz (5470 bit/s)
Initial Duty Cycle	1 (100%)
Initial RX1 DR Offset *	0
Initial RX2 DR *	SF9 125 kHz (1760 bit/s)
Initial RX2 Freq (MHz) *	433

Figura A.9: Configuración de la red: *ADR*

### Configurar Nodo

La configuración general de un nodo (Figura A.10), requiere parámetros de identificación y verificación (resaltados en rojo), como la dirección del dispositivo y las claves de red y aplicación. Estos valores deben coincidir con los configurados en la programación del nodo (ver Sección A.1).

En la Figura A.11 se resalta los parámetros de potencia (*Set power*) y tasa de datos (*Set Data Rate*). En este caso los valores de *ADR* son fijos, debido a que los equipos utilizados no permiten un cambio remoto de estos valores desde el servidor.



## Edit node #36041938

General ADR Status

DevAddr \* 36041938

Profile \* emilio

App Arguments ESP32-Gway-Things4U

Location pruebas

NwkSKey \* 00000000000000000000000000000000

AppSKey \* 00000000000000000000000000000000

Description nodo\_lora2

FCnt Up 101

FCnt Down \* 97

Last Reset 2020-08-08 02:27:46

Figura A.10: Configuración de nodo: general

## Edit node #36041938

General ADR Status

ADR Support OFF

Set Power 14 dBm

Set Data Rate SF7 125 kHz (5470 bit/s)

Set Channels 0-2

Used Channels 0-2

ADR Failed Filter values

Used Duty Cycle 1 (100%)

Used RX1 DR Offset 0

Used RX2 DR SF9 125 kHz (1760 bit/s)

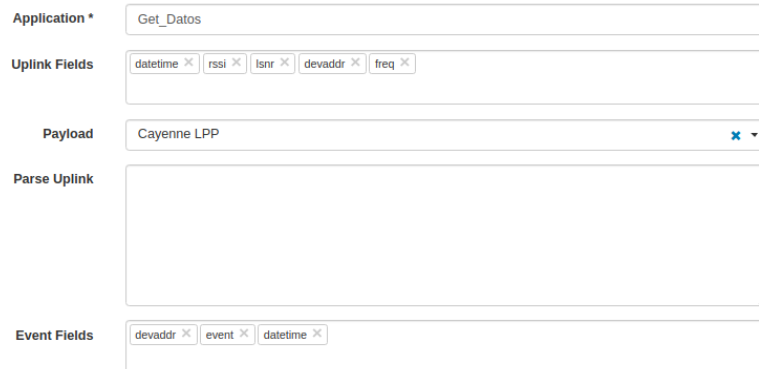
Used RX2 Freq (MHz) 433.000

Figura A.11: Configuración de nodo: ADR

### Configurar Manejadores y Conectores

El servidor permite crear y configurar manejadores y conectores, con el fin de establecer una comunicación con aplicaciones externas, en este trabajo el servidor **LoRaWAN** funciona como cliente **MQTT**, publicando los mensajes descriptados recibidos por los nodos. En la Figura A.12 se observa la configuración del formato de los mensajes de subida, incluyendo información del estado del enlace, además se indica que se esta empleando una codificación Cayenne para la carga útil.

## Edit handler #Get\_Datos



Application \*

Uplink Fields

Payload  x ▾

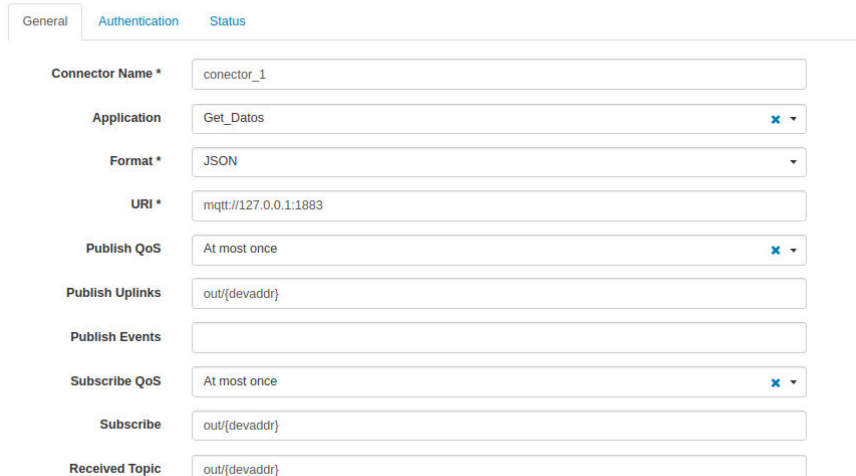
Parse Uplink

Event Fields

Figura A.12: Configuración del manejador

La configuración del conector permite definir el transporte de los datos desde y hacia servidores externos. En la Figura A.13, se muestra la configuración de los parámetros para publicar información al servidor [MQTT](#), montado también en la Raspberry Pi. Los mensajes publicados son utilizados por el software Node-RED para almacenar las mediciones y generar una interfaz gráfica.

## Edit connector #conector\_1



General Authentication Status

Connector Name \*

Application  x ▾

Format \*  ▾

URI \*

Publish QoS  x ▾

Publish Uplinks

Publish Events

Subscribe QoS  x ▾

Subscribe

Received Topic

Figura A.13: Configuración del conector

### A.3.2. Servidor MQTT

La comunicación entre servidor [LoRaWAN](#) y Node-RED (interfaz gráfica y almacenamiento), se realiza por medio del servidor [MQTT](#) Mosquitto, que también se montó sobre la Raspberry Pi 3. El servidor [LoRaWAN](#) funciona como cliente [MQTT](#), publica los datos provenientes de cada nodo en un *topic* diferente (ver Figura A.14), esto facilita la captura de datos por parte de Node-RED, para su posterior almacenamiento y presentación en la interfaz gráfica.



```
mosquitto_sub -h 127.0.0.1 -p 1883 -t 'out/#' -u 'lora' -P 'lora'  
{"datetime": "2020-08-09T00:59:41Z", "devaddr": "36041938", "freq": 433.174987, "lsnr": 9, "rssi": -28, "field1":  
1, "field2": 0, "field3": 31.0, "field4": 211.64, "field5": 11.64, "field6": 0.01, "field7": 183.0}  
{"datetime": "2020-08-09T00:59:50Z", "devaddr": "36041938", "freq": 433.174987, "lsnr": 10, "rssi": -35, "field1":  
1, "field2": 0, "field3": 38.0, "field4": 278.64, "field5": 37.64, "field6": 0.02, "field7": 78.0}  
{"datetime": "2020-08-09T00:59:59Z", "devaddr": "36041938", "freq": 433.174987, "lsnr": 9, "rssi": -37, "field1":  
1, "field2": 0, "field3": 36.0, "field4": 306.64, "field5": -20.36, "field6": 0.03, "field7": 37.0}  
{"datetime": "2020-08-09T01:00:08Z", "devaddr": "36041938", "freq": 433.174987, "lsnr": 10, "rssi": -36, "field1":  
1, "field2": 0, "field3": 27.0, "field4": 326.64, "field5": -51.36, "field6": 0.04, "field7": 117.0}  
{"datetime": "2020-08-09T01:00:17Z", "devaddr": "36041938", "freq": 433.174987, "lsnr": 9, "rssi": -36, "field1":  
1, "field2": 0, "field3": 28.0, "field4": 231.64, "field5": 34.64, "field6": 0.05, "field7": 235.0}  
{"datetime": "2020-08-09T01:00:27Z", "devaddr": "36041938", "freq": 433.174987, "lsnr": 10, "rssi": -35, "field1":  
1, "field2": 0, "field3": 39.0, "field4": -305.72, "field5": 13.64, "field6": 0.06, "field7": 171.0}
```

Figura A.14: Mensajes MQTT

### A.3.3. Interfaz Gráfica y Almacenamiento

En el ordenador Raspberry Pi 3 se instaló el software Node-RED, mismo que sido configurado como un cliente **MQTT**, de tal manera que reciba todos los mensajes que el servidor **LoRaWAN** publica en el servidor **MQTT** Mosquitto. De esta forma podemos almacenar los datos de las diferentes mediciones en archivos de extensión CSV, además de presentar al usuario una interfaz gráfica con indicadores y gráficos históricos de todos los nodos.

#### Cliente MQTT

Node-RED permite agregar un "nodo" para manejar las funciones de cliente **MQTT**, en la Figura A.15a se muestra la configuración de la dirección y credenciales del servidor, así como las credenciales necesarias para suscribirse a los mensajes. El servidor **LoRaWAN** crea un *topic* con la dirección de cada nodo sensor, en la Figura A.15b, se observa los mensajes recibidos por el cliente **MQTT**, esto se encuentran en formato *JavaScript Object Notation (JSON)* para facilitar la clasificación de las diferentes mediciones de cada sensor.

(a) Configuración

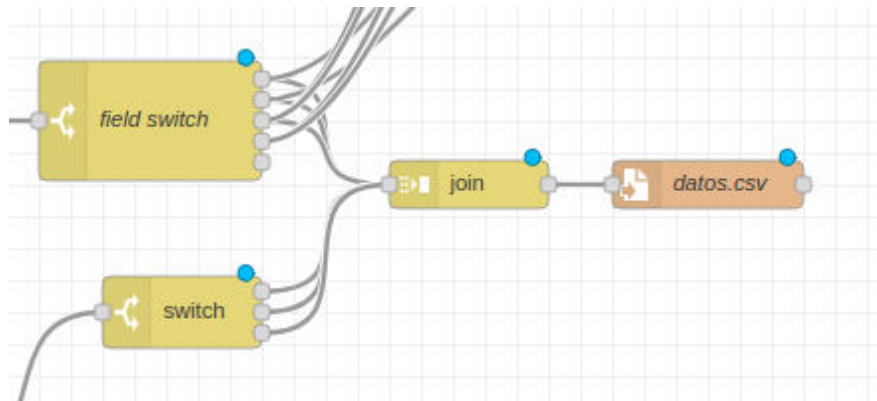
(b) Mensajes capturados

Figura A.15: Node-RED: cliente MQTT.

