



**INFOTEC CENTRO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN
EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y
COMUNICACIÓN**

“GATEWAY LoRa para la PLATAFORMA CLOUDINO”

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROYECTO LABORAL
Que para obtener el grado de MAESTRO en SISTEMAS EMBEBIDOS

Presenta:

Carlos Isaac Ramos Incháustegui

Asesor:

Dr. Daniel Villanueva Vásquez

Ciudad de México, septiembre de 2019.



AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN Y NO ADEUDO EN BIBLIOTECA
MAESTRÍA EN SISTEMAS EMBEBIDOS

Ciudad de México, 11 de octubre de 2019
INFOTEC-DAIC-GCH-SE-0105/19.

La Gerencia de Capital Humano / Gerencia de Investigación hacen constar que el trabajo de titulación intitulado

GATEWAY LORA PARA LA PLATAFORMA CLOUDINO

Desarrollado por el alumno **Carlos Isaac Ramos Incháustegui** y bajo la asesoría del **Dr. Daniel Villanueva Vásquez**; cumple con el formato de biblioteca. Por lo cual, se expide la presente autorización para impresión del proyecto terminal al que se ha hecho mención.

Asimismo se hace constar que no debe material de la biblioteca de INFOTEC.

Vo. Bo.


Mtra. Julieta Alebar Hermsillo
Coordinadora de biblioteca

***Anexar a la presente autorización al inicio de la versión impresa del trabajo referido que ampara la misma.**

Agradecimientos

Agradezco a Infotec por brindarme la valiosa oportunidad de realizar mis estudios de maestría, permitiéndome afianzar nuevos conocimientos y mejorar mi competencia profesional. Así mismo, agradezco a Javier Solís González y a Daniel Villanueva Vásquez por toda la confianza brindada y compartir sus valiosos conocimientos técnicos y científicos en su carácter de Líder y Asesor académico respectivamente. Agradezco también el apoyo incondicional de mi querida familia que hizo posible la culminación de esta maestría.

Muchas gracias.

Carlos Isaac

Tabla de contenido

Introducción	1
Capítulo 1: Planeación del proyecto	5
1.1 Objetivos.....	5
1.1.1 Objetivo general	5
1.1.2 Objetivos específicos	6
1.2 Especificación del problema	6
1.3 Análisis de requerimientos	9
1.3.1 Requerimientos Funcionales	10
1.3.2 Requerimientos No Funcionales.....	12
1.4 Descripción de la solución tecnológica propuesta.....	13
1.5 Modelo de desarrollo	17
1.5.1 Arquitectura del Sistema	17
1.6 Estándares, registros y patentes	21
Capítulo 2: Análisis y diseño de la solución tecnológica propuesta.....	24
2.1 Hardware para gateway y nodo terminal.....	25
2.1.1 Transceptor SX1276	27
2.1.2 Antena.....	28
2.2 Plataforma Cloudino.....	28
2.3 Protocolos de comunicación	32
2.3.1 Protocolo Basado en Diccionario.....	33
2.4 Librerías	33
2.5 Packet Forwarder	34
2.6 Diseño de la solución tecnológica propuesta	36
Capítulo 3: Desarrollo del Gateway LoRa para la Plataforma Cloudino	39
3.1 Integración del Hardware	39
3.2 Producción de la solución tecnológica propuesta	40
3.2.1 Implementación del Protocolo Basado en Diccionario	41
3.2.2 Implementación del Packet Forwarder.....	42
Capítulo 4: Pruebas y resultados	46
4.1 Pruebas; verificación; y validación de la solución tecnológica propuesta.....	46
4.2 Plan de mantenimiento y mejoras	53
Capítulo 5: Impacto social y económico del proyecto.....	56
5.1 Caso de Uso Estacionamiento Inteligente	58
5.2 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire	59
Conclusiones	61

Bibliografía	64
Anexos	68
Anexo I.....	68

Índice de figuras

FIGURA 1. TOPOLOGÍA STAR DE UNA RED LORA.	8
FIGURA 2. EL WIRELESS LGWC ACTUARÁ COMO LA COLUMNA VERTEBRAL DE ESTA RED.	15
FIGURA 3. ARQUITECTURA IOT PROPUESTA.	19
FIGURA 4. UPLINKS IMPLEMENTADOS CON CLOUDINO LIBRARY.	20
FIGURA 5. DOWNLINKS IMPLEMENTADOS CON CLOUDINO LIBRARY.	20
FIGURA 6. PLACA ELECTRÓNICA O PCB HELTEC WiFi LoRa 32 V2 BASADA EN ESP32 + SX127x. CORTESÍA HELTEC AUTOMATION™.	26
FIGURA 7. ANTENA PARA LA BANDA DE 915 MHZ CON CONEXIÓN I-PEX.	28
FIGURA 8. IMAGEN DEL CLOUDINO WiFi CONNECTOR. VISTA FRONTAL DE LA TARJETA. CORTESÍA INFOTEC.	30
FIGURA 9. UNA VEZ CONECTADO A LA RED WiFi DEL CWC, SE PUEDE ACCEDER A LA APLICACIÓN DE CONFIGURACIÓN UTILIZANDO UN NAVEGADOR WEB E INGRESANDO A LA DIRECCIÓN HTTP://192.168.4.1 .	32
FIGURA 10. EL PACKET FORWARDER SE ENCUENTRA INSTALADO EN EL GATEWAY.	35
FIGURA 11. FORMATO FÍSICO DE MENSAJES UPLINK.	36
FIGURA 12. FORMATO FÍSICO DE MENSAJES DOWNLINK.	37
FIGURA 13. ESTRUCTURA DE LA CAPA MAC	37
FIGURA 14. INTEGRACIÓN DEL HARDWARE PARA IMPLEMENTAR EL WIRELESS LoRa GATEWAY CLOUDINO Y UN NODO FINAL.	39
FIGURA 15. CAPAS QUE INTEGRAN EL SOFTWARE EMBEBIDO DEL PACKET FORWARD DEL WIRELESS LGWC.	43
FIGURA 16. SESIÓN INICIADA EN CLOUDINO SERVER EN WWW.CLOUDINO.IO .	47
FIGURA 17. SE ESTABLECIERON VALORES PARA EL NOMBRE Y DESCRIPCIÓN DEL GATEWAY CON LGWC 01 Y WIRELESS LoRa GATEWAY CLOUDINO 01, RESPECTIVAMENTE.	48
FIGURA 18. EL WIRELESS LGWC, ESTÁ CONECTADO A CLOUDINO SERVER A TRAVÉS DE SU CONECTOR CWC.	48
FIGURA 19. WIRELESS LGWC EN PLENO FUNCIONAMIENTO.	49
FIGURA 20. IMÁGENES DEL NODO FINAL. (A) VISTA GENERAL DEL NODO MONTADO EN EL TRIPIÉ. (B) OTRA LOCALIDAD DE MEDICIÓN. (C) DETALLE DEL MONTAJE DEL NODO EN EL TRIPIÉ, (D) DETALLE PARA OBSERVAR INFORMACIÓN DEL ENVÍO DE UN MENSAJE.	50
FIGURA 21. MENSAJES TRANSMITIDOS DESDE NODO FINAL.	50
FIGURA 22. RECEPCIÓN EN CLOUDINO SERVER DE MENSAJES UPLINKS DE PRUEBA. (A) MENSAJES UPLINK DE PRUEBA, DE TIPO “HOLA”, MOSTRADOS EN LA CONSOLA DE CLOUDINO, (B) MENSAJES UPLINK DE PRUEBA, DE TIPO “VALOR”, MOSTRADOS EN LA CONSOLA DE CLOUDINO.	51
FIGURA 23. ENVÍO, DESDE LA CONSOLA DE CLOUDINO SERVER, DE MENSAJES DOWNLINKS DE PRUEBA. (A) ENVÍO DE UN MENSAJE DOWNLINK DE PRUEBA CON EL TÓPICO PKFWR 245. (B) ENVÍO DE UN MENSAJE DOWNLINK DE PRUEBA CON EL TÓPICO PKFWR 447.	52
FIGURA 24. CRONOGRAMA DE DESARROLLO DEL WIRELESS LGWC, AGRUPADAS POR ETAPAS. ACTUALMENTE, ESTE PROYECTO IMPLEMENTÓ LA ETAPA 1.	54
FIGURA 25. ADECUACIÓN DE NODOS FINALES A TOPES (A) Y BOLARDOS EN (B) INSTALADOS EN CADA UNO DE LOS CAJONES DE ESTACIONAMIENTO PARA CONSTRUIR LA RED LoRa QUE AGILIZA EL FLUJO EN EL ESTACIONAMIENTO POR COMPLETO.	58
FIGURA 26. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO HELTEC WiFi LoRa 32 V2. CORTESÍA HELTEC AUTOMATION. CORTESÍA HELTEC AUTOMATION.	68
FIGURA 27. DIAGRAMA DEL CHIP ESP32. CORTESÍA HELTEC AUTOMATION.	69
FIGURA 28. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CHIP SX1276. CORTESÍA HELTEC AUTOMATION.	69
FIGURA 29. HEADER. PINES DE LA HELTEC WiFi LoRa 32 V2. CORTESÍA HELTEC AUTOMATION.	70
FIGURA 30. DIAGRAMA PINOUT HELTEC WiFi LoRa 32 V2. CORTESÍA HELTEC AUTOMATION.	71
FIGURA 31. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO CLOUDINO WiFi CONNECTOR. CORTESÍA INFOTEC.	72

Índice de cuadros

CUADRO 1. DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA LGW_PKT_S PARA REGISTRAR LOS OBJETOS DEL DICCIONARIO.	42
CUADRO 2. FRAGMENTO DE CÓDIGO DEL PACKET FORWARDER.	44

Índice de tablas

TABLA 1. LISTA DE ARTEFACTOS GENÉRICOS PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO	24
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LA HELTEC WIFI LORA 32 V2 EMPLEADA EN EL PROYECTO.	25
TABLA 3. PRINCIPALES FUNCIONES DE LA LIBRERÍA LGWC_HAL.	40

Siglas y abreviaturas

Este documento hace uso de las siguientes abreviaturas y acrónimos

Abreviatura	Acrónimo
ABP	Activation by Personalization
ACK	Acknowledge (Acuse de recibido)
BLE	Bluetooth Low Energy
CPS	Cyber Physical System
CWC	Cloudino WiFi Connector
DR	Data Rate
IoT	Internet of Things (Internet de las Cosas)
IP	Protocolo de Internet versión 4 (IPv4)
IPv6	Protocolo de Internet versión 6
IT	Information Technology
Igw	LoRa Gateway
LGWC	LoRa Gateway Cloudino
LPWAN	Low-Power Wide Area Network
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Media Access Control
NLOS	Non-line-of-sight (Sin línea de Visión)
NS	Network Server
OT	Operational Technology
OTA	Over The Air
OTAA	Over The Air Activation
PA	Power Amplifier
PaaS	Platform as a Service (Plataforma como Servicio)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impreso)
PF	Packet Forwarder
RF	Radio frequency (Radio frecuencia)
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

Introducción

“Los gateways IoT unen las cosas y las plataformas IoT...”

Nicolás Windpassinger

Autor del libro *“Digitize or Die”*

Las plataformas de Internet of Things¹ (IoT) están ligadas a componentes conocidos como gateways IoT. Para llevar finalmente a las personas los beneficios ampliamente divulgados del IoT², esto es, acceder fácilmente a los datos emergentes de las “cosas” del entorno cotidiano, estos gateways tienen que situarse en medio de estas “cosas”³.

Los gateways IoT ofrecen una solución elegante para conectar las “cosas” a Internet porque proveen una abstracción a diversos métodos de conexión ocasionados por diferencias tecnológicas o porque los costos de conexión punto a punto tienden a inflarse.

De acuerdo a Cisco⁴, IoT representa la próxima evolución de Internet, también lo expresa Petrolò⁵, pero existen varias dificultades que se deben resolver antes. Algunas de estas son, el costo de la comunicación, y las áreas de cobertura, es decir, los dispositivos finales deben transmitir los datos adquiridos, por sus sensores, a grandes distancias utilizando una tecnología de bajo consumo.

Estas dificultades, representan retos tecnológicos que tienen que ver directamente con las distancias de comunicación y con el consumo de energía para mantener los dispositivos funcionando de manera autónoma durante períodos

¹ P. P. Ray, “A survey of IoT cloud platforms,” *Futur. Comput. Informatics J.*, vol. 1, no. 1–2, pp. 35–46, 2017.

² L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “The Internet of Things: A survey,” *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.

³ S. K. Datta, C. Bonnet, and N. Nikaein, “An IoT gateway centric architecture to provide novel M2M services,” 2014 IEEE World Forum Internet Things, WF-IoT 2014, pp. 514–519, 2014.

⁴ Para más información sobre Cisco, puede consultar el sitio oficial <https://www.cisco.com>. [Accessed: 26-Jun-2019].

⁵ R. Petrolò, R. Morabito, V. Loscrì, and N. Mitton, “The design of the gateway for the Cloud of Things,” *Ann. des Telecommun. Telecommun.*, vol. 72, no. 1–2, pp. 31–40, 2017.

prolongados. Por ejemplo, el uso de la telecomunicación celular como *Global System for Mobile (GSM)*, *General Packet Radio Service (GPRS)*, 3G y, 4G/LTE ⁶ puede llegar a resolver el problema de las distancias en áreas que cuentan con cobertura pero en muchas ocasiones resulta inservible, como sucede en el caso de campos de cultivo, carreteras, parques nacionales, etc. Además, consume demasiada energía considerando el tema de la autonomía de los dispositivos ciberfísicos⁷.

A principios de la década, las tecnologías de radiofrecuencia de bajo consumo y de corto alcance fueron empleadas en las redes de sensores inalámbricos realizando enrutamientos tipo *multi-hop* para superar las limitaciones del rango de transmisión⁸. Pero, en los últimos años han surgido nuevas tecnologías de radiofrecuencia basadas en nuevos paradigmas de modulación, conocidas como *Low Power Wide Area Network (LPWAN)* ⁹ que abarcan grandes distancias sin necesidad de retransmisiones, superando varios kilómetros aún en condiciones NLOS¹⁰.

LPWAN comprende un conjunto de tecnologías de comunicación inalámbricas diseñadas para realizar implementaciones de IoT¹¹. Estas tecnologías están diseñadas para ofrecer características que incluyen conectividad de área amplia y escala masiva para dispositivos de baja potencia, bajo costo y baja velocidad de datos. LoRa¹² es una de estas tecnologías LPWAN, que se ha hecho

⁶ Honghao Gao • Yuyu Yin Xiaoxian Yang • Huaikou Miao (Eds.), "Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities,". 13th EAI International Conference, TridentCom 2018, Shanghai, China, December 1-3, 2018. Springer. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12971-2>. [Accessed: 23-Jun-2019].

⁷ H. Kopetz, *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*. 2011.

⁸ Richard Zurawski, *Networked Embedded Systems*, 2nd Editio. CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. También revisar la obra de L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.

⁹ J. Nordlöf and P. Lagusson, "A Study of Low-Power Wide-Area Networks and an In-Depth Study of the LoRaWAN Standard," p. 108, 2017.

¹⁰ C. P. B, "Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities," vol. 177, pp. 70–80, 2017.

¹¹ W. Ayoub, A. E. Samhat, F. Nouvel, M. Mroue, and J. C. Prévotet, "Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1561–1581, 2019.

¹² L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures," vol. 159, pp. 51–58, 2015.

muy popular en los últimos años por permitir construir redes públicas de distintas aplicaciones, alimentando la expectativa de ser pieza clave en el desarrollo del IoT¹³.

La necesidad de gateways IoT, de bajo consumo o baja potencia, está determinada por el creciente uso de dispositivos cada vez más inteligentes y proyectos IoT cada vez más ambiciosos. De acuerdo a un estudio de mercado mundial realizado por ABI Research¹⁴ en 2016, los Gateways IoT vendidos en 2021 superará los 64 millones de unidades.

Este proyecto se propone como objetivo principal, desarrollar un gateway de bajo consumo, para registrar diferentes dispositivos finales con la plataforma IoT Cloudino¹⁵ y comunicarlos por medio de RF LoRa, con la finalidad de proveer datos finos¹⁶ a usuarios finales a través de distintas aplicaciones web y móviles para mejorar su calidad de vida.

¹³ H. A. A. Al-Kashoash and A. H. Kemp, "Comparison of 6LoWPAN and LPWAN for the Internet of Things," *Aust. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 268–274, 2016.

¹⁴ Para más información sobre ABI Research, puede consultar el sitio oficial en <https://www.abiresearch.com>. [Accessed: 21-Jan-2018].

¹⁵ Para más información sobre Cloudino, puede consultar el sitio oficial <http://cloudino.org>. [Accessed: 10-Jan-2018].

¹⁶ Debido a que Cloudino permite recabar, almacenar y analizar datos de dispositivos, finalmente entrega datos que facilitan la toma de decisiones. Adicionalmente, Cloudino puede integrar servicios de inteligencia artificial de terceros, a través de Node-Red e IBM Watson.



Capítulo 1

Planeación del proyecto



Capítulo 1: Planeación del proyecto

La reconocida empresa IBM¹⁷ define el IoT como un conjunto, cada vez más amplio, de dispositivos conectados que envían datos a Internet. Estos dispositivos son las “cosas”, es decir, objetos de uso cotidiano con electrónica embebida que puede transferir datos sobre una red sin la intervención humana. Las conexiones son conocidas, también, como conexiones *Machine-to-Machine* (M2M) ¹⁸.

El inconveniente surge con el hecho de que estos dispositivos M2M no son capaces de conectarse directamente a Internet, por varias razones importantes entre ellas la diversidad de protocolos de comunicación, fuente de alimentación, memoria, costos y potencia de cómputo limitadas, impiden su conexión directa a Internet.

1.1 Objetivos

Los objetivos de este proyecto pueden resumirse en un objetivo general y tres objetivos específicos que permiten alcanzar la realización exitosa del proyecto.

1.1.1 Objetivo general

Desarrollar un gateway LoRa simple y de bajo costo que enlace una red inalámbrica de dispositivos finales M2M con la Plataforma Cloudino para habilitar una tecnología IoT accesible y hecha en México, con la finalidad de mejorar la calidad de vida de los mexicanos.

¹⁷ IBM, “What is the IoT?” [Online]. Available: <https://www.ibm.com/internet-of-things/learn/what-is-iot/>. [Accessed: 06-Abr-2018]. Para más información sobre IBM, puede consultar el sitio oficial en <https://www.ibm.com>. [Accessed: 24-Jun-2019].

¹⁸ S. K. Datta, C. Bonnet, and N. Nikaein, “An IoT gateway centric architecture to provide novel M2M services,” 2014 IEEE World Forum Internet Things, WF-IoT 2014, pp. 514–519, 2014.

1.1.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos, están alineados a los tres artefactos estratégicos del proyecto. Estos son el protocolo de comunicación de la MAC, el circuito electrónico del gateway LoRa y, por último, el software embebido que integra el protocolo y el gateway implementado el comportamiento del protocolo en un programa grabado en la memoria flash del gateway. En consecuencia, a continuación se resumen los objetivos específicos del proyecto.

1. Implementar un protocolo de comunicación, basado en LoRa, para la comunicación entre los dispositivos finales y el servidor Cloudino.
2. Integrar la placa de circuito impreso (PCB) del gateway que se ajuste a los requerimientos de este proyecto.
3. Diseñar e implementar el software del Packet Forwarder que correrá en el host del gateway.

1.2 Especificación del problema

El IoT cuenta con cientos de servicios de cómputo en la nube que gestionan los sistemas y aplicaciones disponibles, pero también con una enorme red de dispositivos finales a nivel del suelo interconectados de manera inalámbrica con tecnologías WPAN/WLAN. Todos estos protocolos tienen un problema en común, no pueden conectarse directamente a las grandes redes Wide Area Network (WAN) como el Internet. Hace falta un gateway que provea un punto de contacto con estas redes usando Wifi, Ethernet, GSM o algún otro tipo de conectividad. Entonces, el gran reto actual es comunicar dispositivos finales a grandes áreas, donde el rango típico de WPAN/WLAN no es suficiente.

Sin embargo, para habilitar esta intensa niebla, conocida en inglés como *fog computing*¹⁹, se requiere de un medio a través del que estos dispositivos puedan

¹⁹ J. P. A. Jantsch, *Fog Computing in the Internet of Things*. 2018. También revisar la obra de Z. Mahmood, *Fog computing: Concepts, frameworks and technologies*. 2018.

conectarse sin costear grandes inversiones en redes celulares tales como GSM, GPRS, 3G, 4G/LTE. Los gateways permiten conseguir esto mismo, funcionan como puentes entre los nodos finales y el cómputo en la nube (*cloud computing*) o en su defecto, un servidor remoto. Su papel es clave porque posibilita la convergencia de las tecnologías de la información (IT), con las tecnologías operacionales²⁰ (OT).

Las redes LPWAN ayudan a resolver esta enorme dificultad. Estas redes están diseñadas para realizar conexiones de comunicación de bajos consumo y costo, a diferencia de lo que sería si se usara WiFi.

En febrero de 2017, la Asociación GSMA²¹, que representa el interés de los operadores móviles de todo el mundo, anunció que el número de conexiones LPWAN en el futuro excederá las conexiones 2G, 3G y 4G y que se convertirá en la tecnología líder para la conectividad IoT²².

Las tecnologías LPWAN como LoRa son excelentes candidatos para ser usado en muchas aplicaciones en entornos interiores (indoors) y exteriores (outdoors)²³, tales como *smart metering* y *factory monitoring*. Sin embargo, no se adecúan para transmitir datos que demanden un alto ancho de banda²⁴, como sería el caso de imágenes en tiempo real. La baja velocidad de datos asegura el bajo consumo de energía de los dispositivos en los nodos finales, por lo tanto, es factible usar baterías de litio para dichas aplicaciones.

²⁰ i-SCOOP, "IT and OT convergence – two worlds converging in Industrial IoT." [Online]. Available: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/industrial-internet-things-it-ot>. [Accessed: 01-Aug-2018]. También consultar a Industrial Ethernet Book, "IIoT: Combining the Best of OT and IT," Industrial Ethernet Book Issue 95 / 14. [Online]. Available: <https://iebmedia.com/index.php?id=11673&parentid=63&themeid=255&hft=95&showdetail=true&bb=1>. [Accessed: 08-Mar-2018].

²¹ GSMA, "Internet of Things". [Online]. Available: <https://www.gsma.com/iot/mobile-iot/>. [Accessed: 10-Mar-2019]. Para más información sobre GSMA, puede consultar el sitio oficial en <https://www.gsma.com/>. [Accessed: 10-Mar-2019].

²² J. Nordlöf and P. Lagusson, "A Study of Low-Power Wide-Area Networks and an In-Depth Study of the LoRaWAN Standard," p. 108, 2017.

²³ R. Henriksson, "Indoor positioning in LoRaWAN networks - Evaluation of RSS positioning in LoRaWAN networks using commercially available hardware.," p. 38, 2016. También consultar la obra de F. Sasián, D. Gachet, M. Suffo, and R. Therón, "Preface," Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics) 2017, vol. 10268 LNCS, pp. 1–10, 2017.

²⁴ L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," Comput. Networks, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.

Por otro lado, LoRaWAN²⁵, es un protocolo de comunicación desarrollado para trabajar específicamente con LoRa. No obstante, la Plataforma Cloudino no lo tiene implementado en su ingeniería base.

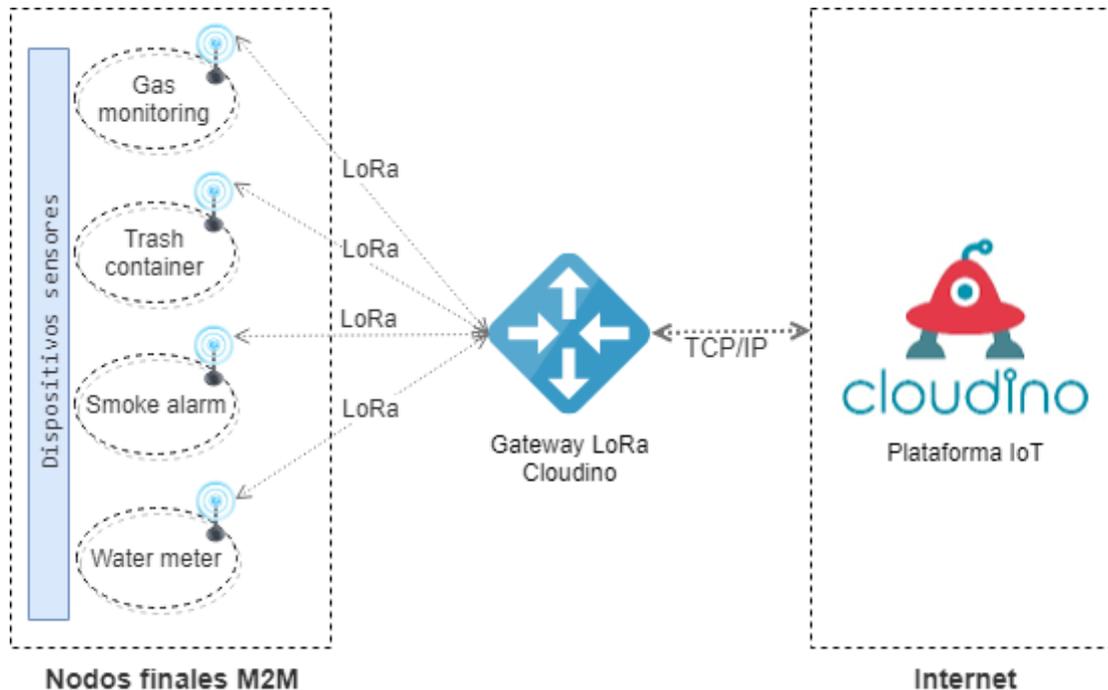


Figura 1. Topología Star de una red LoRa.

La **Figura 1**, muestra el diagrama de la topología de red típica que habilita un gateway LoRa, por encima de la capa física de LoRa, es posible utilizar diferentes protocolos y topologías de red (Star, Mesh, etc.) para soportar el IoT. El protocolo de comunicación determina la topología de la red²⁶. La imagen, presenta una topología de red tipo Star²⁷ para conectar el gateway con los nodos finales.

El propósito de este proyecto es implementar un gateway de comunicación utilizando la tecnología de modulación LoRa para interconectar una red M2M de

²⁵ J. Nordlöf and P. Lagusson, "A Study of Low-Power Wide-Area Networks and an In-Depth Study of the LoRaWAN Standard," p. 108, 2017. También consultar la obra de F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, "Understanding the Limits of LoRaWAN," IEEE Commun. Mag., vol. 55, no. 9, pp. 34–40, 2017. Además, consultar a J. De Carvalho Silva, J. J. P. C. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic, and A. L. L. Aquino, "LoRaWAN - A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities," 2017 2nd Int. Multidiscip. Conf. Comput. Energy Sci. Split. 2017, no. August, 2017.

²⁶ Richard Zurawski, Networked Embedded Systems, 2nd Editio. CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.

²⁷ T. Noergaard, Embedded Systems Architecture A Comprehensive Guide. También consultar la obra de S. Tyagi, "Internet of Things using LPWAN," no. January, 2019.

nodos finales con la Plataforma IoT Cloudino, haciendo uso de un protocolo de comunicación adecuado a la capa física de LoRa (PHY).

1.3 Análisis de requerimientos

Antes de continuar, es importante señalar que un gateway o puerta de enlace no es un router o enrutador. Un router es un dispositivo bastante más simple, ya que maneja un mismo protocolo de comunicación entre los nodos a los que presta servicio, y se limita a reenviar los datos entre los nodos origen y destino.

Una vez hecha esta distinción, se definen los requerimientos que rigen el desarrollo del prototipo del LGWC. En esta primera etapa, el interés estará centrado en el concepto básico de habilitación de la red dejando de lado requerimientos sobre seguridad y eficiencia de consumo.

- **Nodos finales.** También conocidos como nodos terminales, estos componentes cuentan con un modem LoRa, sensores y/o actuadores, una antena y un suministro de alimentación. El transceptor LoRa transmite las mediciones adquiridas por el sensado de entidades físicas. Los sensores son dispositivos que entregan mediciones brutas que son codificadas antes de ser transmitidas.
- **Gateway IoT.** Cuenta con dos módems. Un modem LoRa para transmisión de los mensajes entre el Gateway y los nodos terminales. El segundo modem es para transmisión entre el gateway y el servidor de red.
- **Servidor de red.** Cloudino Server recolectará y almacenará los datos emergentes desde el Gateway a través de una conexión TCP.

El enfoque principal de este proyecto será desarrollar una solución básica de un gateway entre una red LoRa de dispositivos finales M2M y Cloudino Server, realizando tareas relacionadas con la recepción y retransmisión de los paquetes de

información entre el origen y el destino. El Sistema consistirá de tres componentes distintos, descritos en el resumen anterior.

El LoRa Gateway Cloudino (LGWC) estará diseñado para conectarse por TCP/IP al servidor Cloudino y, por el otro lado, usará modulación LoRa para comunicarse con, al menos, un nodo final.

Se define un nodo final o dispositivo final como un dispositivo *ciber-físico*, que cuenta con sensores y/o actuadores embebidos. Un dispositivo *ciber-físico*²⁸ es prácticamente cualquier objeto físico que hallamos habitualmente en nuestros entornos cotidianos, dotado con capacidades de computación y de comunicación para convertirlos en objetos inteligentes del IoT. Estas capacidades son atribuidas gracias a sistemas embebidos²⁹ que se caracterizan por su seguridad, escalabilidad, adaptabilidad, resiliencia y usabilidad, pudiendo llegar a trabajar en conjunto formando ecosistemas distribuidos y totalmente autónomos.

Por otro lado, el servidor Cloudino (Cloudino Server) está disponible en línea bajo la siguiente dirección web (<https://cloudino.io>), y se requiere contar con una cuenta de usuario para iniciar una sesión de trabajo. El registro para obtener una cuenta de usuario es gratuito y se cuenta con un vínculo en la página de inicio.

1.3.1 Requerimientos Funcionales

Todos los LGWC dentro del rango de un dispositivo final, recibirán los mensajes transmitidos por este y los reenviarán a Cloudino Server. Por su parte, Cloudino Server puede encargarse de manejar duplicación de paquetes cuando distintos gateways LGWC reenvían el mismo paquete. No obstante, LGWC contará con la capacidad computacional para decidir si los reenvía hacia Cloudino Server o no, en función de la naturaleza del mensaje o la redundancia en los mensajes.

El LGWC soportará comunicación bidireccional entre los nodos finales y Cloudino Server. Esta comunicación, estará regida por un protocolo de

²⁸ H. Kopetz, *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*. 2011.

²⁹ T. Noergaard, *Embedded Systems Architecture A Comprehensive Guide*. También consultar la obra de P. Marwedel, *Embedded System Design*. 2nd Edition. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2011.

comunicación que definirá los mecanismos de control de acceso a la red LoRa entre los nodos finales y el LGWC.

El protocolo establecerá el formato de los mensajes. Cualquier miembro de la red podrá enviar y recibir mensajes. Estos mensajes deben contener información sobre el identificador del origen, identificador del destino, tamaño del payload y número secuencial de mensaje. Los mensajes consistirán exclusivamente de uplinks, downlinks³⁰ y estatus. A continuación, se describen cada uno de ellos para facilitar su comprensión.

Los tipos de mensajes que se intercambiarán son:

- **Mensajes Uplink.** Son los mensajes que se envían desde un nodo final hacia el servidor de red, utilizando uno o varios gateways como intermediarios.
- **Mensajes Downlink.** Son los mensajes que se envían desde el servidor de red hacia el nodo final siendo reenviado por el gateway.
- **Mensajes de estatus.** Estado que guarda el LGWC en un momento dado.