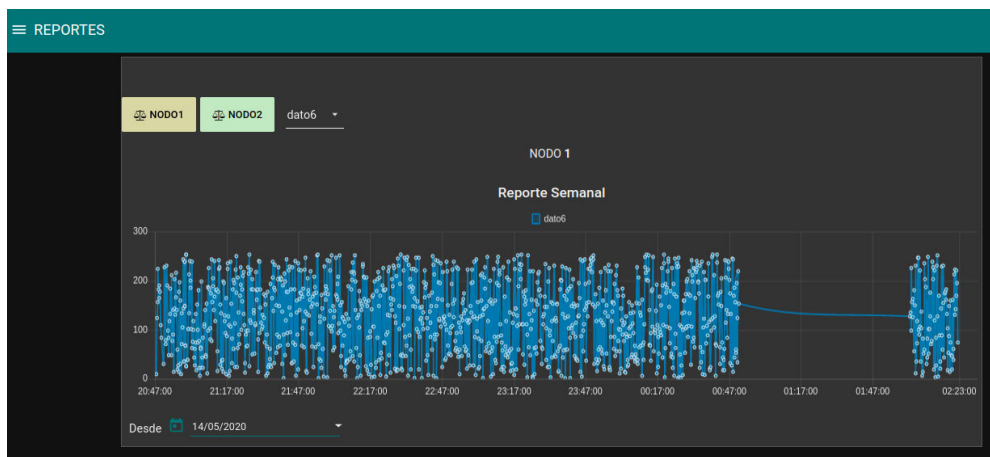
## Almacenamiento

Los mensajes capturados por el cliente **MQTT**, son procesados y clasificados según el sensor de donde provienen. En la Figura A.16a, se presentan los nodos utilizados para clasificar por campos cada dato proveniente del servidor. Una vez clasificados, se procede a insertarlos en un archivo con extensión **CSV** para su posterior almacenamiento. Se eligió este tipo de base de datos considerando la cantidad de información que sería almacenada y las capacidades del ordenador con el que se trabaja.

Con Node-RED Dashboard se creó la interfaz gráfica mostrada en la Figura A.16b, esta permite presentar los datos históricos clasificados por sensor y por el día en que se realizaron las mediciones.



(a) Configuración



(b) Reportes

Figura A.16: Node-RED: Cliente MQTT.

## Indicadores

La interfaz gráfica mostrada en la Figura A.17, fue creada con objetos tipo *gauge* y *chart*, de las librerías de Node-RED Dashboard, estos indicadores permiten mostrar los valores en tiempo real que están siendo capturados por los sensores. Cada indicador está asignado a una de las mediciones de los sensores, mostrando también un gráfico histórico de las últimas horas de mediciones. Estos indicadores son actualizados dependiendo de los retardos de la **WSN**, que incluyen el tiempo de respuesta de los sensores y el tiempo que tardan los nodos sensores en recopilar la información.

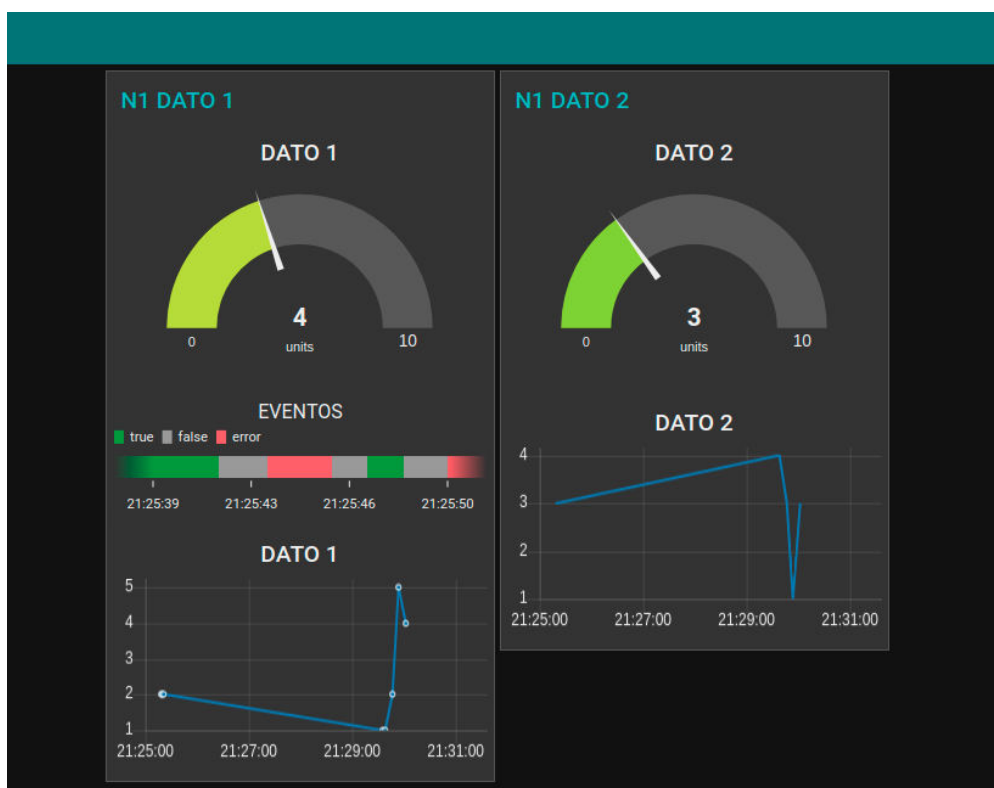


Figura A.17: Interfaz de usuario: indicadores y gráficos históricos



---

## Configuración Cliente-Servidor OPC-UA

La red de sensores inalámbricos basada en [LoRaWAN](#), diseñada en este trabajo, es capaz de interactuar con sistemas industriales basados en la arquitectura [OPC-UA](#). En esta sección se detalla la configuración de los equipos que permiten la integración de la red de sensores con sistemas industriales. Para esto, se realizaron pruebas y recolección de datos con un [PLC ARDBOX 20](#), basado en un tarjeta Arduino Leonardo. El [PLC](#) fue adecuado para recibir señales provenientes de sensores de temperatura, luminosidad y humedad.

### B.1. Configuración del Cliente OPC-UA

El nodo sensor de la red [LoRaWAN](#) tiene la capacidad de conectarse por medio de un puerto [I2C](#) a un [PLC](#), configurado para transmitir continuamente mediciones por el puerto de comunicación [I2C](#). De esta forma, el nodo sensor es capaz de recopilar información de dispositivos industriales y retransmitirla utilizando tecnología [LoRa](#) hasta el *gateway*, donde la información de los nodos se empaqueta como mensaje *User Datagram Protocol* ([UDP](#)) y se envía por una red [IP](#) hasta el servidor [LoRaWAN](#), montado en una Raspberry Pi. Este ordenador se encarga de manejar las funciones de cliente [OPC-UA](#), con capacidades de escritura y lectura de los objetos o atributos del servidor [OPC-UA](#). En la Figura [B.1](#), se muestra un diagrama del proceso de consulta y respuesta entre el cliente y el servidor [OPC-UA](#).

En las pruebas realizadas, el nodo sensor recopiló la información de tres sensores conectados al [PLC](#). Para esto el nodo sensor se comunica con el [PLC](#), y recibe los datos por el puerto serial [I2C](#), para posteriormente empaquetarlos para su transmisión usando tecnología [LoRa](#).

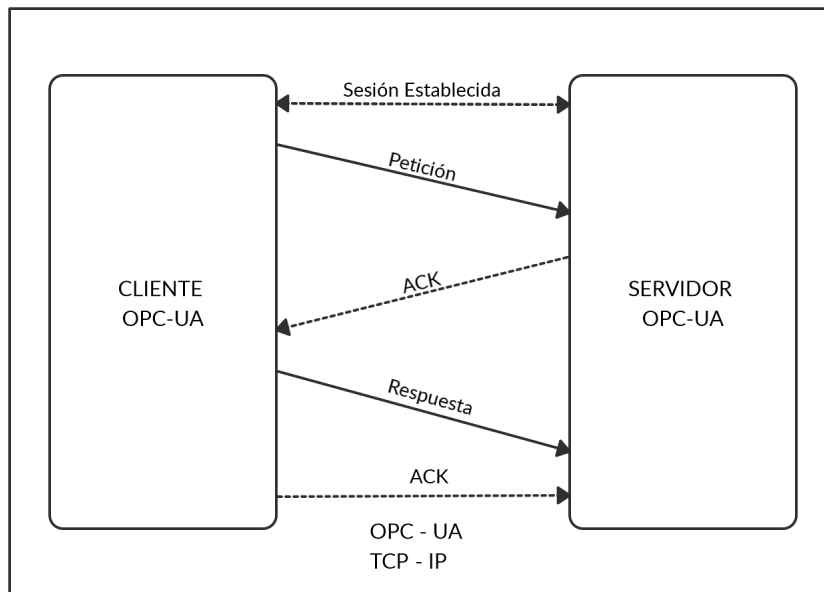


Figura B.1: Comunicación cliente - servidor OPC-UA

## B.2. Configuración del Servidor OPC-UA

El servidor **OPC-UA** se montó sobre un ordenador con sistema operativo Linux, específicamente con la distribución Ubuntu 18.04. El servidor está basado en el trabajo de [72] para un servidor **OPC-UA** compacto, integrable a Node-RED. El servidor está codificado en lenguaje JavaScript y *Hypertext Markup Language (HTML)*. Para una mejor visualización de la información del servidor y de los resultados, se creó una interfaz de usuario con Node-RED Dashboard. En la Figura B.2, se muestra un diagrama con la disposición de los equipos y sistemas utilizados, tanto para el servidor, como para el cliente **OPC-UA**, además de los protocolos involucrados en la comunicación de los sistemas.