Los mensajes uplink pueden ser enviados en cualquier momento. Esta versión no define tiempos específicos de recepción, en consecuencia, los dispositivos podrán recibir en cualquier momento un mensaje. Por otro lado, esta versión no contempla manejar ninguna ventana de acuse. El LGWC reenviará downlinks eventualmente realizando ventanas para ello, durante estas ventanas de transmisión, no tendrá oportunidad de recibir ningún uplink del dispositivo; la siguiente oportunidad de recepción será una vez concluida la ventana de envío del downlink.

El LGWC actuará en modo pasivo. El modo pasivo agrega nuevos nodos terminales de modo manual, es decir, el LGWC no contará con la capacidad automática de descubrirlos y agregarlos a la red.

³⁰ L. Alliance, "LoRaWAN TM Specification," LoRaTM Alliance, pp. 1–91, 2016. También consultar la obra de B. Kang and H. Choo, "An experimental study of a reliable IoT gateway," ICT Express, vol. 4, pp. 130–133, 2017.

Una vez energizado el LGWC, leerá su registro de configuración inicial almacenado en el software embebido o firmware de la PCB y funcionará con los valores predefinidos de los parámetros³¹ establecidos:

- Spreading Factor = 8
- Band width = 125 MHz
- Preámbulo de sincronización = 0x2A

El LGWC deberá contar con alguna interfaz de usuario para desplegar información sobre la configuración de arranque, estatus, índice de sensibilidad y razón de ruido en la comunicación e información de uplinks y downlinks.

1.3.2 Requerimientos No Funcionales

El desarrollo empleará una arquitectura de red típica en sistemas con modulación LoRa.

Los módulos de RF LoRa deberán operar de acuerdo a las regulaciones normativas vigentes para el territorio nacional sobre la banda ISM (ICM en español), esta es 915 MHz³².

Para esta versión del prototipo no es necesario tener en consideración el consumo de energía ocasionado por la latencia de comunicación de los downlinks.

El sistema deberá observar la Regla del 1%³³. Además, debe ser barato y asequible, es decir, que sea posible adquirirse en comercios especializados a

³¹ LoRa Alliance, "LoRaWAN 1.1 Regional Parameters," no. 1.1, p. 56, 2017. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawanr-regional-parameters-v11rb>. [Accessed: 09-Oct-2018].

³² LoRa Alliance, "LoRaWAN 1.1 Regional Parameters," no. 1.1, p. 56, 2017. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawanr-regional-parameters-v11rb>. [Accessed: 09-Oct-2018]. También consultar G. Paul, "El espectro radioeléctrico en México. Estudio y acciones," IFT (INSTITUTO FEDERAL DE TELECOMUNICACIONES). [Online]. Available: <http://www.ift.org.mx/espectro-radioelectrico/el-espectro-radioelectrico-en-mexico-estudio-y-acciones-version-final-y-publica>. [Accessed: 11-Jun-2018].

³³ Honghao Gao, Yuyu Yin Xiaoxian Yang, Huaikou Miao (Eds.), "Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities," 13th EAI International Conference, TridentCom 2018, Shanghai, China, December 1-3, 2018. Springer. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12971-2>.

precios razonables. En cuanto a la seguridad, quedará confinada, en esta etapa, a una lista de identificadores de nodos terminales aceptados por el LGWC.

1.4 Descripción de la solución tecnológica propuesta

La solución propuesta para el LGWC, implementa un gateway LoRa inalámbrico (Wireless LGWC). Será liviano y económico y estará diseñado teniendo en cuenta las mejoras que se esperan alcanzar en versiones posteriores.

La red LPWAN que habilita esta propuesta consiste de tres componentes principales:

- **Nodo Final.** Consta de modem LoRa, sensores y actuadores confinados en el mismo dispositivo.
- **Gateway LoRa.** El Wireless LGWC, consta de modem LoRa y WiFi y antena de ganancia.
- **Cloudino Server.** La plataforma IoT Cloudino cuenta con un servidor de aplicaciones para controlar y administrar dispositivos, programarlos, definir reglas de comportamiento, etc.)

El Wireless LGWC actuará como la columna vertebral de esta red. Por un lado, soporta la etapa de conexión LoRa para la comunicación periódica de datos de lectura sensados o el estado actual de los nodos finales. Por el otro, para la etapa de reenvío de paquetes hacia Cloudino Server, soportará una conexión WiFi.

La conexión LoRa del nodo final sirve para enviar mensajes uplink al gateway que, a su vez, permanece en constante comunicación con la Plataforma IoT para reenviar estos uplinks, a través de una conexión TCP,

También puede consultar H. Kopetz, Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications. Springer, Wien. 2011. Además, LoRa Alliance, "LoRaWAN® 1.1 Regional Parameters", LoRa™ Alliance, no. 1.1, p. 56, 2017. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawanr-regional-parameters-v11rb>. [Accessed: 09-Oct-2018]. Además, consultar a E. Ruano, "LoRa protocol Evaluations , limitations and practical test," p. 7, 2016.

Wireless LGWC reenviará a Cloudino Server los datos adquiridos por los sensores y a cambio recibirá indicaciones que se traducirán en acciones a ser realizadas por el mismo gateway o por el nodo final.

La mayoría de los autores, consultados para realizar este documento, coinciden en que, en realidad son cuatro componentes y no tres, como se menciona aquí, los que conforman una arquitectura IoT. Este cuarto componente, *Aplicaciones de Usuario*, como ellos lo nombran, queda absorbido, para el enfoque de este proyecto, por las interfaces que expone Cloudino para vincularse con una variedad de servicios web. La **Figura 2**, muestra los nodos finales, estos no cuentan con conexión TCP para conectarlos directamente al IoT. En su lugar, usarán la red LoRa por medio de un modem LoRa para conectarse al Wireless LWGC. Al mismo tiempo, actúa como un endpoint para la comunicación con Cloudino Server. Este gateway está propuesto para uso vertical en entornos IoT empresariales o industriales en áreas como procesos, mantenimiento y administración de activos (monitoreo remoto).

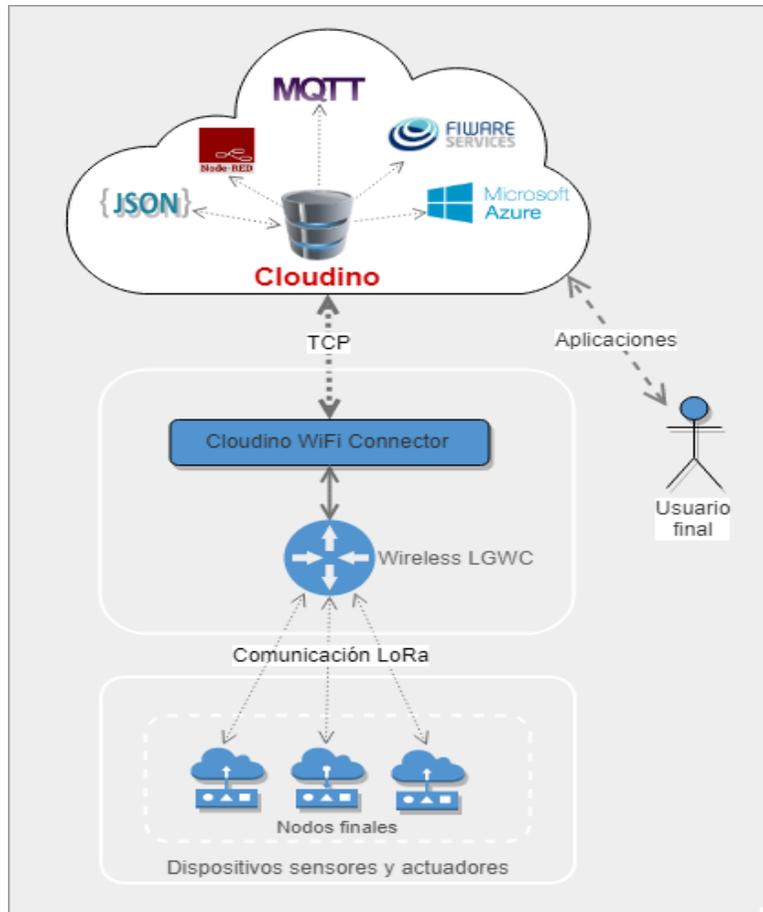


Figura 2. El Wireless LGWC actuará como la columna vertebral de esta red.

La implementación de la especificación completa LoRaWAN V1.1³⁴ establece que los gateways deben escuchar varios canales simultáneamente³⁵. Esto es así para los gateways comerciales que integran el chip SX1301 o SX1308 en lugar de los chips de la Serie SX127x, más apropiados para nodos finales.

Sin embargo, el Wireless LGWC, será implementado empleando un chip transceptor LoRa semidúplex³⁶, en consecuencia, se tratará de un gateway mono canal. Esta situación ya es suficiente para considerar el incumplimiento de la

³⁴ LoRa Alliance, “LoRaWAN® Specification v1.1,” LoRa™ Alliance, pp. 1–101, 2017. Available: <https://loralliance.org/resource-hub/lorawanr-specification-v11>. [Accessed: 19-Feb-2018].

³⁵ LoRa Alliance, “LoRaWAN® 1.1 Regional Parameters”, LoRa™ Alliance, no. 1.1, p. 56, 2017. [Online]. Available: <https://loralliance.org/resource-hub/lorawanr-regional-parameters-v11rb>. [Accessed: 09-Oct-2018]. También consultar la obra de N. G. P. M. Nico, “Development of Low-cost LoRaWAN Gateway for Private Deployments,” no. November, p. 58, 2017.

³⁶ Para más información sobre transceptores semidúplex, puede consultar la siguiente página de Wikipedia <https://es.wikipedia.org/wiki/Semid%C3%BAplex>. [Accessed: 05-Dic-2018].

especificación LoRaWAN. No obstante, el alcance de la solución integral contempla implementar un protocolo de comunicación simple.

Otro aspecto importante a considerar tiene que ver con la usabilidad; dependiendo de esta, existen básicamente dos maneras de desarrollar un gateway IoT. Una es un gateway simple y la otra, un gateway de control integrado.

Un gateway simple funciona como un simple puente que organiza y empaqueta los datos para transmitirlos por Internet al servidor Web (uplink) ³⁷. También es responsable de distribuir los datos de vuelta a los nodos finales (downlink) en aplicaciones que manejan comunicaciones bidireccionales.

Los gateways de control integrado extienden la funcionalidad de los gateways simples añadiendo recursos de procesamiento e inteligencia computacional en su software embebido. Con un gateway de control integrado es posible evaluar y filtrar datos de sensores y administrar tareas complejas de comunicación y seguridad. Dentro de esta clase de gateways se encuentran los gateways con firmware mínimo, corriendo el programa de control de manera cíclica y, los que corren un sistema operativo, haciendo del programa de control un subproceso que se ejecuta bajo un esquema calendarizado.

Resulta muy conveniente elegir un gateway de control integrado, considerando que la implementación del protocolo de comunicación conllevará cierta complejidad; principalmente, el pre-procesamiento de la información antes de ser enviada al servidor. Dentro del pre-procesamiento, se puede contar con filtrado y agregación. Además, se optó por uno de firmware mínimo por razones de simplicidad.

³⁷ B. Kang and H. Choo, "An experimental study of a reliable IoT gateway," *ICT Express*, vol. 4, pp. 130–133, 2017.

1.5 Modelo de desarrollo

El modelo de desarrollo describe el mecanismo asumido para realizar el Wireless LGWC. Se distinguen los componentes del sistema y la comunicación. Con esta distinción, se allana el camino para visualizar mejor que el diseño resulte reutilizable en diferentes contextos o aplicaciones. El modelo define:

- Los **componentes** y la **organización** de dichos componentes, sus funciones y comportamientos esperados.
- La **comunicación**, mediante un **protocolo** que describe las reglas de comunicación entre los componentes. Es decir, el paso de mensajes asíncronos estará regido por este protocolo.

1.5.1 Arquitectura del Sistema

La arquitectura IoT propuesta para el proyecto, mostrada en la **Figura 3**, exhibe cómo el Wireless LGWC extenderá la conectividad LPWAN. Un nodo final, de la capa de sensado o percepción, transmite pequeños paquetes de datos a través de un modem LoRa a grandes distancias. El Gateway, en la capa Middleware, es una BTS LoRa que recibe los paquetes desde el nodo final a través de un enlace de radiofrecuencia LoRa para luego reenviarlos hacia el servidor de red a través del backhaul IP, con una conexión TCP. En consecuencia, se definen a detalle cada una de las capas de la arquitectura IoT propuesta:

1. **Capa 1.** Capa de sensado, compuesta por nodos finales M2M que pudieran estar conectados a puertos ADC para convertir los voltajes analógicos a valores digitales antes de transmitirlos. En sí, no están basados en IP y por lo tanto no se conectan directamente a Internet.

2. **Capa 2.** Capa middleware, corresponde al software embebido para comunicar con cada nodo con la plataforma IoT, reenviando mensajes procedentes de la plataforma IoT hacia los nodos terminales y en sentido contrario, de los nodos terminales hacia la plataforma IoT. Esta capa distingue dos subcapas:
 - La subcapa middleware de sistema, que proporciona la abstracción del sistema al software del gateway, consiste de algunas API libraries LoRa.
 - La subcapa middleware de hardware, que proporciona la abstracción del hardware, consistente de varias API libraries compatibles con Arduino
3. **Capa 3.** Capa de aplicación, se sitúa en la cima de la arquitectura, exponiendo toda la funcionalidad del sistema al usuario final. Esta capa maneja una variedad de protocolos de servicios web y tecnologías de composición de servicios para integrar perfectamente sistemas distribuidos y aplicaciones derivadas de la plataforma IoT.

Esta arquitectura permite implementar una amplia variedad de aplicaciones para IoT. En el Capítulo 5, “Impacto social y económico del proyecto”, se expone un par de casos de estudio sobre su implementación.

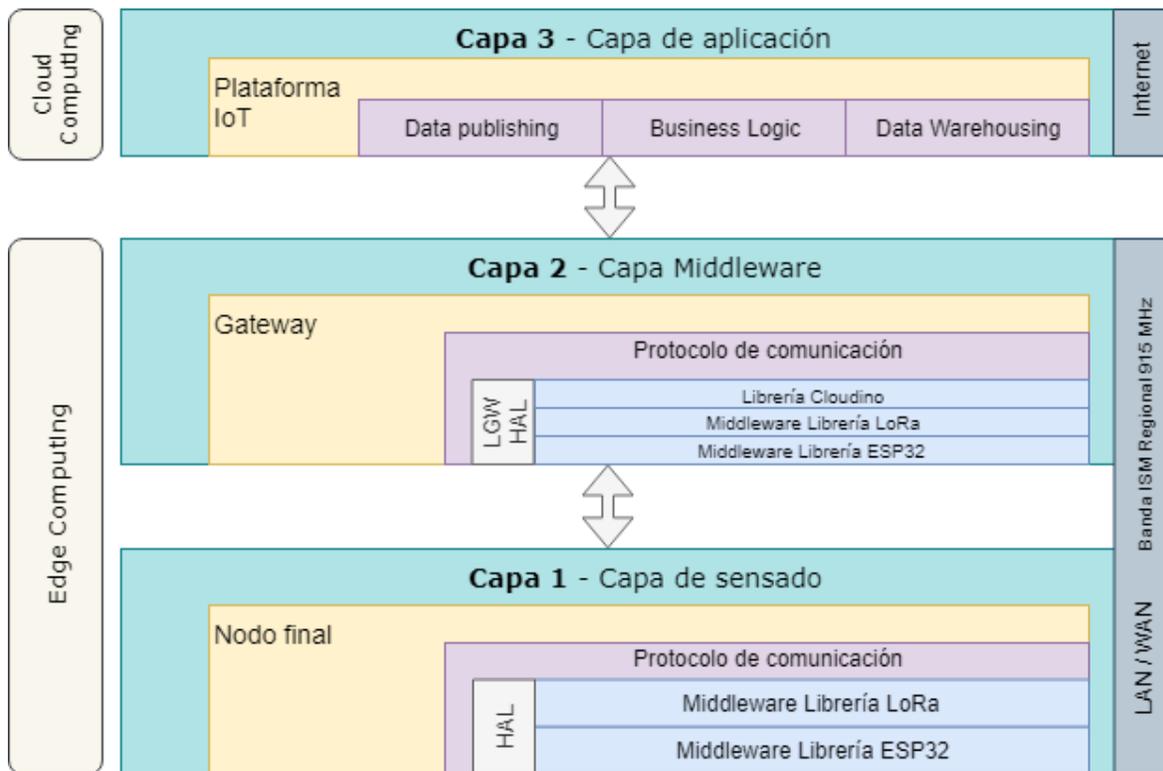


Figura 3. Arquitectura IoT propuesta.

El protocolo de comunicación, define la arquitectura de la Capa de Red basada en LoRa. Como se puede apreciar en la **Figura 3**, La red que define la implementación de este protocolo, tiene una topología en estrella (Star topology).

El protocolo usa el dispositivo gateway para recibir datos desde los nodos y reenviarlos a la Plataforma IoT. Por lo tanto, el nodo final debe contar con una conexión para enviar mensajes uplink a un gateway que permanece en constante conexión con la Plataforma IoT.

Los mensajes recibidos por el gateway, a través de su modem LoRa, son sometidos a validación. Para ello, son verificados de acuerdo al Protocolo de comunicación que rige el funcionamiento del gateway. Dependiendo de esto, son reenviados o no, al servidor de red que se encargará, a su vez, de procesarlos y hacerlos disponibles en aplicaciones de usuarios finales.

Si en un momento dado, se tuviera múltiples gateways, más de uno de ellos pudiera recibir los mismos mensajes provenientes de un nodo final.

La **Figura 4**, muestra el diagrama de secuencia para un mensaje uplink. El token “uplnk” identifican los mensajes uplink en el servidor y el token “ack”, representa el mensaje de acuse de recibido.

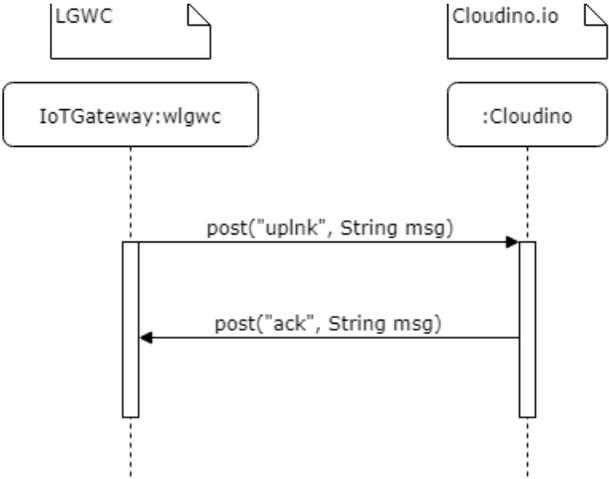


Figura 4. Uplinks implementados con Cloudino Library.

El gateway y la plataforma IoT están permanentemente conectados por medio de una conexión TCP. Los downlinks, también pasarán por el gateway para procesarlos y transmitir los mensajes, de manera adecuado, al nodo final específico.

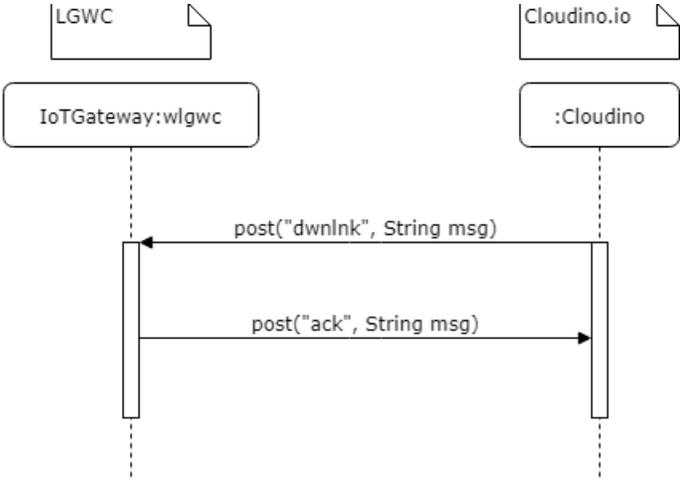


Figura 5. Downlinks implementados con Cloudino Library.

La **Figura 5**, muestra el diagrama de secuencia para un mensaje downlink. El token “dwnlnk” identifican los mensajes downlink en el servidor y el token “ack”, representa el mensaje de acuse de recibido.

1.6 Estándares, registros y patentes

El estándar IEEE 802.11³⁸, comprende la colección de estándares de comunicación inalámbrica local Wireless Local Area Network (WLAN). 802.11 b y 802.11 g operan en la banda de los 2.4 GHz, mientras que 802.11 n opera en la banda de 2.4/5 GHz. WiFi entrega un rango de comunicación en el orden de los 20 m, en espacios interiores hasta los 100 m en entornos abiertos.

El estándar IEEE 802.15.4³⁹, especifica la capa física y la capa de enlace de datos para redes de área personal inalámbricas de baja velocidad (LR-WPAN). Opera en las bandas de frecuencia sin licencia ISM (868 MHz en Europa; 928 MHz en Norte América; y en general 2.45 GHz en todo el mundo). Con el transcurrir de los años, se ha convertido en el estándar de múltiples tecnologías de comunicación inalámbrica de bajo consumo.

LoRa es una técnica de modulación⁴⁰, patentada por la Corporación Semtech⁴¹, que permite establecer redes de comunicación privadas exentas de operadores, en consecuencia no existen pagos de regalías ni costos de conexión. LoRa significa Long Range. Los dispositivos LoRa son dispositivos de baja potencia y largo alcance que pueden transmitir y recibir datos a través del espectro de frecuencia inalámbrico.

³⁸ The Working Group for WLAN Standards, “IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks.” [Online]. Available: <http://ieee802.org/11/>. [Accessed: 02-Dec-2018].

³⁹ IEEE 802.15.4-2006., “IEEE 802.15 WPAN Task Group 4 (TG4).” [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>. [Accessed: 02-Dec-2018].

⁴⁰ Olivier Bernard Andre Seller, “Wireless communication method,” US20160094269A1, 2014.

⁴¹ Para más información sobre Semtech, puede consultar el sitio oficial <https://www.semtech.com>. [Accessed: 03-Ago-2018].

Cloudino es una marca registrada, fue creada en el año de 2015 por Infotec⁴² Centro Público de Investigación de Conacyt⁴³ que es un órgano público descentralizado del gobierno de México. Cloudino es una plataforma IoT, Open Source y Open Hardware, que permite el desarrollo de soluciones integrales de forma simple.

Cloudino está disponible como una solución de tipo Plataforma como Servicio (PaaS), para usuarios registrados. Es capaz de integrar dispositivos con otras plataformas mediante su arquitectura de vinculación entre las que se incluyen FiWare, MS Azure, Node-Red y Blynk, además de facilitar la comunicación a través de los protocolos HTTP(S), CoAP o MQTT. También puede integrarse con otras plataformas usando Java, JS y Python.

⁴² Para más información sobre Infotec, puede consultar el sitio oficial <https://www.infotec.mx>. [Accessed: 03-Ago-2018].

⁴³ Para más información sobre Conacyt, puede consultar el sitio oficial <http://www.conacyt.gob.mx>. [Accessed: 03-Ago-2018].



Capítulo 2

Análisis y diseño de la solución tecnológica propuesta



Capítulo 2: Análisis y diseño de la solución tecnológica propuesta

Este capítulo presenta el material y procedimientos empleados para desarrollar el Wireless LGWC. Se describen los diferentes elementos de hardware empleados, así como el proceso para establecer la comunicación entre los elementos de la red.

Tabla 1. Lista de artefactos genéricos para el desarrollo del proyecto

Componente	Hardware/Firmware	Funcionalidad	Interfaz/API
Sensor	Hardware/Firmware	Detectar acciones o estímulos externos por la variación de una propiedad.	Conexión alámbrica con el Sensor Hub (I ² C, GPIO)
Actuador	Hardware/Firmware	Detonar una acción de otro componente.	Conexión alámbrica con el Sensor Hub (I ² C, GPIO)
Sensor Hub	Firmware	Implementa inteligencia computacional para enviar y recibir paquetes	HAL Gateway
Packet Forwarder	Firmware	Programa ejecutado en el host del gateway con una interfaz al concentrador LoRa para extraer y enviar paquetes, mientras interactúa al mismo tiempo con el servidor de red	HAL Gateway
HAL gateway	Firmware	Interfaz para extraer y enviar datos	Toolchain
WiFi Stack	Hardware/Firmware	Conexión Internet	Toolchain
Concentrador LoRa	Hardware	Modulación SSC LoRa	SPI
MCU	Hardware	Placa de circuito impreso (PCB) para integrar gateway y dispositivo final	Puente USB-UART(CP2102) /Toolchain

2.1 Hardware para gateway y nodo terminal

El hardware del Wireless LGWC, al igual que el del nodo terminal consiste de un PCB Heltec WiFi LoRa 32 V2⁴⁴ de Heltec Automation⁴⁵, basada en ESP32 y SX127x, integra funcionalidad para WiFi, BLE y LoRa, además de un sistema de gestión de baterías Li-Po y un display OLED de 0.96" y certificación CE. El fabricante lo recomienda ampliamente como una PCB de desarrollo para proyectos IoT.

La Tabla 3 lista las principales características del hardware para integrar el Gateway y el nodo terminal.

Tabla 2. Características de la Heltec WiFi LoRa 32 V2 empleada en el proyecto.

Componente	Descripción
SoC	Módulo ESP32-D0WDQ6 de Espressif
MCU	Microprocesador Xtensa dual-core de 32 bits, 600+ MIPS de Tensilica ahora Cadence Design Systems
Chip LoRa	Transceptor SX1276 (915) de Semtech
Banda Regional LoRa	US 902-928
Potencia máxima de salida LoRa	18dB ± 2dB
Recursos de hardware	UART x 3; SPI x 2; I ² C; I ² S x 1; ADC 12 bits; DAC 8 bits; 29 GPIOs
Display	Display OLED de 0.96 pulg. Matriz de 128x64 puntos
Flash	Flash SPI de 4MB

⁴⁴ Para más información sobre esta tarjeta, puede consultar el sitio oficial de Heltec, en la sección de productos directamente en <https://heltec.cn/project/wifi-lora-32>. [Accessed: 16-Abr-2017].

⁴⁵ Para más información sobre Heltec, puede consultar el sitio oficial en <https://heltec.cn>. [Accessed: 16-Abr-2017].

Antena	Antena LoRa para la banda de 915 MHz.
Control de alimentación externo	Si
Consumo de energía	WiFi scan 115mA; WiFi AP 135 mA; LoRa 20dB 130mA

La PCB Heltec cuenta con un chip ESP32⁴⁶. Su diseño es creación de la compañía Espressif Systems de origen chino con base en Shanghai. ESP32 implementa TCP/IP, el protocolo 802.11 b/g/n WiFi MAC, y la especificación de WiFi Direct.

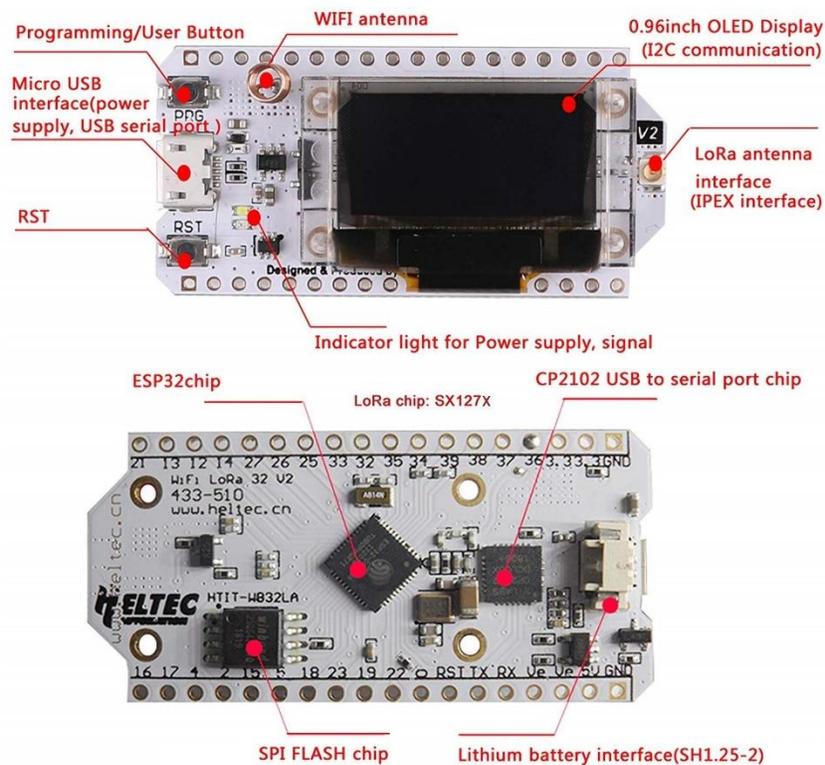


Figura 6. Placa electrónica o PCB Heltec WiFi LoRa 32 V2 basada en ESP32 + SX127x. Cortesía Heltec Automation™.

⁴⁶ Para más información sobre ESP32, puede consultar el sitio oficial de Espressif, en la sección de productos <https://www.espressif.com/products/hardware/socs>. [Accessed: 18-May-2018].

Es compatible con las operaciones STA y SoftAP de Basic Service Set (BSS) bajo la función de control distribuido (DCF). La administración de energía se maneja con una interacción mínima con el host para minimizar el período de servicio activo. En resumen, ESP32 ofrece una solución de red como access point para otros dispositivos y cuenta con capacidad para ejecutar aplicaciones almacenadas. La **Figura 6**, muestra un esquema sobre las partes que componen esta PCB.

2.1.1 Transceptor SX1276

El transceptor SX1276⁴⁷ es semidúplex de baja frecuencia intermedia que implementa LoRa, la técnica de modulación patentada de Semtech, pudiendo lograr una sensibilidad superior a -148 dBm utilizando un cristal de bajo costo.

SX1276 cuenta con tres amplificadores de potencia (PA) de RF distintos, pueden entregar hasta +14 dBm, no están regulados para una alta eficiencia de energía y pueden conectarse directamente a sus respectivas entradas de receptor RF a través de un par de componentes pasivos para formar uno solo puerto de antena de alta eficiencia. El tercer PA está conectado al pin **PA_BOOST** y puede entregar hasta 20 dBm a través de una correspondencia dedicada.

Todos los parámetros principales del front-end de RF y de la máquina de estados digital son completamente configurables a través de una interfaz SPI que da acceso a los registros de configuración del SX1276.

El SX1276 está equipado con dos módems, uno para FSK y el otro para LoRa. Dependiendo del modo seleccionado, se puede emplear la modulación FSK o la modulación de espectro ensanchado LoRa. Esta modulación permite una mayor inmunidad a la interferencia dentro de la banda.

En Norte América, incluido México, LoRa opera in la banda de frecuencia de 902 a 928 MHz, es por esta razón, que se optó por el chip SX1276 y no otro de la familia SX127x.

⁴⁷ Para más información sobre este transceptor, puede consultar el sitio oficial de Semtech, en la sección productos, directamente en <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1276>. [Accessed: 23-Sep-2017].

2.1.2 Antena

Como se describe en la Tabla 3, los módulos LoRa requieren una antena conectada para mejorar la recepción y emisión de los mensajes, pero además para evitar daños por sobrecarga. Cada módulo cuenta con una antena LoRa para 915 MHz con conector i-pec. Alcanza una sensibilidad de recepción de hasta -134 dBm, amplificación de 40 dBm (10 W), ganancia de 2



Figura 7. Antena para la banda de 915 MHz con conexión i-pec.

dBi y una impedancia de entrada de 50 Ω . La **Figura 7**, muestra una imagen de las antenas usadas, en el proyecto, para los módulos LoRa. Cada módulo LoRa debe llevar conectada una de estas antenas para evitar sobrecargas ocasionadas por la potencia del modem LoRa.