En las pruebas realizadas se utilizaron tres sensores conectados al **PLC**. Para medir la temperatura se utilizó un sensor Pt1000, este maneja voltajes en niveles de estándares industriales (24 V) y puede ser conectado a cualquier **PLC** con entradas que soporten voltajes entre 0 a 10 V. Se utilizó también un sensor *Light Dependent Resistor (LDR)*, para medir luminosidad, a este sensor se le adecuó un partidor de tensión para no sobrepasar los voltajes de las entradas del **PLC**. Esto con el fin de mantener niveles por debajo de los 10 V ( $V_{OUT}$ ), teniendo una alimentación de 24 V ( $V_{IN}$ ), es necesario que la resistencia R2, sea de 500  $\Omega$ .

Para el tercer sensor se empleó el dispositivo DHT11, capaz de recopilar datos de temperatura y humedad. Este sensor opera con niveles de voltaje *Transistor-Transistor Logic (TTL)*, por lo que es posible conectarlo sin adaptaciones al **PLC** ARDBOX 20.

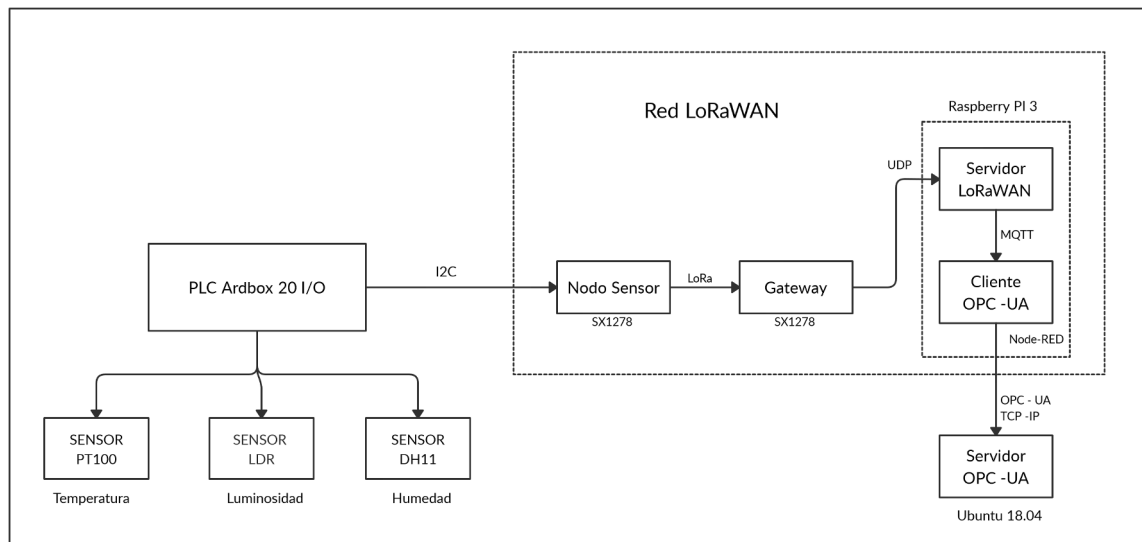


Figura B.2: Dispositivos del servidor y cliente OPC-UA



---

## Artículo publicado

#### ARTICLE HISTORY

Received 01 October 2020  
Accepted 16 October 2020

**Adrián E. Heredia**  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
emilio.heredia@ucuenca.edu.ec

**Paúl F. Lucero**  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
paul.lucero@ucuenca.edu.ec

**Fabián Astudillo Salinas**  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
fabian.astudillos@ucuenca.edu.ec

**Andrés Vázquez Rodas**  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
andres.vazquez@ucuenca.edu.ec

# Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial

*Design and implementation  
of a wireless sensor network  
with LoRa technology for  
industrial monitoring*



## Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial

### Design and implementation of wireless sensor network with LoRa technology for industrial monitoring

**Adrián E. Heredia**  
Facultad de  
Ingeniería  
Universidad de  
Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
emilio.heredia@  
ucuenca.edu.ec

**Paúl F. Lucero**  
Facultad de  
Ingeniería  
Universidad de  
Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
paul.lucero@  
ucuenca.edu.ec

**Fabián Astudillo  
Salinas**  
Facultad de  
Ingeniería  
Universidad de  
Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
fabian.astudillos@  
ucuenca.edu.ec

**Andrés Vázquez  
Rodas**  
Facultad de  
Ingeniería  
Universidad de  
Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
andres.vazquez@  
ucuenca.edu.ec

**Abstract** — The growing development of the Internet of Things (IoT) has diversified its fields of application, improving not only the interconnection of people but as well the communication between industrial machinery (M2M, Machine-to-Machine), in which its features in range, scalability, and low cost of deployment can be taken advantage of. LoRa and LoRaWAN technologies are presented as one of the main low-cost wireless communication options in the integration of industrial systems with a view to the new requirements of Industry 4.0. In this work, a measurement campaign and the analysis of the data obtained were performed to evaluate the behavior and applicability of LoRa and LoRaWAN technologies within industrial environments. To contrast the results, tests were performed in clear urban environments, where it was observed that the conditions inside the industrial buildings allow the establishment of a link with favorable radio frequency conditions. Initially, short-range scenarios (<100 m) have been considered in which a line of sight is maintained between the transmitter and the receiver.

**Keywords** — LoRa, LoRaWAN, IoT, Industry 4.0

**Resumen** — El creciente desarrollo de la Internet de las Cosas (IoT, Internet of Things) ha diversificado sus campos de aplicación, mejorando no solo la interconexión de personas, sino también, la comunicación entre maquinaria industrial (M2M, Machine-to-Machine), en las que sus características en alcance, escalabilidad y bajo costo de despliegue, pueden ser aprovechadas. Las tecnologías LoRa y LoRaWAN se muestran como una de las principales opciones de comunicación inalámbrica de bajo costo en la integración de sistemas industriales con mira a los nuevos requerimientos de la Industria 4.0. En este trabajo se realizó una campaña de mediciones y el análisis de los datos obtenidos, para evaluar el comportamiento y la aplicabilidad de las tecnologías LoRa y LoRaWAN dentro de ambientes industriales. Para contrastar los resultados, se realizaron pruebas en ambientes urbanos despejados, donde se observó que las condiciones dentro de las naves industriales, permiten establecer un enlace con condiciones de radio frecuencia favorables. Inicialmente se han considerado escenarios de corto alcance (<100 m) en los que se mantiene una línea de vista entre el transmisor y el receptor.

**Palabras clave** — LoRa, LoRaWAN, IoT, Industria 4.0.

## I. INTRODUCCIÓN

En el mercado industrial competitivo, las empresas enfrentan la creciente necesidad de mejorar la eficiencia de sus procesos, ajustarse a regulaciones ambientales y alcanzar metas financieras. Debido a la edad avanzada de muchos de los sistemas industriales y la manufactura dinámica que obliga al mercado, los sistemas de automatización industrial de bajo costo, son una alternativa para optimizar la productividad y eficiencia. Una opción posible es el proponer integraciones al hardware existente (PLCs (Programmable Logic Controller) y Panel HMI (Human-Machine Interface)), sin la necesidad de actualizar equipos o detener el proceso de producción [1],[2]. Tradicionalmente, los sistemas de automatización industrial se realizan por medio de comunicaciones cableadas (Ethernet industrial, RS-232, RS-485). Sin embargo, estos requieren de costosos, invasivos y complejos tendidos, o incluso se requiere adaptar sistemas cuando el hardware es anticuado.

La naturaleza colaborativa y espontánea de las redes inalámbricas de sensores (WSN, Wireless Sensor Network), brinda grandes ventajas sobre los sistemas tradicionales de monitoreo y control cableados, incluyendo auto organización, despliegue rápido, flexibilidad y costo reducido. En este aspecto, las WSN tienen un rol importante para crear sistemas confiables y resistentes que respondan rápidamente a eventos en tiempo real.

En este contexto, los avances actuales en las redes de bajo consumo y largo alcance (LPWAN, Low Power Wide Area Network), y la implementación de sistemas embebidos de automatización y recolección de datos, se han vuelto más factibles para la interconexión de las "islas" de monitoreo industrial [3]. Para aplicaciones industriales existen varias alternativas. En algunas especificaciones como Zigbee y WirelessHART, se usa el estándar IEEE 802.15.4 [4], [5]. En la tecnología LoRa, por su parte, se utiliza mayormente la especificación LoRaWAN, aunque es posible usar también el estándar 802.15.4. La tecnología LoRa fue desarrollada por The LoRa Alliance [6], y ha tenido una mayor aceptación en el mercado en los últimos años por sus características superiores en parámetros como alcance, robustez y bajo consumo de energía [7]. Así, se espera que la tecnología LoRa también se adapte satisfactoriamente a los requerimientos de aplicaciones enfocadas en la Industria 4.0 [8].

Con las LPWAN se abre una perspectiva industrial diferente, gracias al lanzamiento continuo de nuevos equipos. Entre estos se destacan los desarrollados por el fabricante

de semiconductores SEMTECH con su línea de productos de largo alcance "Long-Range" (LoRa) [9]. LoRa hace uso de tecnologías avanzadas de espectro ensanchado [10], utilizando pulsos modulados de frecuencias lineales de banda ancha para lograr mejores características de frecuencia [11], [12].

LoRaWAN, por su parte, define el protocolo de comunicación (capa de enlace de datos del modelo OSI) y la arquitectura del sistema, sobre la capa física definida por LoRa [13]. LoRaWAN utiliza una topología en estrella de largo alcance en la que los gateways son usados para conmutar los mensajes entre los dispositivos finales (nodos) y el núcleo de la red [14]. En una red LoRaWAN los nodos pueden transmitir los datos a múltiples gateways y no necesariamente a uno solo. A su vez, cada gateway direccionará los paquetes recibidos desde el nodo final al servidor de red, que puede ser local o que puede estar ubicado en la "nube". Esto se realiza a través de algún tipo de backhaul, tradicionalmente mediante: GSM, LTE, Ethernet, satélite, o WiFi [15], [16].

Hoy la industria muestra especial interés en la conexión de la parte física (equipos de piso) y la infraestructura digital, con el fin de optimizar la producción y proporcionar interoperabilidad a las diferentes entidades involucradas, satisfaciendo directrices de la Industria 4.0 [17], [18]. Por lo que en este trabajo se propone la evaluación de una red LoRaWAN y su aplicabilidad en entornos industriales. Se realizaron campañas de mediciones, además de pruebas controladas en ambientes libres de obstáculos y fuentes de interferencia. Los datos recopilados muestran que los parámetros de calidad: RSSI (Received Signal Strength Indication), SNR (Signal-to-Noise Ratio) y tasa de pérdida de paquetes, presentan poca degradación causada por los equipos y maquinarias dentro de los ambientes industriales, obteniendo niveles más favorables que en ambientes urbanos despejados. La adquisición de datos se realizó por un proceso de muestreo por cada punto de medición.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera. La Sección II analiza los trabajos relacionados. En la Sección III se hace una revisión general de los aspectos más relevantes de la capa física LoRa y el protocolo LoRaWAN. Por su parte, en la Sección IV se presenta la metodología propuesta para la evaluación. La Sección V muestra los resultados obtenidos y finalmente en la Sección VI se presentan las principales conclusiones de este trabajo.

## II. TRABAJOS RELACIONADOS

En los últimos años, varios trabajos se han centrado en las tecnologías utilizadas para despliegues de IoT, destacando recientemente LoRa y LoRaWAN. De estas últimas, en varios trabajos, se ha analizado su aplicabilidad y desempeño en ambientes con factores adversos para las transmisiones de radio (interferencia, ruido, reflexión).

Una de las principales deficiencias de las tecnologías de IoT, es proveer datos en tiempo real. En [8] se describen estrategias para optimizar la capa de acceso (MAC), tanto para transmisiones periódicas en tiempo real y transmisiones ocasionales no periódicas. Para esto, se busca sincronizar la transmisión de los nodos finales con el fin de evitar colisiones. Estas optimizaciones permiten seguir explotando las ventajas de las WSN, como la alta escalabilidad y reducida infraestructura, necesaria para su despliegue.

Por su parte, en [6] se evalúa la capacidad de la tecnología LoRa para comunicaciones de largo alcance, siendo posible lograr máximos de hasta 10 kilómetro con condiciones de línea de vista.

El trabajo de [19] muestra cómo las capacidades de largo alcance de LoRa pueden ser aprovechadas en aplicaciones industriales de corto alcance, en las que el principal atenuante es la interferencia producida por los equipos de alta potencia. El desempeño de la tecnología LoRa no es equivalente al de sistemas cableados, pero con una tasa de error de paquetes cercana al 0.2 %, esta se muestra como una solución para sistemas industriales no críticos.

El despliegue de una red LoRaWAN dentro de las instalaciones de un barco militar se expone en [20]. En este caso, las condiciones son adversas debido a la estructura de metal que provoca reflexiones de las señales de

radio, además de la ausencia de línea de vista para la transmisión de los nodos sensores. La red logró un desempeño aceptable utilizando un factor de ensanchamiento (SF, Spreading Factor), con valor de 12. Se alcanza una tasa de pérdida de paquetes (PER, packet error ratio) inferior al 5 % en una longitud de 110 m entre compartimientos de la nave. En este estudio, LoRaWAN se presenta como una alternativa al despliegue de cable de cobre o fibra óptica, que en el caso de navíos implica gran complejidad y elevados costos.

LoRaWAN permite que la red sea escalable y facilita la movilidad de los nodos sensores. En [21] se analiza el desempeño de una WSN en el interior de una mina. Se considera que este ambiente sufre cambios constantes en su estructura, además de variaciones en niveles de gases, humedad y temperatura. Por tanto, se requiere un monitoreo continuo, tanto de la maquinaria como de las condiciones ambientales a las que se expone el personal. En dicho trabajo se reduce el retardo y la latencia en la transmisión de paquetes. Se mejora así el desempeño de la red en caso de transmisiones de emergencia, que requieren el menor número de retransmisiones en el caso de pérdida o errores en los paquetes.

Las capacidades de la tecnología LoRa para comunicaciones de largo alcance se ha analizado profundamente en múltiples trabajos, logrando distancias superiores a los 10 km con línea de vista. Para esto, las redes basan su arquitectura en una topología en estrella empleando el protocolo LoRaWAN. Por otro lado, [22] analiza que este tipo de estructura de red es dependiente de la línea de vista entre dispositivos, sin embargo, esto no siempre es posible. Específicamente, el trabajo se enfoca en la detonación de explosivos dentro de minas empleando tecnología LoRa para la transmisión en una red multi-salto, capaz de superar obstáculos en ambientes irregulares.

## III. TECNOLOGÍAS LORA Y LORAWAN

### A. LoRa

LoRa es un tipo de modulación de capa física de espectro ensanchado CSS (Chirp Spread Spectrum) [23]. Esta modulación consiste en el uso de una señal chirp que varía constantemente con la frecuencia. Esto permite de cierta forma que aumente su capacidad de

resistencia a señales interferentes y además reduce el desvanecimiento de la señal debido a la propagación multi-camino [24]. Esto a su vez implica que, los nodos que se encuentren más cercanos al Gateway tendrán una tasa de datos mayor que la de los nodos más alejados [23]. Además, al ser un estándar LPWAN es posible reducir la tasa efectiva de transmisión de datos

cuando existan rangos de comunicación más amplios que requieren un enlace más robusto [24].

El bajo consumo energético y su gran alcance, hacen que LoRa sea uno de los estándares más utilizados en el desarrollo de aplicaciones IoT industriales (IIoT). Lo cual permite que los dispositivos usados en este tipo de desarrollos industriales aumenten su tiempo de vida. Sin embargo, en algunos casos LoRa presenta ciertos inconvenientes en cuanto a la latencia. En la actualidad, existen otros protocolos que podrían proporcionar una latencia más baja y una velocidad de datos más alta, por ejemplo NB-IoT (Narrow Band IoT) [25].

Por otra parte, una de las mayores ventajas de LoRa radica en el uso de una amplia gama de frecuencias que no requieren licencia, ya que pertenecen al espectro ISM (Industrial, Scientific and Medical). Esto facilita la interoperabilidad en todo el mundo [23].

### B. LoRaWAN

La especificación LoRaWAN es un protocolo de red de bajo consumo y largo alcance, LPWAN [26]. Su funcionamiento se basa en dispositivos de bajo consumo energético usados generalmente en el desarrollo de aplicaciones relacionadas al IoT y al IIoT.

Una red LoRaWAN cuenta con una topología conocida como Estrella de Estrellas (Star of Stars), compuesta por cuatro elementos principales: dispositivos finales, Gateway, un servidor de red y un servidor de aplicación. Los dispositivos finales generalmente se encuentran conformados por sensores o actuadores, los

cuales comparten con el gateway la información adquirida, haciendo uso de la capa física LoRa. Por su parte, el gateway se encarga de recibir dicha información y compartirla con el servidor de red mediante una comunicación basada en el protocolo IP [27].

El protocolo LoRaWAN cuenta con características que permiten recopilar datos en un solo Gateway desde varios nodos ubicados a diferentes distancias, incluso kilómetros, mediante una comunicación unidireccional [15]. Sin embargo, en algunos casos se ha optado por la comunicación bidireccional entre nodo y gateway, y existe también la posibilidad de tener más de un gateway.

La función de los gateways radica en el envío de la información recolectada de cada dispositivo final, sin procesar, a un servidor de red mediante un interfaz de backhaul de mayor rendimiento como Ethernet, 3G/4G, satélite o Wi-Fi [28].

Por su parte, el servidor de red recibe la información enviada en forma de paquetes desde los nodos, los decodifica y realiza su protocolo de seguridad. De esta manera, cada una de las aplicaciones que se ejecutan en los servidores de aplicaciones, pueden recibir los datos desde el servidor de red, y pueden usar dicha información a su conveniencia [29].

En la Figura 1 se puede observar cada uno de los componentes de la arquitectura descrita. Esta arquitectura LoRaWAN basada en la topología estrella de estrellas permite garantizar una comunicación eficaz entre todos los dispositivos, además de generar un bajo consumo energético en los dispositivos finales.

## IV. MÉTODO

Para el despliegue de la red LoRaWAN diseñada en este trabajo, se utilizaron sistemas de código abierto y equipos de bajo costo, adecuados para las condiciones de los escenarios

estudiados. Las campañas de medición se realizaron en dos escenarios industriales y dos entornos controlados, con el fin de contrastar resultados. Los escenarios industriales cuentan

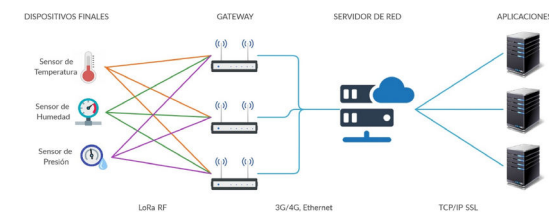


Fig. 1 Arquitectura LoRaWAN [30]

con diferentes maquinarias y acometidas ubicadas dentro de naves metálicas, mientras que los escenarios controlados son áreas verdes libres de obstáculos, ubicadas en sectores urbanos.