2.2 Plataforma Cloudino

Las plataformas IoT se han convertido en una parte importante en el desarrollo de soluciones IoT y las hay de muy variados tipos y vendedores con sus enfoques particulares de mercadotecnia. La principal causa de tal popularidad se debe a que reducen el ciclo de vida de productos (tiempo de comercialización) además, ofrecen a sus clientes y usuarios finales, confiabilidad y seguridad. Todo

esto las han convertido en **Plataformas Habilitadoras de Aplicaciones**, *Application Enablement Platforms* (AEP). MachNation define un IoT AEP como una oferta centrada en la tecnología optimizada para que entregue el mejor núcleo de middleware extensible, independiente de la industria y agnóstico para la construcción de un conjunto de soluciones de IoT interconectadas o independientes para los clientes. Un AEP se basa en un modelo de implementación flexible; un conjunto completo de dispositivos, SDK y API de conector de backend empresarial; y un conjunto de recursos para desarrolladores bien documentados⁴⁸.

La plataforma Cloudino o simplemente Cloudino, es considerada una AEP desarrollada en México por Infotec. Cloudino fue diseñada pensando en cuatro características principales:

- Fácil. La plataforma Cloudino permite conectar fácilmente a Internet cualquier dispositivo de forma simple.
- Bajo costo. El firmware de Cloudino es Open Source y el hardware que integra son razonablemente económico y accesibles para cualquier persona o empresa.
- Compacta. El hardware de Cloudino fue diseñado para ser utilizado en espacios reducidos de aproximadamente 20 mm³.
- Modular. La arquitectura de Cloudino permite integrar diferentes soluciones con muy variados recursos tecnológicos de hardware y comunicación.

De esta forma, Cloudino ofrece la posibilidad de implementar soluciones en proyectos IoT sin ninguna limitación técnica o económica.

⁴⁸ Machnation. [Online]. Available: <https://www.machnation.com/iot-application-enablement-platform-aep-definition/>. [Accessed: 18-May-2018].

A continuación, se lista un resumen de las características que permiten a Cloudino contar como una plataforma IoT robusta y eficiente:

- Cloudino es un **Cloud Device**, es decir, permite gestionar dispositivos.
- Identifica cada uno de los dispositivos que conforman la red de sensores.
- Permite realizar actualización **OTA** de cada dispositivo.
- La posibilidad de desconectar un dispositivo final enajenado (malicioso o robado).
- La posibilidad de actualizar el software del dispositivo final.
- Permite crear y actualizar las credenciales de seguridad para acceso.
- Permite activar/desactivar ciertas opciones de hardware.
- La posibilidad de reconfigurar la configuración de red remotamente.

Cloudino WiFi Connector⁴⁹ (CWC), mostrado en la **Figura 8**, es uno de los

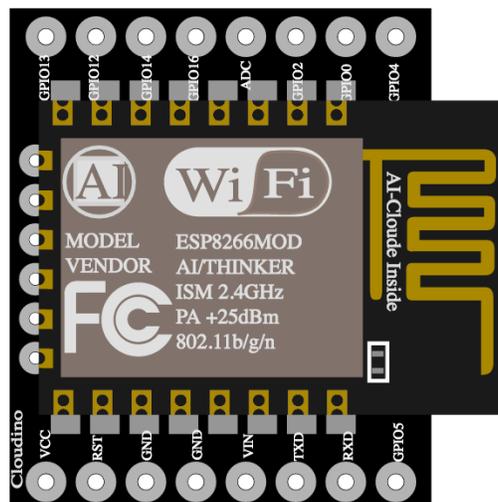


Figura 8. Imagen del Cloudino WiFi Connector. Vista frontal de la tarjeta. Cortesía Infotec.

⁴⁹ Para más información sobre el repositorio Cloudino, puede consultarlo en <https://github.com/Cloudino>. [Accessed: 18-Jan-2017].

componentes más importantes de la Plataforma Cloudino. CWC es un chip basado en un módulo ESP-12F de la compañía Ai-thinker, ofrece una interfaz para otros MCUs a través de una API conocida como Cloudino Library⁵⁰ disponible de manera directa o también a través del Library Manager de la IDE de Arduino⁵¹. Una característica importante es que trabaja en paralelo con cualquier PCB a la que está conectado por medio de una interfaz UART.

A continuación, se resumen las principales características del WiFi Cloud Connector:

- Se encarga de la función de conexión a Cloudino Server a través de internet.
- Fácil configuración vía Web.
- Cuenta con un procesador dedicado a las funciones de la capa de red WiFi.
- Permite la reprogramación de Arduino a través de Cloudino Server.

La Plataforma Cloudino hace posible conectar cualquier dispositivo embebido a Internet de forma simple y rápida. Para ello, solo hace falta conectarlo con una interfaz UART a un Cloudino WiFi Connector y, configurarlo por medio de una aplicación web hospedada internamente, accesible desde la dirección IP 192.168.4.1, una vez que se ha energizado con una fuente de alimentación de entre 5V y 12V. La **Figura 9**, muestra la aplicación de configuración, una vez conectado a la red WiFi del CWC. El menú “Server Configuration” permite realizar dicha configuración para conectar el CWC a Cloudino Server.

⁵⁰ Para más información sobre esta librería, consulte <https://github.com/Cloudino/Cloudino-ArduinoLib>. [Accessed: 18-Jan-2017].

⁵¹ Para más información sobre Arduino, puede consultar el sitio oficial <https://www.arduino.cc/>. [Accessed: 18-Jan-2017].

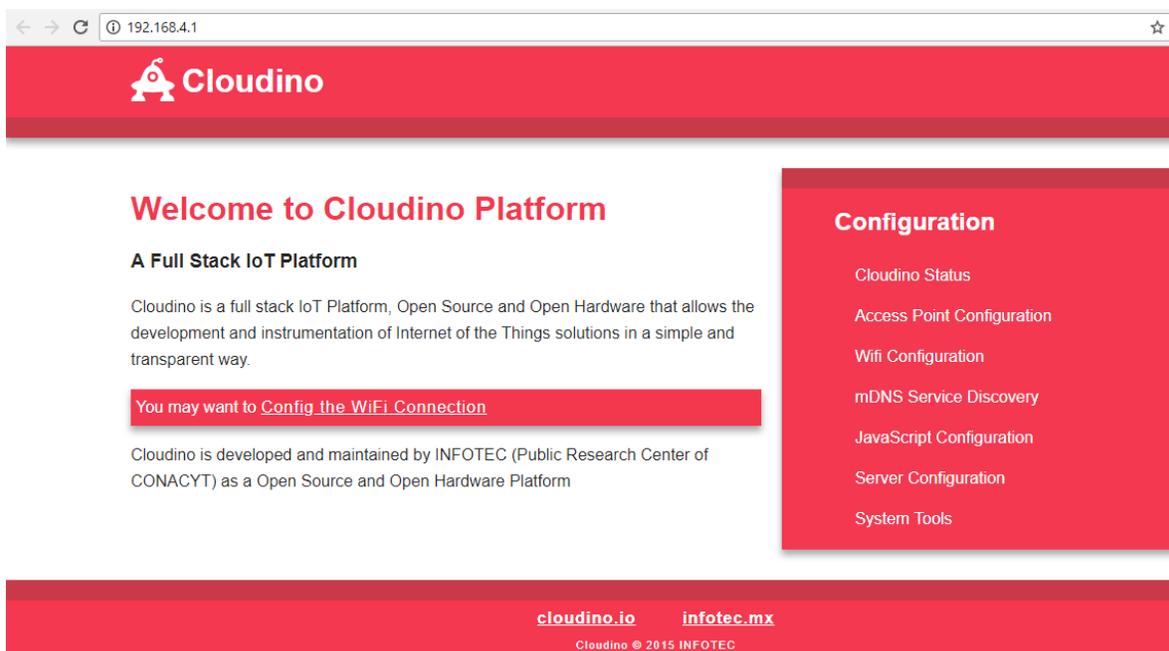


Figura 9. Una vez conectado a la red WiFi del CWC, se puede acceder a la aplicación de configuración utilizando un navegador web e ingresando a la dirección <http://192.168.4.1>.

2.3 Protocolos de comunicación

La comunicación es la columna vertebral de los sistemas de IoT. Los protocolos de comunicación permiten que una gran cantidad de dispositivos intercambien datos entre ellos mismos y con servidores remotos. Todo esto con el propósito último de mejorar nuestra calidad de vida⁵². Un protocolo de comunicación es un conjunto de normas que definen los formatos de intercambio de datos, codificación de datos, esquemas de direccionamiento para dispositivos y el enrutamiento de paquetes que van desde un origen hasta un destino.

Los protocolos que se describen en esta sección corresponden a los más importantes usados para el desarrollo del proyecto. Otros protocolos como UART, ISP y I²C, aunque juegan un papel relevante en la implementación, han sido omitidos. Para conocer detalles sobre su utilización, puede consultarse la **Figura 14**.

⁵² A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.

El chip ESP32 cuenta con la capacidad para comunicarse con la mayoría de los routers WiFi en el modo cliente. También es capaz de crear un punto de acceso con 802.11 b/g/n completo. WiFi es una tecnología de interconexión inalámbrica de dispositivos ad hoc. Si bien WiFi no es un protocolo de comunicación, el router, necesario para su funcionamiento, está conectado a Internet que implementa los protocolos TCP/IP.

En la comunicación con la red de sensores inalámbricos, se usa el protocolo LoRa, situado en la capa física de modulación inalámbrica de espectro ensanchado que opera en las bandas ISM desde 868 hasta 928 MHz. La modulación LoRa es propiedad de Semtech y está basada en la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS).

2.3.1 Protocolo Basado en Diccionario

La capa MAC, en el modelo OSI, es la encargada de delimitar y reconocer los mensajes. LoRaWAN es un protocolo de la capa MAC basado en la capa física LoRa, define una topología de red Star. LoRaWAN es un estándar de la industria ya muy elaborado. Por poner un ejemplo, LoRaWAN implementa mecanismos de adaptación de datos, al cambiar el SF y la potencia de transmisión, para optimizar las comunicaciones.

2.4 Librerías

La programación del Wireless LGWC se puede dividir en dos partes principales:

- **HAL del concentrador**, es la librería que permite tener el control sobre el chip concentrador Semtech a través de un número reducido de funciones, en Lenguaje C, para configurarlo, enviar y recibir paquetes. Esta librería se denomina LGWC_hal y está basada en un

conjunto de librerías que ofrece Heltec Automation para la PCB Heltec WiFi LoRa 32, principalmente Heltec_ESP32⁵³ y LoRa.

- **Packet Forwarder**, es un programa que corre en el gateway y que reenvía paquetes al servidor remoto y transmite paquetes recibidos desde el servidor remoto. Las librerías principales, sobre las que se basa este programa son LGWC_hal y Cloudino Library.

Wireless LGWC usa una interfaz UART para comunicarse con CWC, el MCU de la PCB Heltec está encargado de realizar las funciones necesarias para llevar a cabo esta tarea.

2.5 Packet Forwarder

“El packet forwarding o reenvío de paquetes es la retransmisión de paquetes de un segmento de red a otro por nodos en una red informática. La capa de red en el modelo OSI es responsable del Packet forwarding” (Gheorghe, Daniel. “Cisco CCDA Simplified”. Reality Press Ltd., 2012 p.6).

De acuerdo a esta definición, el Packet Forwarder⁵⁴ (PF) es el programa de aplicación responsable de reenviar los mensajes que llegan al gateway. Por lo tanto, debe encontrarse en cualquier gateway LoRa.

La principal fuente de especificaciones para implementar un PF, proviene de su protocolo de comunicación y, en segundo lugar, de las especificaciones de requerimientos no funcionales. Como referencia, se menciona que LoRaWAN, es el protocolo en el que está basado el Packet Forwarder de Semtech.

⁵³ Para más información sobre esta librería, puede consultar https://github.com/HelTecAutomation/Heltec_ESP32. [Accessed: 21-Mar-2018].

⁵⁴ S. Park, K. Hwang, H. Kim, and B. Shim, “Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering,” vol. 448, no. November, 2017. También consultar la obra de L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, “Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures,” vol. 159, pp. 51–58, 2015.

Las tareas de un Packet Forwarder son las siguientes:

- Reenviar paquetes LoRa recibidos por el concentrador LoRa (módulo LoRa) hacia el servidor de red a través de una conexión TCP/IP (uplinks).
- Transmitir paquetes LoRa con instrucciones que llegan desde el servidor de red (downlinks).
- Procesar datos e instrucciones recibidas.

El Packet Forwarder desarrollado para el Wireless LGWC implementa las tareas anteriores de acuerdo a las especificaciones establecidas en la sección de requerimientos.

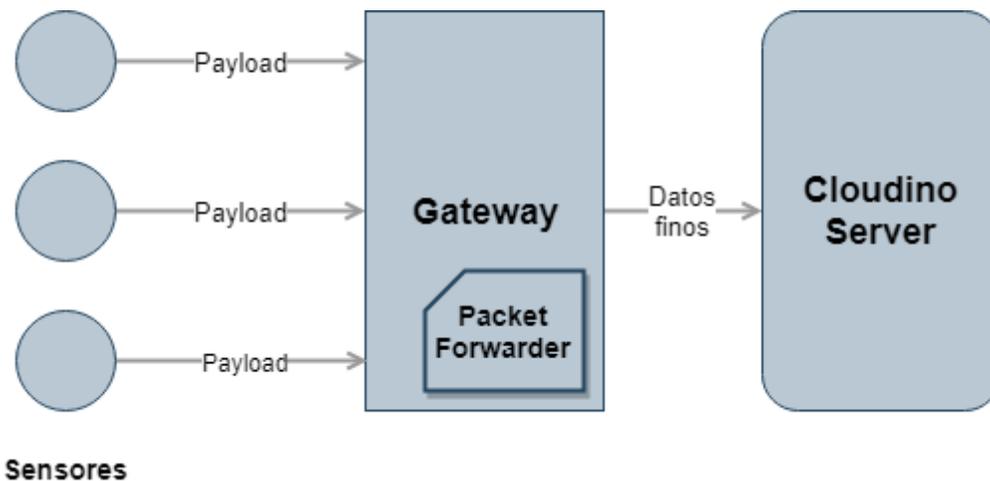


Figura 10. El Packet Forwarder se encuentra instalado en el Gateway.

La **Figura 10**, muestra la arquitectura IoT de manera general. Este diseño arquitectónico muestra la relación del PF con el gateway. El PF es responsable de recolectar datos de los sensores, pre procesar esos datos, y enviar los resultados a Cloudino Server. Este es el flujo completo de la información desde los sensores hasta el servidor remoto.

2.6 Diseño de la solución tecnológica propuesta

La arquitectura de red de nuestro protocolo MAC representa una topología Star en la que el LGWC es el enlace que transmite los mensajes entre los dispositivos finales y el servidor Cloudino ubicado en el back-end. Los LGWC están vinculados al servidor Cloudino a través de una conexión TCP/IP estándar, mientras que los dispositivos finales hacen uso de comunicación LoRa de un solo salto a uno o varios LGWC. Toda la comunicación es bidireccional, en un solo canal.

La red LoRa está basada en dos capas distintas: i) una capa física, basada en la técnica de modulación de radio llamada CSS (Chirp Spread Spectrum) y ii) una capa MAC que provee el acceso a la arquitectura LoRa usando un protocolo de comunicación.

Hay dos tipos de mensajes que se han esta mencionando, esto son los mensajes uplink y downlink. Empezando con la estructura de los mensajes uplink, estos deben incluir un preámbulo (Preamble), el encabezado de la capa física (Physical Header, PHDR), el encabezado CRC (PHDR_CRC) y un payload de capa física (PHYPayload) incluyendo su propio CRC (CRC) al final del mensaje para proteger la integridad del paquete completo. El PHDR, PHDR_CRC y payload son insertados por el radio transceptor.



Figura 11. Formato físico de mensajes uplink.

Los mensajes uplink usan el modo explícito de paquetes de radio LoRa en el cual el PHDR más un PHDR_CRC son incluidos.

Para el caso de los mensajes downlink usan el modo explícito de paquetes de radio en el que el PHDR y el PHDR_CRC son incluidos. En consecuencia, se tuvo especial atención de esta característica durante el diseño. La razón es porque el modo explícito provee información sobre el payload: longitud del payload en bytes, tasa de código de corrección de errores de reenvío y CRC del payload.

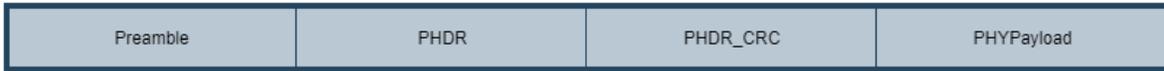


Figura 12. Formato físico de mensajes downlink.

El payload de la capa física está conformado por el encabezado de la capa MAC, encabezado de trama, payload, y código de integridad del mensaje. Los dos tipos de mensajes, uplink y downlink, llevan un payload, iniciando con un encabezado MAC (MHDR), seguido por un payload MAC (MACPayload), y finalizando con un código de integridad de mensaje (MIC).

El diseño de cómo funcionará la adaptación del Protocolo Basado en Diccionario tiene que ver con la estructura de la capa MAC.

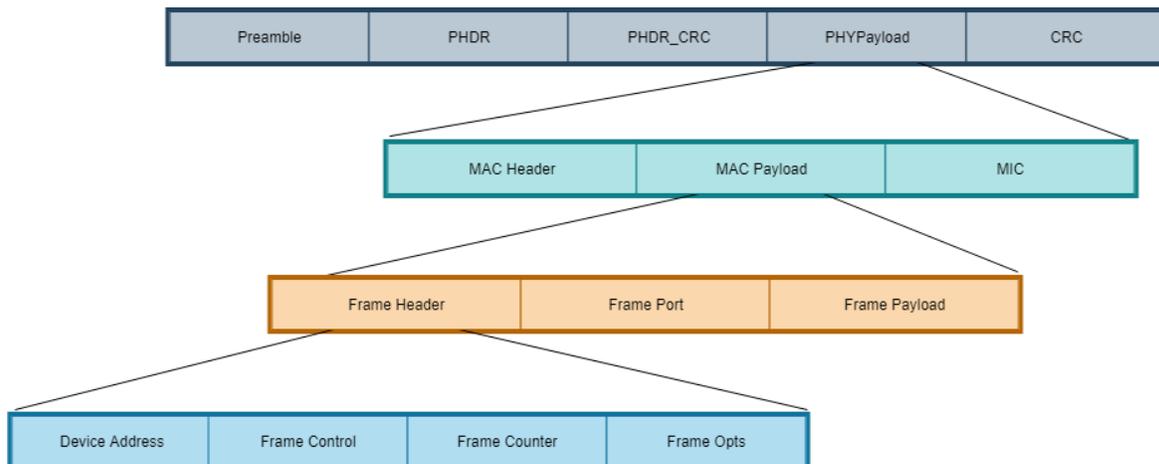


Figura 13. Estructura de la capa MAC

Dentro de la estructura de la capa MAC, se encuentra el Frame Control o Control de trama, el cual tiene un byte para codificar cinco campos que controlan algunos aspectos de la capa MAC.

La descripción es la siguiente: 3 bits para el Tipo de trama para indicar cómo interpretar el paquete, a continuación, se muestra una tabla con los posibles tipos de trama. Los tipos están definidos por el protocolo, aunque se dispone de dos opciones para usarse de manera propietaria por nuevas implementaciones.



Capítulo 3

Desarrollo del Gateway LoRa

para la

Plataforma Cloudino



Capítulo 3: Desarrollo del Gateway LoRa para la Plataforma Cloudino

Esta sección explica en primer lugar, la integración del hardware para implementar el Wireless LoRa Gateway Cloudino y, en segundo lugar, la librería del Wireless LGWC basado en un receptor de RF LoRa, también conocido como concentrador. Asimismo, resaltar que los módulos que componen el desarrollo están contenidos en una librería denominada LGWC_hal.

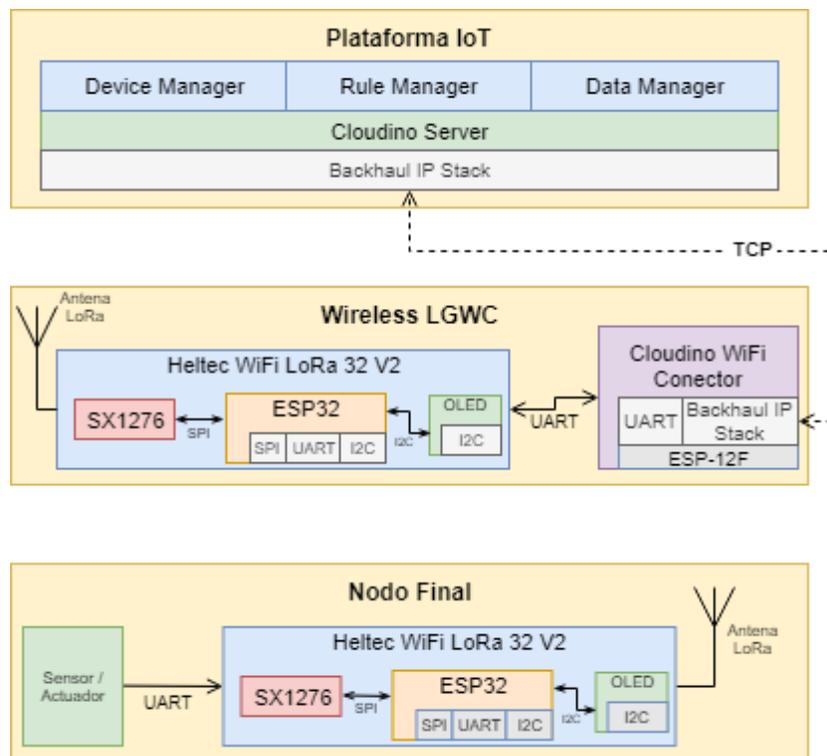


Figura 14. Integración del hardware para implementar el Wireless LoRa Gateway Cloudino y un nodo final.

3.1 Integración del Hardware

El diagrama mostrado en la **Figura 14**, se muestra la integración del hardware para implementar el Wireless LoRa Gateway Cloudino. Esta solución no considera la

existencia de ningún sensor dentro del mismo gateway. No obstante, no es extraño contar con gateways con sensores embebidos, por ejemplo, tal vez se trate de sensores para disponer de coordenadas GPS o sensores para tomar la temperatura del mismo gateway.

Los dispositivos que usan gateways como proxy necesitan dos protocolos: uno para conectar el dispositivo final al gateway y otro para conectarse el gateway al servidor remoto. Explicar la conexión de Heltec y Cloudino WiFi Connector.

3.2 Producción de la solución tecnológica propuesta

Para la solución tecnológica propuesta, se integró el Software con la librería LGWC_hal, que está compuesta de dos módulos principales para manejar un chip concentrador Semtech SX1276 a través de un conjunto reducido de módulos en lenguaje C para configurar el hardware, enviar y recibir paquetes.

Se emplea una interfaz UART, tal como se muestra en la **Figura 14**, para comunicar Cloudino WiFi Connector con la PCB Heltec.

Es posible agregar nuevos módulos para otros propósitos dependiendo de la aplicación del Wireless LGWC, pero estos son los mínimos necesarios para que el Gateway funcione correctamente, de acuerdo al alcance establecido en el proyecto.

- **loragw_hal**

Este es el módulo principal y contiene las funciones de alto nivel para configurar y usar el concentrador LoRa. A continuación, la **Tabla 3**, describe los métodos más importantes:

Tabla 3. Principales funciones de la Librería LGWC_hal.

Método / función	Descripción
<i>lgw_board_setconf</i>	Permite establecer la configuración de la PCB Heltec.
<i>lgw_rxrf_setconf</i>	Permite establecer la configuración del concentrador.

<i>lgw_on_receive</i>	Función callback invocada cuando un paquete es recibido.
<i>lgw_receive</i>	Función invocada por <i>lgw_on_receive</i> para implementar la recepción de paquetes de acuerdo al Protocolo Basado en Diccionario. De esta manera puede fácilmente alterarse la funcionalidad original.
<i>lgw_enableInvertIQ()</i>	Escribe en el registro RegInvertIQ (0x33) el valor 0x66
<i>lgw_disableInvertIQ()</i>	Escribe en el registro RegInvertIQ (0x33) el valor 0x27. (Valor default)
<i>lgw_backhoul</i>	Función invocada para implementar la recepción de paquetes desde Cloudino Server de acuerdo al Protocolo Basado en Diccionario.
<i>lgw_send_post</i>	Este método maneja mensajes enviados desde Wireless LGWC a Cloudino Server.

- **up_link**

Este módulo contiene funciones de alto nivel para enviar y recibir paquetes y manejarlos de acuerdo a la implementación realizada del Protocolo Basado en Diccionario.

3.2.1 Implementación del Protocolo Basado en Diccionario

Este proyecto implementa una adaptación del Protocolo Basado en Diccionario⁵⁵. Los mensajes están definidos de acuerdo a la estructura que se muestra en el **Cuadro 1**.

⁵⁵ F. Sasián, D. Gachet, M. Suffo, and R. Therón, "Preface," Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics) 2017, vol. 10268 LNCS, pp. 1–10, 2017. También consultar F. Sasián, R. Theron, and D. Gachet, "Protocolo para comunicación inalámbrica en instalaciones de energías renovables," RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind., vol. 13, no. 3, pp. 310–321, 2016.

Cuadro 1. Definición de la estructura `lgw_pkt_s` para registrar los objetos del diccionario.

```
typedef struct lgw_pkt_s {
    byte[6] recipientID; // Token Identificador del gateway
    byte[6] senderID;    // Token Identificador del nodo origen
    byte frameCtrl;      // Control de trama
    byte sequenceNum;    // Consecutivo de mensaje enviado
    String pkt_data;     // Apuntador al área de datos
    _NODE_STATUS status; // Estatus del nodo
} _DBP_LPKT;
```

Los tokens identificadores son, por ejemplo, para el gateway 545FA9BF71 y para el nodo final, 6C58A9BF713C.

El miembro de estructura `senderID` permite, al gateway, determinar el nodo del que procede el mensaje recibido, y `recipientID`, permite validar el del gateway, de esta forma, sería posible, en un momento, discriminar mensajes entrantes de nodos asociados a otros gateways.

3.2.2 Implementación del Packet Forwarder

El PF es el software embebido del gateway, es el corazón de todo el sistema. Es el responsable de recolectar los mensajes de los nodos finales, almacenarlos apropiadamente hasta que puedan ser pre procesados y enviados a Cloudino Server. Otra de las tareas de este programa es decidir si los datos, en un escenario dado de procesamiento, debieran ser temporales o persistidos.

El PF se encuentra grabado en el host del Wireless LGWC, usando un método de instalación de software conocido como **factory bootstrap**. Una vez instalado, comienza a ejecutarse mostrando información sobre la recepción y el envío de paquetes que aparece periódicamente en el display de la PCB del gateway.

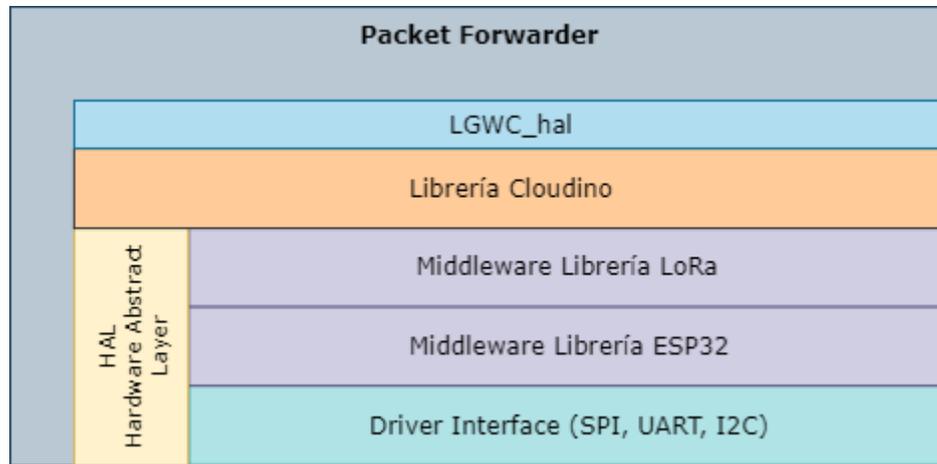


Figura 15. Capas que integran el software embebido del Packet Forwarder del Wireless LGWC.

El PF no es un programa de aplicación solitario, sino que existen múltiples capas de software entre los componentes de hardware y el PF. Véase la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Estas capas de software de bajo nivel, entre ellas los controladores del dispositivo (Driver Interface), soportan toda la funcionalidad del PF. El Hardware Abstract Layer (HAL) del PF corre a un nivel muy cercano del hardware, y se encarga de atender un sin número de operaciones primitivas que escapan de la vista del PF., se implementó haciendo uso de la librería LGWC_hal, descrita anteriormente.

La librería LGWC_hal, hace que los concentradores LoRa queden configurados e inicializados según las especificaciones de los requerimientos del proyecto. Posteriormente, entra en ejecución el bucle de aplicación para dar paso al Packet Forwarder, encargado del reenvío de los paquetes recuperados por el MCU.

Los nodos finales no enviarán mensajes entre ellos sino que los enviarán directamente al gateway; esto fue establecido programáticamente controlando la inversión I/Q, escribiendo en el registro *RegInvertIQ* (0x33)⁵⁶. LoRaWAN utiliza esta disposición, con invertIQ activado es posible rastrear paquetes downlink.

⁵⁶ Para más información, puede consultar, previo registro en el sitio de Semtech, el siguiente documento https://www.semtech.com/uploads/documents/SX1276_settings_for_LoRaWAN_v2.2.pdf. [Accessed: 11-Jun-2018].

El **Cuadro 2**, muestra los métodos para activar y desactivar la inversión I/Q. Estos métodos están definidos en la clase que implementa el funcionamiento del Packet Forwarder. La razón principal es para evitar conectar con cada sensor del sistema, es más eficiente que cada gateway monitoree las métricas de los sensores del área de la que es responsable.

Cuadro 2. Fragmento de código del Packet Forwarder.

```
void PkFwr::enableInvertIQ() {
    lgw_enableInvertIQ();
}
void PkFwr::disableInvertIQ() {
    lgw_disableInvertIQ();
}
```

Sincronizando esta funcionalidad, véase el **Cuadro 2**, un LGWC solo lee mensajes transmitidos por nodos finales y no alcanza a leer mensajes transmitidos por otro LGWC. Por su parte, intercambiando las funciones enableInvertIQ () y disableInvertIQ (), un nodo final no alcanza a leer mensajes transmitidos por otros nodos finales.



Capítulo 4

Pruebas y resultados



Capítulo 4: Pruebas y resultados

Para evaluar el Wireless LGWC se hizo uso de las instalaciones del edificio Infotec Aguascalientes. La señal WiFi fue proporcionada por la infraestructura Telco de las instalaciones de Infotec.

Se realizaron las siguientes pruebas funcionales:

- Envío de mensajes a Cloudino Server desde un nodo final.
- Cobertura del Wireless LGWC desde el interior del edificio, encontrándose el nodo final en el exterior.
- Envío de mensajes al nodo final desde Cloudino Server.

4.1 Pruebas; verificación; y validación de la solución tecnológica propuesta

Para verificar el funcionamiento del Wireless LGWC, en la práctica, se estableció un ambiente de pruebas en un entorno mixto. La comunicación entre el nodo final y el Wireless LGWC se estableció de la siguiente manera: el nodo final se situó en varias localidades exteriores, mientras que el Wireless LGWC se encontraba en el interior de una oficina del edificio.

Inicialmente se apertura la sesión de trabajo en Cloudino Server, una vez establecida la sesión, Cloudino muestra una lista de dispositivos conectados.