**A. Equipos**

1) Heltec WiFi LoRa 32: El equipo Heltec WiFi LoRa 32 es un dispositivo orientado a IoT, diseñado y producido por Heltec Automation. La tarjeta de desarrollo basa su funcionamiento en el microcontrolador ESP32 y se vale del chip integrado SX1278 para las funciones de comunicación LoRa. Estos dos dispositivos interactúan por medio de una interfaz SPI (Serial Peripheral Interface) [31].

A pesar de ser diseñado para operar como nodo sensor, el dispositivo de Heltec puede configurarse también como un gateway LoRaWAN, comunicándose al servidor por medio del protocolo TCP/IP. Esto limita su funcionamiento, impidiéndole realizar transmisiones en el enlace descendente hacia los nodos sensores.

**B. Raspberry Pi 3 modelo B**

Raspberry Pi 3 es una computadora de dimensiones reducidas, originalmente diseñada con fines educativos por la fundación Raspberry Pi. Puede soportar una variedad de sistemas operativos con un procesador de arquitectura ARM. El ordenador cuenta con periféricos que incluyen pines GPIO (General Purpose Input/Output), permitiendo la comunicación y control de dispositivos externos [32].

En este trabajo se utilizó la Raspberry Pi 3 modelo B, como administrador de la red LoRaWAN y servidor web, para la conexión con aplicaciones e interfaces gráficas.

**C. Disposición de Equipos**

En la Figura 2 se muestra la disposición de los equipos en la red LoRaWAN. El nodo sensor está compuesto por un microcontrolador encargado de recopilar mediciones del ambiente, y comunicarlo por un puerto serial hacia el módulo Heltec WiFi LoRa 32 para su transmisión mediante la tecnología LoRa. En el gateway (receptor), se utiliza, al igual que en transmisor, el módulo SX1278 en la tarjeta de Heltec. Los datos recibidos por éste, se transmiten hacia el servidor por medio del módulo WiFi. El servidor está montado sobre la Raspberry Pi, que cumple tanto con las funciones de administrador de la red LoRaWAN

como la función de servidor web para el interfaz de usuario.

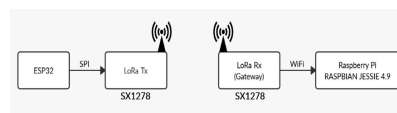


Fig. 2 Diagrama de bloques de los equipos

**D. Configuración de Equipos**

La configuración de los equipos utilizados en este trabajo se basa en las directrices de The LoRa Alliance [13] para la topología de una red LoRaWAN. En la capa física, se utiliza una frecuencia de 433 MHz, empleando el chip SX1278 de SEMTECH, tanto para el transmisor como para el receptor. El servidor de red se montó sobre un ordenador Raspberry Pi para la administración de la red.

- **Nodo sensor:** Los datos a transmitirse desde el nodo sensor son recompilados por medio de una tarjeta Arduino NANO conectada como periférico por medio de un puerto serial al módulo Heltec WiFi LoRa 32. La información de sensores y periféricos es cifrada usando el método Cayenne LPP [33]. Esto con el fin de reducir el tamaño de los mensajes (payload) y enviar varias mediciones por mensaje. El microprocesador ESP32 de la tarjeta Heltec maneja el chip SX1278 y los parámetros de transmisión así como las credenciales de seguridad.
- **Gateway:** El chip SX1278 de la tarjeta Heltec WiFi LoRa 32, se encarga de recibir las transmisiones LoRa. Estas son procesadas por el microcontrolador ESP32, que las empaqueta y transmite por la red IP utilizando su módulo WiFi integrado. La programación se basó en el trabajo de [34] para un gateway de canal sencillo.
- **Servidor:** El servidor LoRaWAN se monta sobre un ordenador Raspberry Pi 3 modelo B. También se configuró un servidor MQTT para la comunicación con aplicaciones externas y un servidor web para el interfaz de usuario. El servidor y el gateway se comunican por una red WiFi. Los datos procesados por el servidor son almacenados en una base de datos en formato .csv.

**E. Escenarios**

El aporte de este trabajo se centra en evaluar el comportamiento y la aplicabilidad de la tecnología LoRa en ambientes industriales por lo que se eligieron dos instalaciones con diferente maquinaria y procesos de producción. Las mediciones se desarrollaron manteniendo una línea de vista entre el nodo sensor y el gateway. Adicionalmente, se realizaron pruebas controladas en dos ambientes libres de obstáculos y fuentes de interferencia.

**a) Ambiente industrial 1:** La nave principal del ambiente industrial 1 cuenta con una altura aproximada de 20 m, una longitud superior a los 150 m y se compone de dos niveles. En la planta baja se ubican, en su mayoría, motores de alta potencia (50-120HP). Además, esta superficie funciona como área de almacenaje y preparación de producto terminado. En la planta alta se tienen dos líneas de producción extendidas a lo largo de la nave. Ambas plantas se encuentran divididas por un pasillo central que comunica los ambientes y permite el acceso a la maquinaria.

Para el primer grupo de pruebas en la planta alta, el gateway fue colocado en el extremo sur del pasillo, mostrado en la Figura 3, con una altura de 1.5 m con respecto al suelo, mientras que el nodo sensor fue ubicado a diferentes distancias a lo largo del pasillo (Figura 3).

En la segunda planta de la nave principal, se colocó el gateway en el extremo sur a una altura de 1.5 m con respecto al suelo, y el nodo fue colocado alejándolo una distancia de 90 m del gateway.

En las mediciones en la planta alta y baja, se mantuvo una línea de vista entre

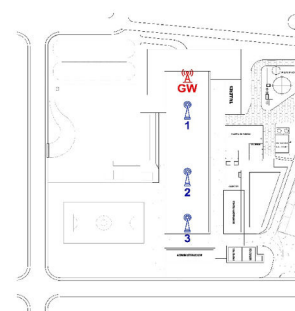


Fig. 3 Distribución del ambiente industrial 1

el nodo sensor y el gateway. En las áreas de medición, se observó un reducido tránsito de personas y maquinaria pesada (montacargas). Es importante mencionar que debido a las restricciones de seguridad, no fue posible realizar mediciones dentro de los límites de las líneas de producción.

**b) Ambiente industrial 2:** La fábrica del ambiente industrial 2 se compone de una nave principal dividida en dos alas (Figura 4). Cada una de estas cuenta con una longitud superior a 100 m y una altura aproximada de 20 m. La fábrica se compone de varias líneas de producción, en las que cada etapa del proceso, se cuenta con una maquinaria diferente, teniendo como principales actuadores a motores de alta potencia (50-120HP).

El gateway fue ubicado en la segunda planta de las oficinas del área técnica a una altura de cuatro metros con respecto al suelo. Desde este punto se logró mantener una línea de vista hacia las ubicaciones de los nodos sensores.

El primer grupo de pruebas se realizó en el ala norte, colocando el nodo sensor a una altura de 1.5 m sobre el suelo. En esta parte de la fábrica se tiene un tráfico moderado de personal y montacargas, mientras que existe una gran cantidad de maquinaria para producción y empaquetado. El segundo grupo de pruebas se las realizó en el ala sur, ubicando el nodo sensor en el extremo este de la nave, y manteniendo la posición del gateway como en las mediciones previas. En esta parte de la fábrica, la maquinaria de producción tiene alturas variables, alcanzando hasta 10 m de altura. En el ala sur, el tránsito de personal y maquinaria es reducido.

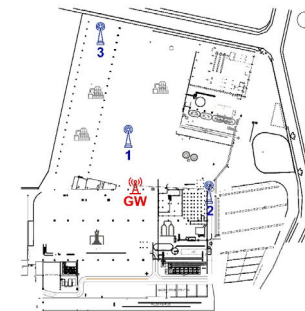


Fig. 4 Distribución del ambiente industrial 2

**c) Ambiente urbano abierto 1:** Las pruebas de control se realizaron con el fin de contrastarlas con mediciones en ambientes industriales, y evaluar sus variaciones. Se eligió el área del ambiente urbano 1, indicada en la Figura 5. Ésta presenta una extensión en un parque, sin obstáculos y un reducido gradiente, permitiendo mantener una línea de vista desde el nodo sensor hasta el gateway.

El gateway fue colocado a una altura de tres metros y el nodo sensor se ubicó a diferentes distancias como se muestra en la Figura 5. En las cercanías del parque no existen fuentes de interferencias visibles (maquinaria, torres celulares, antenas HF). El tráfico de peatones fue reducido durante el periodo de las pruebas.



Fig. 5 Ambiente Urbano Abierto 1

**d) Ambiente urbano abierto 2:** La segunda prueba de control se realizó en otro parque, ubicado en una área urbana al sureste de la ciudad de Cuenca. El parque cuenta con una longitud aproximada de 130 m y un gradiente reducido por lo que permite mantener una línea de vista entre el gateway y el nodo sensor.

El gateway fue colocado en el extremo sur del parque a una altura de 3 m. El nodo fue colocado a diferentes distancias a una altura de 1.5 m (Figura 6). En las cercanías del predio no se presentaron fuentes de interferencia. El tráfico de peatones y vehículos en la zona fue moderado.

**F. Procedimientos**

Los procesos de medición, consistieron en el envío de paquetes desde el nodo sensor (transmisor), manteniendo un factor de ensanchamiento, SF de 7, y una frecuencia

de transmisión constante de 433.175 MHz. Se utilizó un valor de potencia de 16 dB, el máximo permitido por el chip. El equipo transmisor se colocó a una altura de 1.5 m sobre el nivel del suelo. El gateway fue colocado a diferentes alturas para lograr mantener una línea de vista con el nodo sensor, esto en función de las condiciones de los ambientes, como se indica en la Sección IV-E.