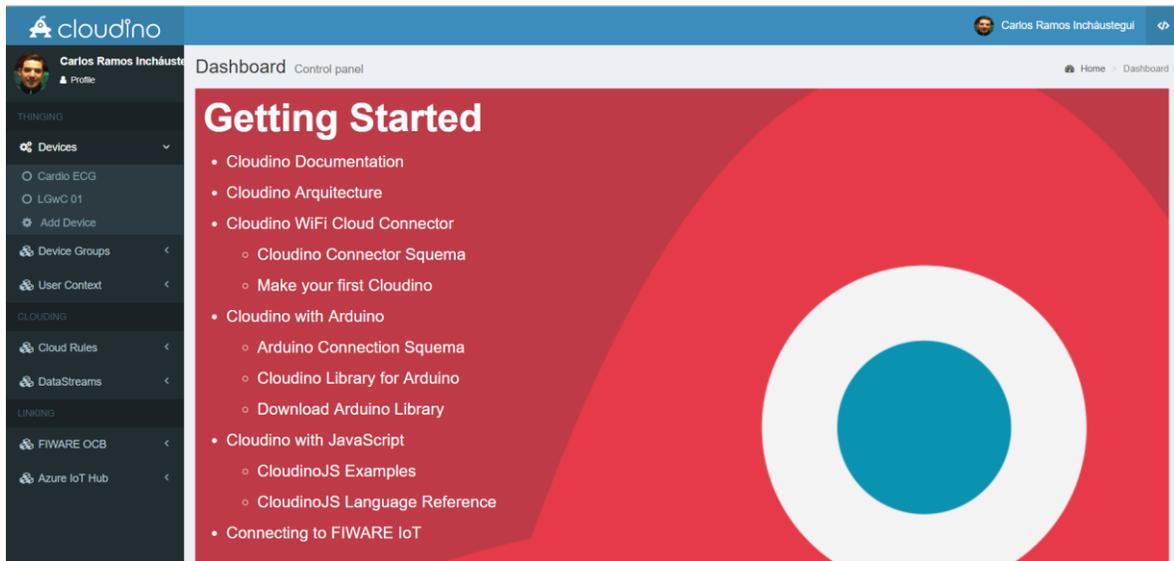


Figura 16. Sesión iniciada en Cloudino Server en www.cloudino.io.

La **Figura 16**, muestra la pantalla principal de Cloudino Server, la ficha **Thinging** del lado izquierdo, muestra el menú **Devices**, debajo se encuentra la opción **Add Device**, que permite agregar nuevos *devices* o dispositivos. Previamente, se registró un nuevo *device* y se le nombró “LGwC 01”. Entonces, el *device* LGwC 01, se vinculó con el Wireless LGWC gracias al token de autenticación “tzkmo37fw40jkfu1uarjy8193041mn24jvsk2o”, generado de manera automática por Cloudino, al momento que se creó este nuevo *device* en la plataforma.

Para mejorar la comprensión del párrafo anterior, se cuenta con la **Figura 17**, donde se muestran dichos datos de configuración. Se puede observar el valor del token en el campo **Auth Token**. Una vez establecida la sesión y energizado el Wireless LGWC, inicia la comunicación y comienza a recibir mensajes provenientes del nodo final.

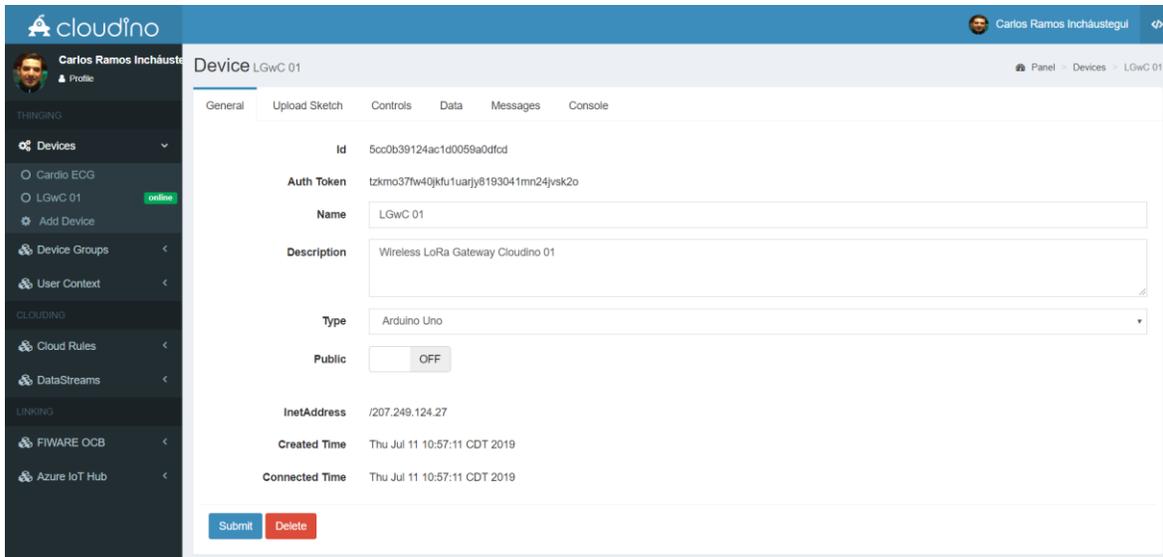


Figura 17. Se establecieron valores para el nombre y descripción del gateway con LGwC 01 y Wireless LoRa Gateway Cloudino 01, respectivamente.

El Cloudino WiFi Connector está enlazado con Cloudino Server. La conexión se estableció exitosamente, se observa la etiqueta “*online*” (fondo color verde) a un lado del gateway **LGwC 01**, configurado previamente, la **Figura 18** permite observar este detalle.

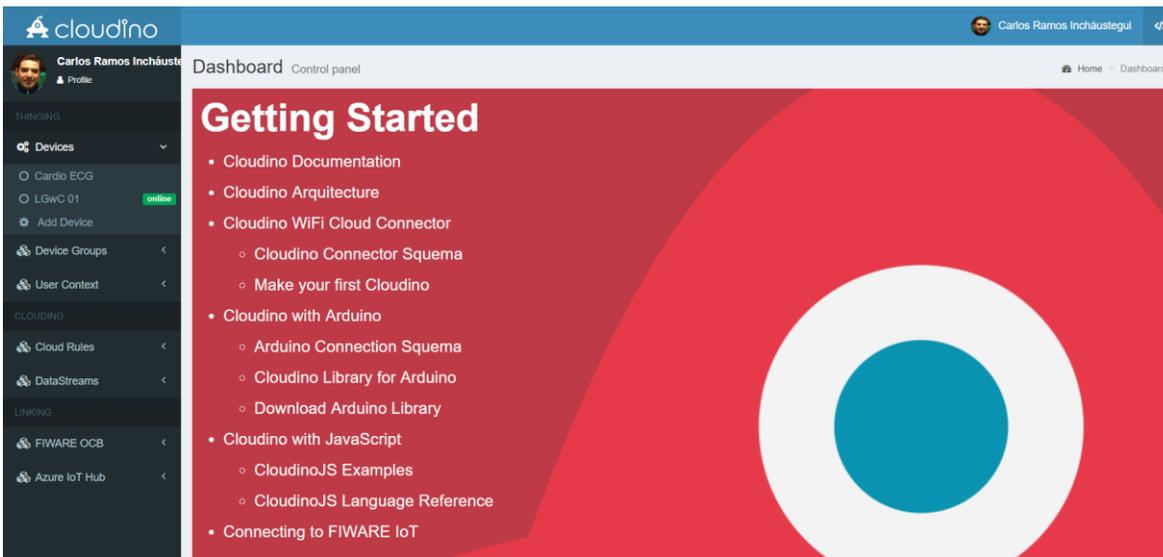


Figura 18. El Wireless LGWC, está conectado a Cloudino Server a través de su conector CWC.

En la **Figura 19**, se puede apreciar cómo el display del Wireless LGWC muestra datos sobre las condiciones de recepción de cada uno de los mensajes recibidos.

Otro tipo de mensajes enviados por el gateway a Cloudino Server son valores relacionados con el estado, en un momento dado, del gateway y, a cambio, recibe comandos para reaccionar a dichos estados. Para facilitar su visualización, se imprimieron en la consola de Cloudino, como se puede apreciar en la **Figura 20**.

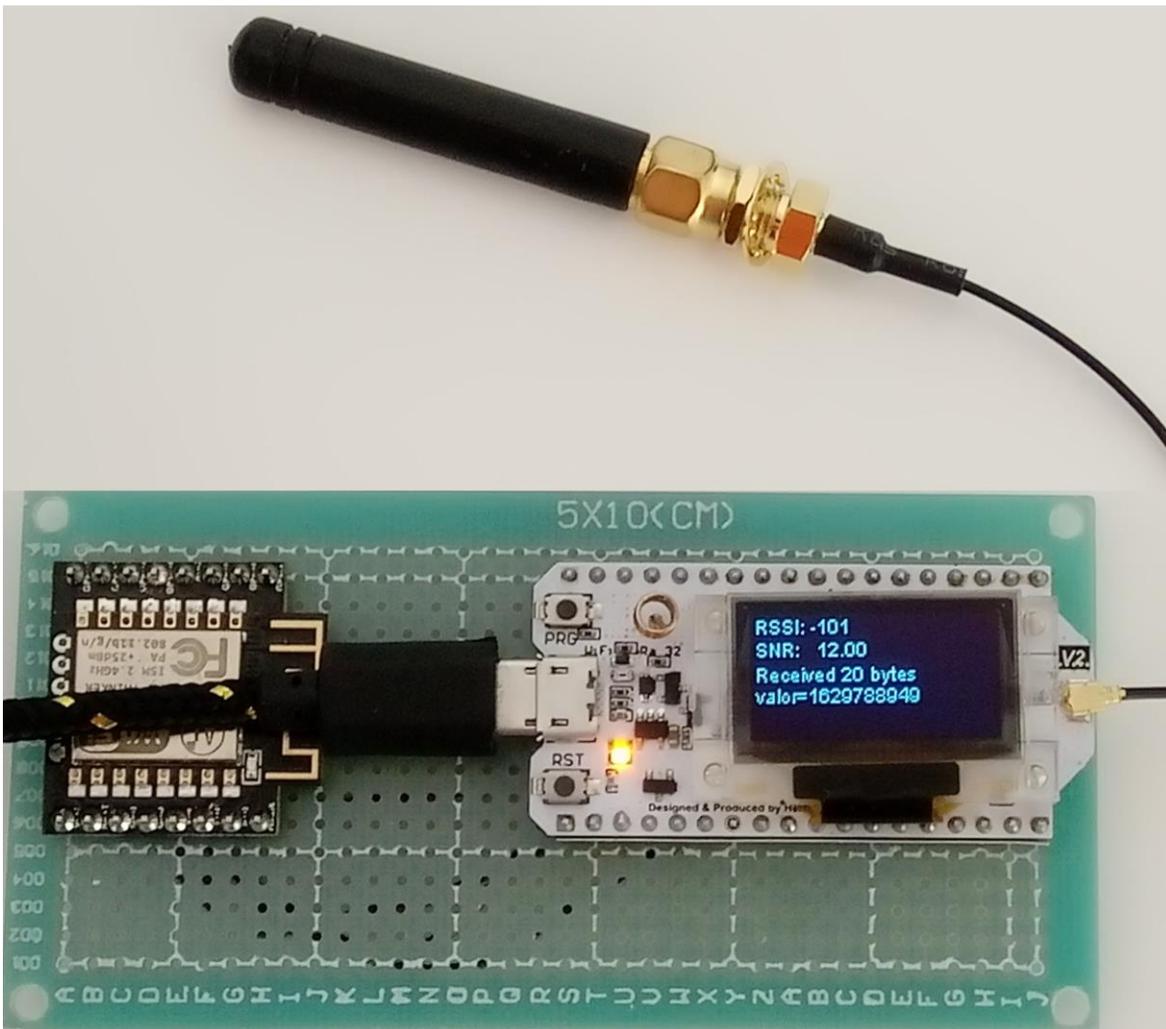


Figura 19. Wireless LGWC en pleno funcionamiento.

La **Figura 19** presenta el Wireless LGWC en funcionamiento. De izquierda a derecha se observa el CWC, a continuación, se encuentra el host del gateway, el MCU ESP32, integrado en la PCB Heltec y, por último, la antena LoRa; todos

dispuestos en una placa perforada para facilitar su manipulación. Los datos que se logran apreciar en el display corresponden a la recepción de un mensaje. El payload es: “**valor=1629788949**”. RSSI indica la fuerza de la señal recibida y, se mide en dBm. Este valor sirve como un indicador de que tan bien está escuchando el receptor. SNR indica la proporción de la potencia de la señal transmitida y el ruido que la corrompe.



Figura 20. Imágenes del nodo final. (a) Vista general del nodo montado en el tripié. (b) Otra localidad de medición. (c) Detalle del montaje del nodo en el tripié, (d) Detalle para observar información del envío de un mensaje.

La serie de fotografías mostradas en la **Figura 20**, muestran el nodo final montado en un tripié para facilitar su colocación, sobre los puntos de las diferentes localidades de medición, y visualización de la información de los niveles RSSI y SNR.

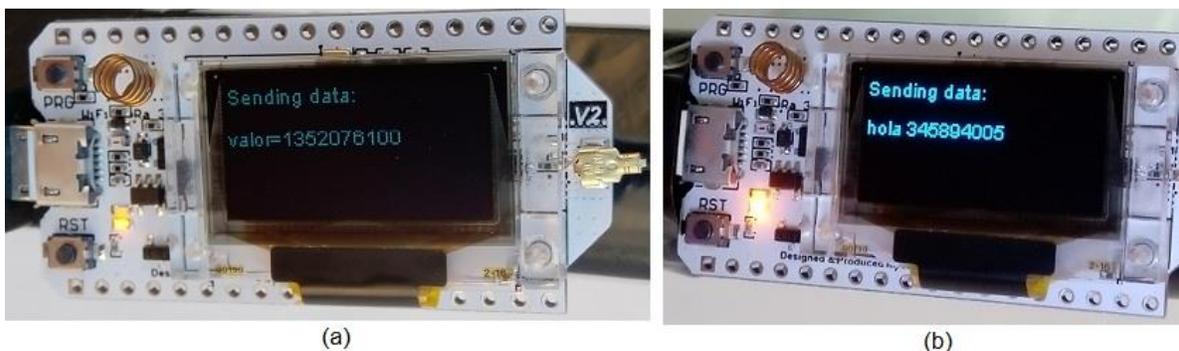
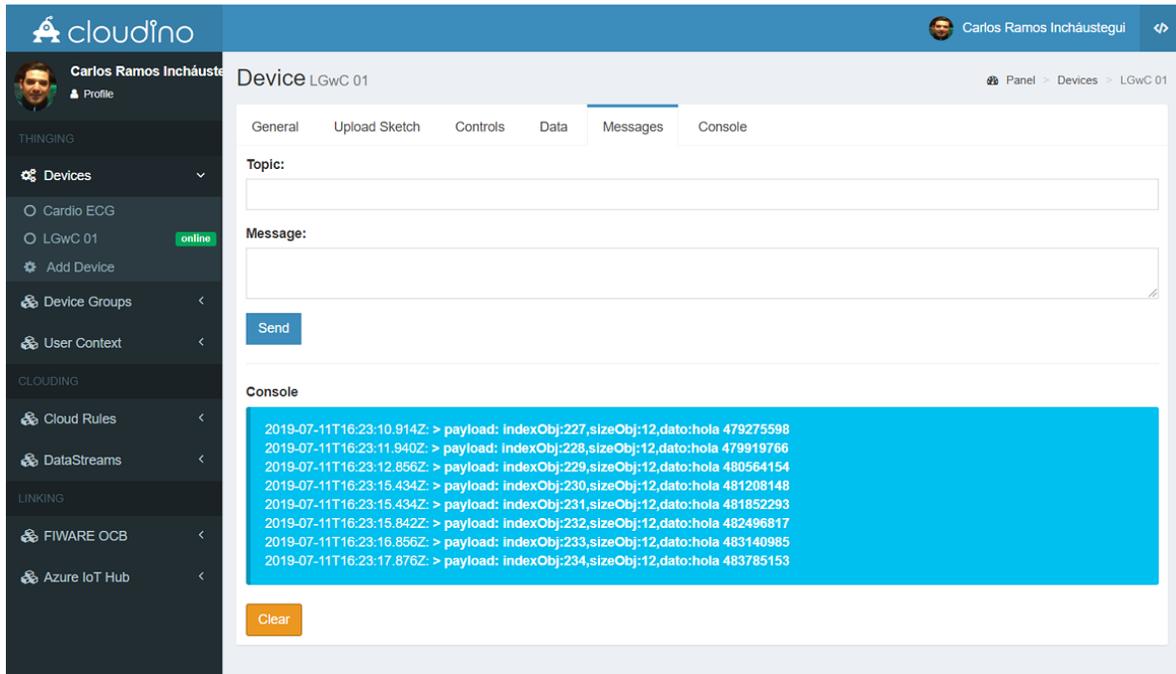
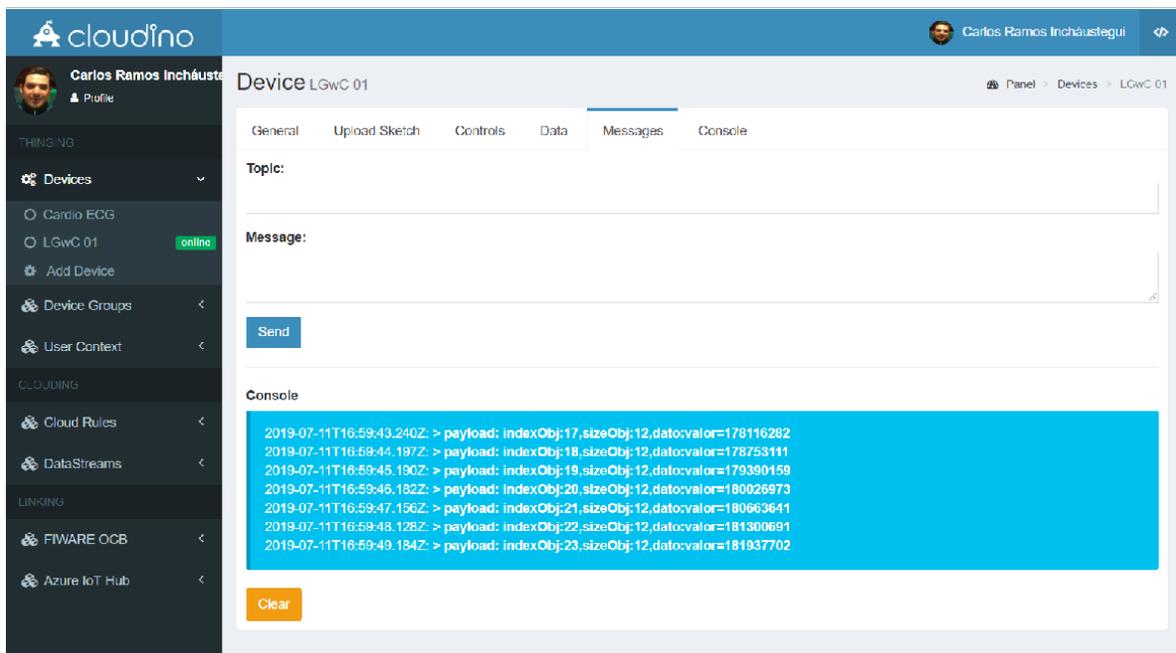