En cada punto se transmitieron 100 paquetes, de los cuales se recolectó el RSSI, el SNR y el número de paquete para determinar porcentaje de pérdidas. Por las limitaciones de los equipos empleados no se pudo variar el SF, así como tampoco se pudieron aplicar saltos de frecuencia, debido a que esto no es soportado por el chip del receptor (SX1278) [35].

El transmisor y receptor fueron equipados con una antena de 1 dBi de ganancia y alimentados por medio de baterías de litio conectadas a los respectivos conectores micro-USB.

Las fábricas en las que se realizaron las mediciones en ambientes industriales limitaron el acceso a las instalaciones, debido a estrictas medidas de seguridad. Esto redujo la cantidad de mediciones y los puntos a analizar.



Fig. 6 Ambiente Urbano Abierto 2

**V. RESULTADOS**

La red inalámbrica de sensores empleando la capa física LoRa y la arquitectura LoRaWAN se evaluó en dos ambientes industriales con diferentes instalaciones y distribución de equipos. Así también se realizaron mediciones en dos ambientes de control, en los que no existen obstáculos ni fuentes de interferencia cercanas. Debido a que este es un trabajo en curso, los resultados preliminares de las primeras campañas de medición se presentan a continuación.

Los resultados de SNR (Figura 7) y RSSI (Figura 8) recopilados por el servidor LoRaWAN, muestran niveles similares para los dos ambientes industriales. Esto a pesar de las diferencias entre su maquinaria y la disposición de su infraestructura. Los valores de SNR y RSSI son similares a los medidos por [36] en ambientes urbanos y por [37] en ambientes forestales. En estos casos, los niveles para una distancia aproximada de 100 m bordean un SNR cercano a 10 unidades y el RSSI niveles cercanos a 80 dBm. Los valores de SNR y RSSI permitieron un enlace estable en el que el porcentaje de pérdidas de paquetes se mantuvo por debajo del 6 % para todos los casos (Figura 9).

En las mediciones para los escenarios de control se utilizaron parámetros iguales de configuración tanto en el nodo sensor como en el gateway. Los valores de SNR obtenidos en las mediciones de control, muestran niveles de ruido superiores a los obtenidos en ambientes industriales (Figura 7). Las mediciones de RSSI indican una mayor atenuación en todas las distancias analizadas, esto en comparación con los valores obtenidos dentro de las fábricas.

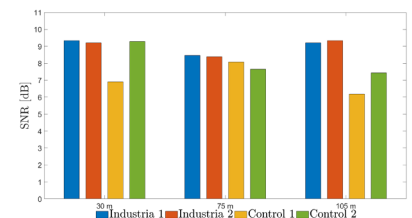


Fig. 7 Resultados de SNR para los ambientes industriales y de control

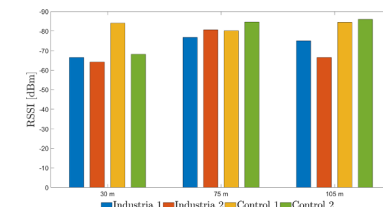


Fig. 8 Resultados de RSSI para los ambientes industriales y de control

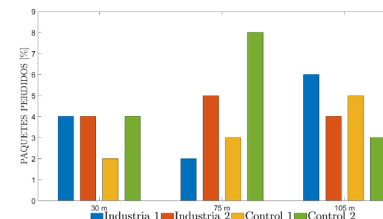


Fig. 9 Resultado de la Tasa de Pérdida de Paquetes

A pesar de las condiciones obtenidas en los ambientes de urbanos abiertos, fue posible establecer un enlace estable con pérdidas de paquetes inferiores al 6 % en la mayoría de los casos.

Los niveles de SNR medidos en los ambientes industriales y urbanos abiertos, indican un posible solapamiento de la señal debido a la propagación multi-camino [38], [39]. En los ambientes industriales, este solapamiento parece afectar de forma constructiva a la señal recibida, debido a las dimensiones y materiales de las naves industriales donde se realizaron las pruebas. En el caso de los parques de los escenarios urbanos abiertos, se observa un solapamiento con efectos de cancelación, provocando los bajos niveles de SNR medidos. El parque elegido como segundo escenario urbano abierto, mostró mejores niveles de SNR y RSSI, en contraste con el primer escenario de control. El segundo parque contaba con una menor área despejada, al estar rodeado por una zona urbana residencial. Estas condiciones afectaron en menor manera el desfase y retardo de la señal. Por las limitaciones de los equipos empleados, se utilizó solo un SF de 7, según [39] esta configuración permite una gran sensibilidad a los efectos de la propagación multi-camino en un canal Rayleigh [40].

## VI. CONCLUSIONES

Los primeros resultados presentados en este trabajo muestran una importante evidencia de la aplicabilidad de la tecnología LoRa y la arquitectura LoRaWAN, en comunicaciones de corto alcance para ambientes industriales. La WSN provee una robustez y escalabilidad adecuada para el monitoreo de eventos recurrentes y aleatorios que influyen en procesos de producción y mantenimiento.

El reducido costo, baja complejidad y seguridad de los nodos sensores y gateways, facilitan su despliegue e inter-operabilidad, sin necesidad de una infraestructura existente.

Las fuentes de ruido e interferencia (motores trifásicos AC, acometidas de alta tensión, estructuras metálicas, redes WAN) identificadas en los ambientes de pruebas, no influyeron de forma considerable en la calidad del enlace, a pesar de que tanto el nodo sensor como el gateway se ubicaron en alturas cercanas al nivel del suelo.

Los parámetros de SNR, RSSI y PER, muestran poca degradación en la calidad del enlace dentro de los ambientes industriales analizados. En contraste, en las pruebas de control, se observó que los ambientes urbanos abiertos 1 y 2, cuentan con niveles considerablemente superiores de SNR, y valores

similares de RSSI y PER. Esto lleva a intuir que la nave metálica de las fábricas atenúa interferencia y ruido del exterior, además de reducir efectos destructivos de la propagación multi-camino, a la cual es más sensible el enlace configurado con un SF de 7.

El chip SX1278 cumplió satisfactoriamente las funciones de transmisor en el nodo sensor. Al ser configurado como gateway, la fiabilidad del chip de la tarjeta Heltec WiFi LoRa, puede disminuir, debido a que no está diseñado para cumplir con estas funciones.

En trabajos futuros se complementarán las campañas iniciales de medición, analizando con mayor detalle los escenarios de control y la cantidad de paquetes y repeticiones por medición. Se ve oportuno además el análisis de los efectos de dispersión multi-camino dentro de naves y estructuras metálicas así como en ambientes urbanos, en especial para SF superiores al analizado en este trabajo. Otro aspecto, sería evaluar la ubicación de gateways en niveles más elevados de las naves industriales, que faciliten una línea de vista desde cualquier punto de las instalaciones. Este trabajo también es un primer paso para evaluar la factibilidad de implementar soluciones industriales concretas basadas en la tecnología LoRa en las industrias locales.

## VII. REFERENCIAS

- [1] V. Gungor and G. Hancke, "Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4258-4265, Oct. 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4796311/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [2] L. Li, J. Ren, and Q. Zhu, "On the application of LoRa LPWAN technology in Sailing Monitoring System," in 2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS). Jackson, WY, USA: IEEE, Feb. 2017, pp. 77-80. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7888762/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [3] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, "Wireless sensor networks, ser. Ian F. Akyildiz series in communications and networking. Chichester, West Sussex, U.K. ; Hoboken, NJ: Wiley, 2010, oCLC: ocn564132645.
- [4] T. Lennvall, S. Svensson, and F. Hekland, "A comparison of WirelessHART and ZigBee for industrial applications," in 2008 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems. Dresden, Germany: IEEE, May 2008, pp. 85-88. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4638746/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [5] S. Lin, J. Liu, and Y. Fang, "ZigBee Based Wireless Sensor Networks and Its Applications in Industrial," in 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Jinan, China: IEEE, Aug. 2007, pp. 1979-1983. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4338898/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [6] S. Devalal and A. Karthikeyan, "LoRa Technology - An Overview," in 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). Coimbatore: IEEE, Mar. 2018, pp. 284-290. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8474715/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [7] M. Rizzi, P. Ferrari, A. Flammini, E. Sisinni, and M. Gidlund, "Using LoRa for industrial wireless networks," in 2017 IEEE 13th International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). Trondheim, Norway: IEEE, May 2017, pp. 1-4. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7991972/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [8] L. Leonardi, F. Battaglia, G. Patti, and L. L. Bello, "Industrial LoRa: A Novel Medium Access Strategy for LoRa in Industry 4.0 Applications," in IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Washington, DC: IEEE, Oct. 2018, pp. 4141-4146. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8591568/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [9] V. J. Hodge, S. O'Keefe, M. Weeks, and A. Moulds, "Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 1088-1106, Jun. 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6963375/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [10] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855-873, 2017. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7815384/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [11] M. Aref and A. Sikora, "Free space range measurements with semtech lora™ technology," in 2014 2nd International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, 2014, pp. 19-23.
- [12] S. Daud, T. S. Yang, M. A. Romli, Z. A. Ahmad, N. Mahrom, and R. A. A. Raof, "Performance Evaluation of Low Cost LoRa Modules in IoT Applications," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 318, p. 012053, Mar. 2018. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/318/1/012053> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [13] LoRa-Alliance, "About LoRaWAN® | LoRa Alliance®," 2020. [Online]. Available: <https://loro-alliance.org/about-lorawan> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [14] R. F. A. M. Nor, F. H. K. Zaman, and S. Mubdi, "Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN," in 2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC). SHAH ALAM, Malaysia: IEEE, Aug. 2017, pp. 132-137. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8070582/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [15] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, "Understanding the Limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, 2017. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8030482/>
- [16] L. Casals, B. Mir, R. Vidal, and C. Gomez, "Modeling the Energy Performance of LoRaWAN," *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2364, Oct. 2017. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2364> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [17] S.-I. Toc and A. Korodi, "Modbus-OPC UA Wrapper Using Node-RED and IoT-2040 with Application in the Water Industry," in 2018 IEEE 16th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY). Subotica: IEEE, Sep. 2018, pp. 000 099-000 104. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8524749/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [18] K. Al Agha, M.-H. Bertin, T. Dang, A. Guitton, P. Minet, T. Val, and J.-B. Viollet, "Which Wireless Technology for Industrial Wireless Sensor Networks? The Development of OCARI Technology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4266-4278, Oct. 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5173521/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [19] L. Tessaro, C. Raffaldi, M. Rossi, and D. Brunelli, "LoRa Performance in Short Range Industrial Applications," in 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). Amalfi: IEEE, Jun. 2018, pp. 1089-1094. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8445392/> [Accessed: Oct.22, 2020].

- [20] F. Gui, Y. Yin, and A. Lu, "Research on ship wireless communication technology based on lora," in 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communication, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2018, pp. 976–979.
- [21] A. Nessa, F. Hussain, and X. Fernando, "Adaptive latency reduction in lora for mission critical communications in mines," in 2020 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS), 2020, pp. 1–7.
- [22] P. Branch and T. Cricenti, "A lora relay based system for detonating explosives in underground mines," in 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2020, pp. 259–264.
- [23] M. O. Farooq and D. Pesch, "Analyzing lora: A use case perspective," in 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). IEEE, 2018, pp. 355–360.
- [24] A. Lavric and V. Popa, "Internet of things and lora™ low-power wide-area networks: a survey," in 2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS). IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [25] R. S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang, "A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot," *Ict Express*, vol. 3, no. 1, pp. 14–21, 2017.
- [26] T. Bouguera, J.-F. Diouris, J.-J. Chaillout, R. Jaouadi, and G. Andrieux, "Energy consumption model for sensor nodes based on lora and lora-wan," *Sensors*, vol. 18, no. 7, p. 2104, 2018.
- [27] L. Casals, B. Mir, R. Vidal, and C. Gomez, "Modeling the energy performance of lorawan," *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2364, 2017.
- [28] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, "A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, 2016.
- [29] J. de Carvalho Silva, J. J. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic, and A. L. Aquino, "Lorawan—a low power wan protocol for internet of things: A review and opportunities," in 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech). IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [30] P. San Cheong, J. Bergs, C. Hawinkel, and J. Famaey, "Comparison of lorawan classes and their power consumption," in 2017 IEEE symposium on communications and vehicular technology (SCVT). IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [31] H. Automation, "WIFI LoRa 32 (V2)." [Online]. Available: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [32] F. R. Pi, "Raspberry Pi 3 Model B – Raspberry Pi." [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [33] "Cayenne Docs." [Online]. Available: <https://developers.mydevices.com/cayenne/docs/lora/lora-cayenne-low-power-payload>
- [34] V. Cola, "vpcola/ESP32SingleChannelGateway," Sep.2020, original-date: 2018-03-03T06:38:08Z. [Online]. Available: <https://github.com/vpcola/ESP32SingleChannelGateway> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [35] "SX1278 | 137MHz to 525MHz Long Range Low Power Transceiver | Semtech." [Online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1278> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [36] C. L. Carrión, "Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos con LoRaWAN en ambientes urbanos," Tesis de grado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2018. [Accessed: Oct.22, 2020].
- [37] P. Avila, "Evaluación del Rango de Transmisión de LoRa para Redes de Sensores Inalámbricas con LoRaWAN en Ambientes Forestales," Tesis de grado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2017. [Accessed: Oct.22, 2020].
- [38] Y. Ai, M. Cheffena, and Q. Li, "Radio frequency measurements and capacity analysis for industrial indoor environments," in 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2015, pp. 1–5. [Accessed: Oct.22, 2020].
- [39] K. Staniec and M. Kowal, "LoRa Performance under Variable Interference and Heavy-Multipath Conditions," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, Article ID 6931083, Apr. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2018/6931083>
- [40] B. Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. i. characterization," *IEEE Communications magazine*, vol. 35, no. 7, pp. 90–100, 1997.

# AUTHORS

## Adrián E. Heredia



Recibió el título de tercer nivel en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador en 2020. Participó en el programa internacional "Seeds for the Future" de Huawei Technologies, Shenzhen, China en 2018. Sus intereses de investigación incluyen redes móviles, redes de sensores inalámbricos y ciberseguridad.

## Paúl F. Lucero

Recibió el título de tercer nivel en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador en 2020. Sus intereses de investigación incluyen redes móviles, redes de sensores inalámbricos, redes industriales, sistemas de transmisión por fibra óptica, microondas, enlaces satelitales, automatización, ciberseguridad, cloud computing y Tecnologías de la información.



## Fabián Astudillo Salinas



Recibió el título de tercer nivel en Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, en 2007, y los grados de MSc. y Ph.D del "Institut National Polytechnique de Toulouse", Toulouse, Francia, en 2009 y 2013, respectivamente. Desde 2013 es Investigador a Tiempo Completo del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. Sus intereses de investigación incluyen redes de sensores inalámbricos, redes vehiculares, simulación de redes, ciberseguridad y HPC.

## Andrés Vázquez Rodas

Recibió el grado de Ingeniero Electrónico en el año 2004 de la Universidad Politécnica Salesiana Cuenca - Ecuador, el grado de Master en Telemática (con honores) de la Universidad de Cuenca - Ecuador in 2010, y el grado de Ph.D. del Departamento de Ingeniería Telemática de la Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech (UPC), España en 2015. Desde el 2015, es profesor a tiempo completo en la Universidad de Cuenca en el Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (DEET). Sus intereses de investigación incluyen redes inalámbricas malladas, redes inalámbricas de sensores, redes industriales y sistemas complejos.





---

---

## Bibliografía

- [1] K. Schwab y W. E. Forum, *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum, 2016. [En línea]. Disponible: <https://books.google.com.ec/books?id=mQQwjwEACAAJ>
- [2] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, y T. Watson, “The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework,” *Computers in Industry*, vol. 101, pp. 1–12, Oct. 2018. [En línea]. Disponible: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0166361517307285>
- [3] G. Zhao, “Wireless Sensor Networks for Industrial Process Monitoring and Control: A Survey,” *Network Protocols and Algorithms*, vol. 3, num. 1, Abr. 2011. [En línea]. Disponible: <http://www.macrothink.org/journal/index.php/npa/article/view/580>
- [4] A. Gilchrist, *Industry 4.0*. Berkeley, CA: Apress, 2016. [En línea]. Disponible: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4842-2047-4>
- [5] L. Leonardi, F. Battaglia, G. Patti, y L. L. Bello, “Industrial LoRa: A Novel Medium Access Strategy for LoRa in Industry 4.0 Applications,” in *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Washington, DC: IEEE, Oct. 2018, pp. 4141–4146. [En línea]. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8591568/>
- [6] A. J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadinia, y N. Strachan, “Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks,” in *2016 IEEE SENSORS*. IEEE, 2016, pp. 1–3.
- [7] M. r. Akhondi, A. Talevski, S. Carlsen, y S. Petersen, “Applications of Wireless Sensor Networks in the Oil, Gas and Resources Industries,” in *2010 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. Perth, Australia: IEEE, 2010, pp. 941–948. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5474813/>
- [8] S. Devalal y A. Karthikeyan, “LoRa Technology - An Overview,” in *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. Coimbatore: IEEE, Mar. 2018, pp. 284–290. [En línea]. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8474715/>
- [9] S. Daud, T. S. Yang, M. A. Romli, Z. A. Ahmad, N. Mahrom, y R. A. A. Raof, “Performance Evaluation of Low Cost LoRa Modules in IoT Applications,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 318, p. 012053, Mar. 2018. [En línea]. Disponible: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/318/1/012053>
- [10] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, y T. Watteyne, “Understanding the Limits of LoRaWAN,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, num. 9, pp. 34–40, 2017. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8030482/>





- [11] M. Rizzi, P. Ferrari, A. Flammini, E. Sisinni, y M. Gidlund, "Using LoRa for industrial wireless networks," in *2017 IEEE 13th International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. Trondheim, Norway: IEEE, May 2017, pp. 1–4. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7991972/>
- [12] J. Imtiaz y J. Jasperneite, "Scalability of OPC-UA down to the chip level enables 'Internet of Things'," in *2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Bochum, Germany: IEEE, Jul. 2013, pp. 500–505. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6622935/>
- [13] S. Jeschke, C. Brecher, T. Meisen, D. Özdemir, y T. Eschert, "Industrial internet of things and cyber manufacturing systems," in *Industrial internet of things*. Springer, 2017, pp. 3–19.
- [14] E. Sisinni, A. Saifullah, S. Han, U. Jennehag, y M. Gidlund, "Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, num. 11, pp. 4724–4734, 2018.
- [15] D. Zorbas, K. Abdelfadeel, P. Kotzanikolaou, y D. Pesch, "Ts-lora: Time-slotted lorawan for the industrial internet of things," *Computer Communications*, vol. 153, pp. 1–10, 2020.
- [16] F. J. Grión, G. O. Petracca, D. F. Lipuma, y E. R. Amigó, "Lora network coverage evaluation in urban and densely urban environment simulation and validation tests in autonomous city of buenos aires," in *2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, 2017, pp. 1–5.
- [17] A. Seferagić, J. Famaey, E. De Poorter, y J. Hoebeke, "Survey on wireless technology trade-offs for the industrial internet of things," *Sensors*, vol. 20, num. 2, p. 488, 2020.
- [18] I. F. Akyildiz y M. C. Vuran, *Wireless sensor networks*, ser. Ian F. Akyildiz series in communications and networking. Chichester, West Sussex, U.K. ; Hoboken, NJ: Wiley, 2010, oCLC: ocn564132645.
- [19] I. F. Akyildiz, T. Melodia, y K. R. Chowdhury, "A survey on wireless multimedia sensor networks," *Computer Networks*, vol. 51, num. 4, pp. 921–960, Mar. 2007. [En línea]. Disponible: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389128606002751>
- [20] Kay Soon Low, W. Win, y Meng Joo Er, "Wireless Sensor Networks for Industrial Environments," in *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, vol. 2. Vienna, Austria: IEEE, 2005, pp. 271–276. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1631480/>
- [21] L. Yong-Min, W. Shu-Ci, y N. Xiao-Hong, "The architecture and characteristics of wireless sensor network," in *2009 International Conference on Computer Technology and Development*, vol. 1. IEEE, 2009, pp. 561–565.
- [22] M. O. Farooq y D. Pesch, "Analyzing lora: A use case perspective," in *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. IEEE, 2018, pp. 355–360.
- [23] A. Lavric y V. Popa, "Internet of things and lora™ low-power wide-area networks: a survey," in *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*. IEEE, 2017, pp. 1–5.



- [24] R. S. Sinha, Y. Wei, y S.-H. Hwang, "A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot," *Ict Express*, vol. 3, num. 1, pp. 14–21, 2017.
- [25] L. Alliance, "Lorawan 1.1 regional parameters," *technical specification*, 2017.
- [26] T. Bouguera, J.-F. Diouris, J.-J. Chaillout, R. Jaouadi, y G. Andrieux, "Energy consumption model for sensor nodes based on lora and lorawan," *Sensors*, vol. 18, num. 7, p. 2104, 2018.
- [27] L. Casals, B. Mir, R. Vidal, y C. Gomez, "Modeling the energy performance of lorawan," *Sensors*, vol. 17, num. 10, p. 2364, 2017.
- [28] D. Bankov, E. Khorov, y A. Lyakhov, "On the limits of lorawan channel access," in *2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*. IEEE, 2016, pp. 10–14.
- [29] J. M. Marais, R. Malekian, y A. M. Abu-Mahfouz, "Lora and lorawan testbeds: A review," in *2017 Ieee Africon*. IEEE, 2017, pp. 1496–1501.
- [30] J. de Carvalho Silva, J. J. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic, y A. L. Aquino, "Lorawan—a low power wan protocol for internet of things: A review and opportunities," in *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [31] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, y W. M. Townsley, "A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things," *Sensors*, vol. 16, num. 9, p. 1466, 2016.
- [32] P. San Cheong, J. Bergs, C. Hawinkel, y J. Famaey, "Comparison of lorawan classes and their power consumption," in *2017 IEEE symposium on communications and vehicular technology (SCVT)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [33] S. Cavalieri y F. Chiacchio, "Analysis of opc ua performances," *Computer Standards & Interfaces*, vol. 36, num. 1, pp. 165–177, 2013.
- [34] W. Mahnke, S.-H. Leitner, y M. Damm, *OPC unified architecture*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [35] S.-H. Leitner y W. Mahnke, "Opc ua—service-oriented architecture for industrial applications," *ABB Corporate Research Center*, vol. 48, pp. 61–66, 2006.
- [36] P. Hunkar, "Opc ua vs opc classic."
- [37] J. Avilés, A. Arreguín, F. Ambríz, J. Cano, y M. Rodriguez, "Interfaz electrónica para monitoreo de equipos industriales empleando tecnología opc."
- [38] S. Grüner, J. Pfrommer, y F. Palm, "Restful industrial communication with opc ua," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, num. 5, pp. 1832–1841, 2016.
- [39] M. Stopper y B. Katalinic, "Service-oriented architecture design aspects of opc ua for industrial applications," in *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, vol. 2. Citeseer, 2009, pp. 18–20.
- [40] L.-C. Hwang, C.-S. Chen, T.-T. Ku, y W.-C. Shyu, "A bridge between the smart grid and the internet of things: Theoretical and practical roles of lora," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 113, pp. 971–981, 2019.



- [41] M. Anjum, M. A. Khan, S. A. Hassan, A. Mahmood, y M. Gidlund, "Analysis of rssi fingerprinting in lora networks," in *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*. IEEE, 2019, pp. 1178–1183.
- [42] R. E. Walpole, R. H. Myers, y S. L. Myers, *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Pearson Educación, 1999.
- [43] D. C. Montgomery y G. C. Runger, "Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería," *Editorial McGraw-hill*, 1996.
- [44] L. Tessaro, C. Raffaldi, M. Rossi, y D. Brunelli, "LoRa Performance in Short Range Industrial Applications," in *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. Amalfi: IEEE, Jun. 2018, pp. 1089–1094. [En línea]. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8445392/>
- [45] F. Gui, Y. Yin, y A. Lu, "Research on ship wireless communication technology based on lora," in *2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, 2018, pp. 976–979.
- [46] A. Nessa, F. Hussain, y X. Fernando, "Adaptive latency reduction in lora for mission critical communications in mines," in *2020 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*, 2020, pp. 1–7.
- [47] O. Khutsoane, B. Isong, N. Gasela, y M. Abu-Mahfouz, "Watergrid-sense: A lora-based sensor node for industrial iot applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, num. 5, pp. 2722–2729, 2019.
- [48] J. Haxhibeqiri, A. Karaagac, F. Van den Abeele, W. Joseph, I. Moerman, y J. Hoebeke, "Lora indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study," in *2017 22nd IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)*. IEEE, 2017, pp. 1–8.
- [49] P. Branch y T. Cricenti, "A lora relay based system for detonating explosives in underground mines," in *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2020, pp. 259–264.
- [50] M. V. García, E. Irisarri, y F. Pérez, "Integración vertical en plantas industriales utilizando opc ua e iec-61499," *Enfoque UTE*, vol. 8, pp. 287–299, 2017.
- [51] W. Kim y M. Sung, "Standalone opc ua wrapper for industrial monitoring and control systems," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 36 557–36 570, 2018.
- [52] M. F. Rohani, N. A. Ahmad, S. Sahibuddin, y S. M. Daud, "Opc protocol application for real-time carbon monitoring system for industrial environment," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 7, num. 2, p. 1051, 2017.
- [53] M. S. Rocha, G. S. Sestito, A. L. Dias, A. C. Turcato, D. Brandão, y P. Ferrari, "On the performance of opc ua and mqtt for data exchange between industrial plants and cloud servers," *Acta IMEKO*, vol. 8, num. 2, pp. 80–87, 2019.
- [54] M. Siponen y otros, "Next generation task controller for agricultural machinery using opc unified architecture," 2019.



- [55] P. Piirainen, “Opnua based remote access to agricultural field machines,” Ph.D. dissertation, Master’s thesis, Aalto University School of Electrical Engineering, 2014.
- [56] J. Miranda, J. Cabral, S. Banerjee, D. Grossmann, C. F. Pedersen, y S. R. Wagner, “Analysis of opn unified architecture for healthcare applications,” in *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [57] “WIFI LoRa 32 (V2).” [En línea]. Disponible: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>
- [58] F. R. Pi, “Raspberry Pi 3 Model B – Raspberry Pi.” [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- [59] “Arduino Clock with Neopixel Ring Animation.” [En línea]. Disponible: <https://create.arduino.cc/projecthub/sfrwaker/arduino-clock-with-neopixel-ring-animation-ff3422>
- [60] LoRa-Alliance, “About LoRaWAN® | LoRa Alliance®,” 2020. [En línea]. Disponible: <https://loro-alliance.org/about-lorawan>
- [61] “Cayenne Docs.” [En línea]. Disponible: <https://developers.mydevices.com/cayenne/docs/lora/#lora-cayenne-low-power-payload>
- [62] V. Cola, “ESP32SingleChannelGateway,” Sep. 2020, original-date: 2018-03-03T06:38:08Z. [En línea]. Disponible: <https://github.com/vpcola/ESP32SingleChannelGateway>
- [63] “SX1278 | 137MHz to 525MHz Long Range Low Power Transceiver | Semtech.” [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1278>
- [64] C. L. Carrión, “Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos con LoRaWAN en ambientes urbanos,” Tesis de grado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2018.
- [65] P. Avila, “Evaluación del Rango de Transmisión de LoRa para Redes de Sensores Inalámbricos con LoRaWAN en Ambientes Forestales,” Tesis de grado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2017.
- [66] Y. Ai, M. Cheffena, y Q. Li, “Radio frequency measurements and capacity analysis for industrial indoor environments,” in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2015, pp. 1–5.
- [67] K. Staniec y M. Kowal, “LoRa Performance under Variable Interference and Heavy-Multipath Conditions,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, p. 6931083, Abr. 2018. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1155/2018/6931083>
- [68] B. Sklar, “Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. i. characterization,” *IEEE Communications magazine*, vol. 35, num. 7, pp. 90–100, 1997.
- [69] T. Voigt y M. Bor, “LoRaSim,” 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.lancaster.ac.uk/scc/sites/lora/lorasim.html>
- [70] P. Gotthard, “lorawan-server,” Oct. 2020, original-date: 2016-07-28T11:39:00Z. [En línea]. Disponible: <https://github.com/gotthardp/lorawan-server>
- [71] N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, y O. Hersent, “Lorawan specification,” *LoRa alliance*, 2015.
- [72] B. Royal, “node-red-contrib-opcua-server,” May 2020, original-date: 2019-02-26T07:41:25Z. [En línea]. Disponible: <https://github.com/BiancoRoyal/node-red-contrib-opcua-server>