Figura 21. Mensajes transmitidos desde nodo final.

Existen dos tipos de mensajes simulados para realizar las pruebas del Wireless LGWC, uno es **valor** y el otro **hola**.



(a)



(b)

Figura 22. Recepción en Cloudino Server de mensajes uplinks de prueba. (a) Mensajes uplink de prueba, de tipo “hola”, mostrados en la consola de Cloudino, (b) Mensajes uplink de prueba, de tipo “valor”, mostrados en la consola de Cloudino.

Los valores numéricos son lecturas instantáneas del tiempo en milisegundos. La **Figura 21**, muestra en detalle la información desplegada en la **Figura 20 (d)** para ambos tipos de mensajes.

General Upload Sketch Controls Data Messages Console

Topic:
pkfwr

Message:
245

Send

Console

```
2019-07-11T17:01:58.241Z: > payload: indexObj:152,sizeObj:12,dato:valor=264111507
2019-07-11T17:01:59.125Z: > payload: indexObj:153,sizeObj:12,dato:valor=264748331
2019-07-11T17:01:59.652Z: < pkfwr: 245
2019-07-11T17:01:59.739Z: > backhoul: msg recibido=245
2019-07-11T17:02:00.126Z: > payload: indexObj:154,sizeObj:12,dato:valor=265385345
2019-07-11T17:02:01.185Z: > payload: indexObj:155,sizeObj:12,dato:valor=266022147
```

(a)

General Upload Sketch Controls Data Messages Console

Topic:
pkfwr

Message:
447

Send

Console

```
2019-07-11T17:01:30.159Z: > payload: indexObj:124,sizeObj:12,dato:valor=246272640
2019-07-11T17:01:31.116Z: < pkfwr: 447
2019-07-11T17:01:31.196Z: > payload: indexObj:125,sizeObj:12,dato:valor=246909538
2019-07-11T17:01:31.266Z: > backhoul: msg recibido=447
2019-07-11T17:01:32.147Z: > payload: indexObj:126,sizeObj:12,dato:valor=247546551
2019-07-11T17:01:33.195Z: > payload: indexObj:127,sizeObj:12,dato:valor=248183359
```

(b)

Figura 23. Envío, desde la consola de Cloudino Server, de mensajes downlinks de prueba. (a) Envío de un mensaje downlink de prueba con el tópico pkfwr 245. (b) Envío de un mensaje downlink de prueba con el tópico pkfwr 447.

Es posible implementar alguna lógica en Cloudino para accionar en respuesta a los valores contenidos en los mensajes uplinks recibidos, haciendo uso de tópicos. Wireless LGWC, actualmente implementa un tópico: **pkfwr** y dos valores válidos: **245** y **447**. Cada uno de ellos tiene un comportamiento completamente diferente. Para el acuse de recibido (ACK), Wireless LGWC, envía mensajes a Cloudino con el tópico **backhaul: msg recibido XXX**. Para ilustrar este hecho, se puede observar en la **Figura 23**, el envío a consola para verificar su recepción. Donde XXX representa el valor del tópico pkfwr. Como ya se comentó, cada uno de estos valores, representa una funcionalidad específica dentro del Wireless LGWC, para el caso concreto del valor 245 enciende el led de usuario del PCB y el valor 447 reenvía un mensaje dirigido al nodo final.

4.2 Plan de mantenimiento y mejoras

Durante el desarrollo con la tarjeta Heltec se detectó un problema con las funciones de la librería WiFi siendo invocadas dentro de la función onReceive de la librería LoRa que provee Heltec Automation disponible en GitHub⁵⁷, Inc., hasta el punto de provocar un fallo en la tarjeta. De manera similar, la invocación de funciones para desplegar datos dentro de la función onReceive provoca mal funcionamiento de la pantalla.

Uno de los aspectos de mayor peso para decidir sobre la adquisición de un gateway IoT es la seguridad que brinda para unir nodos finales y dispositivos terminales a la red. En este sentido, los pasos siguientes irían encaminados a implementar procedimientos de descubrimiento, unión y activación, tales como OTAA o ABP, en la ingeniería base del Wireless LGWC.

A continuación, se presenta un cronograma de las siguientes etapas de desarrollo y mejoramiento del Wireless LoRa Gateway Cloudino.

⁵⁷ Para más información sobre todos los recursos disponibles sobre los productos de Heltec, puede consultar <https://github.com/HelTecAutomation>. [Accessed: 26-May-2018].

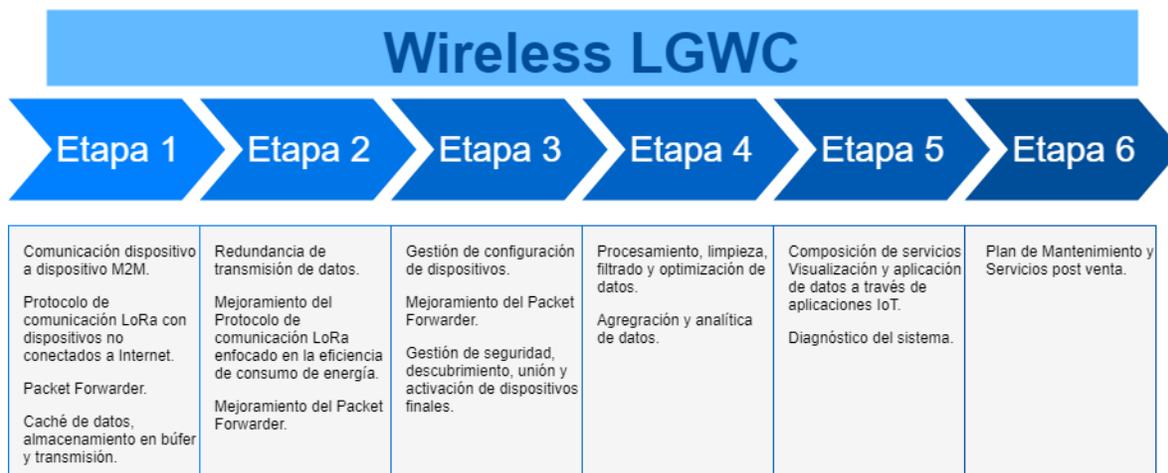


Figura 24. Cronograma de desarrollo del Wireless LGWC, agrupadas por etapas. Actualmente, este proyecto implementó la Etapa 1.

Las actividades relacionadas con el Mejoramiento del Packet Forwarder, en las etapas 2 y 3, contemplan características de recuperación de fallo y desastre y continuar trabajando desde el punto donde fue interrumpido. Edge Computing, contempla el procesamiento de datos críticos en las mismas fuentes de datos en lugar de recursos basados en Cloud Computing. A partir de la Etapa 4, se planea incorporar capacidades inteligentes para contar con un “Smart” LoRa Gateway Cloudino.

La seguridad seguirá siendo un área de oportunidad implícita a cualquier aplicación IoT. Aunque las técnicas de seguridad actuales se desempeñan bien, a medida que las redes como las que permite construir el Wireless LoRa Gateway Cloudino se vuelvan más comunes, descubriremos nuevos desafíos. Las empresas y los especialistas continúan trabajando para encontrar mejores soluciones económicas y de bajo consumo que ofrezcan redes más seguras de IoT.



Capítulo 5

Impacto social y económico



Capítulo 5: Impacto social y económico del proyecto

Ha sido proporcionado un Gateway IoT inalámbrico de propósito general para la plataforma IoT Cloudino, funcional para implementar una amplia variedad de aplicaciones IoT.

Como ejemplo, los proveedores de servicios de internet están explorando aplicaciones de este tipo, como extensión de sus ofertas de servicio. En el futuro cercano, el segmento del mercado industrial y de infraestructura también se beneficiará de nuevos mercados de mayor crecimiento a través de aplicaciones para las industrias de fabricación/transformación. Principalmente, están interesándose en desarrollar multitud de aplicaciones para incursionar en mercados tales como smart cities y las industrias de fabricación/procesos.

A continuación, se presenta un resumen, un poco más detallando, de estas aplicaciones emergentes:

- **Smart Cities.** La ubicuidad de servicios de información, contribuyen a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos facilitándoles encontrar información de interés y conveniencia para cada uno de ellos. En un entorno smart city, los sistemas tecnológicos están interconectados para proveer los servicios y facilidades urbanas imprescindibles:
 - a. Seguridad pública
 - b. Medición de la calidad del aire
 - c. Transporte y estacionamientos
 - d. Control de iluminación y riego públicos
 - e. Facilidades y amenidades en edificios
 - f. Obras de ingeniería civil
 - g. Vehículos
 - h. Estaciones de transporte

- **Cuerpo humano.** Dispositivos de vestir o ingeribles para monitorear y mantener la salud y el bienestar de las personas, manejar enfermedades, aumentar la aptitud y la productividad.
- **Hogar.** Amenidades controladas por sistemas inteligentes para la seguridad, el confort y la limpieza de pisos y ventanas.
- **Puntos de venta.** Tiendas, cines, restaurantes, estadios, cualquier lugar donde los consumidores consideren y compren; sistemas de autopago, ofertas en compras presenciales, optimización del inventario.
- **Smart Grids.** El empleo de Smart grids asiste a los proveedores de energía controlar y administrar recursos para abastecer proporcionalmente al incremento poblacional. Para contribuir a la eficiencia en el consumo de energía de casas y edificios interconectan medidores de consumo en las redes de energía para adquirir datos para administrar el consumo de energía, reducir fallos potenciales, incrementan la eficiencia y finalmente, mejorar el servicio:
 - a. Redes eléctricas y de combustibles
 - b. Redes ferroviarias
 - c. Redes carreteras
- **Automatización industrial y agraria.** El IoT es utilizado en la automatización industrial (IIoT) y agraria para controlar y monitorear la operación, seguridad, funcionalidad y productividad de las máquinas de producción y dispositivos de soporte:
 - a. Maquinaria y equipo de riego y cosecha
 - b. Fábricas
 - c. Brazos robóticos que realizan tareas de manufactura con poca o nula intervención humana. Activos ciberfísicos OT/IT

5.1 Caso de Uso Estacionamiento Inteligente

En los grandes estacionamientos, los gerentes están interesados por el número de cajones disponibles en un momento dado y, la ubicación de estos. Con esta información, puedan otorgar mejor servicio, reduciendo el tránsito dentro del estacionamiento y los tiempos de búsqueda de los automovilistas. Esto puede lograrse fácilmente instalando un sensor magnético o infrarrojo en cada cajón de estacionamiento.

Se puede implementar una red LoRa y emplear uno o varios Wireless LGWC. Una vez los datos almacenados en Cloudino Server, son publicados a un sistema de gestión del estacionamiento a través de algún protocolo IoT para mostrarlos en pantallas por todo el estacionamiento, filtrando la información por sectores o haciéndola disponible en alguna aplicación web distribuida por la misma compañía de estacionamiento. La eficiencia energética de LoRa produce ahorros en términos de conexión y hardware. La inversión considerable recaería, principalmente, en la adecuación e instalación de los topes o bolardos de estacionamiento para sustentar los nodos finales con sus sensores de presencia correctamente calibrados.

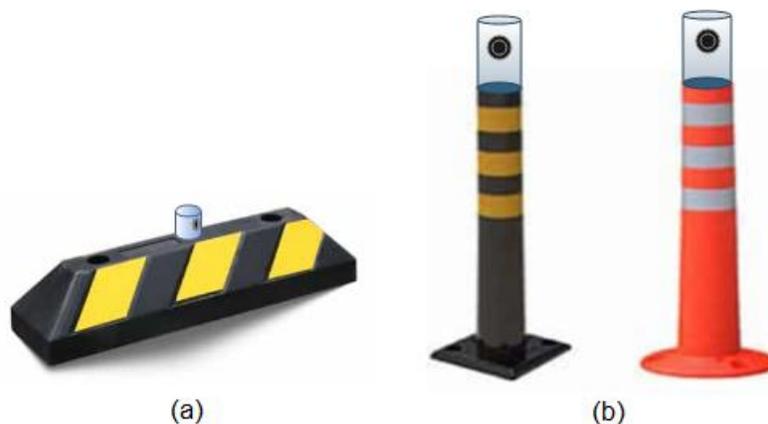


Figura 25. Adecuación de nodos finales a topes (a) y bolardos en (b) instalados en cada uno de los cajones de estacionamiento para construir la red LoRa que agiliza el flujo en el estacionamiento por completo.

5.2 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

Ya sea por cuestiones de salud pública o por cambio climático, la calidad del aire se ha convertido en un tema de preocupación primordial en muchísimas ciudades. Es por esto que el monitoreo de la polución por partículas suspendidas (PM) ha cobrado gran relevancia. Es posible construir redes inalámbricas de sensores con equipo de medición de alta precisión con un excelente desempeño usando un número de Wireless LGWC sin excesivos costos de inversión.

Por ejemplo, supongamos que el ayuntamiento de una municipalidad, está interesado en conocer la calidad del aire⁵⁸ en las cuatro zonas geográficas de la localidad. Para ello, instalan una red de sensores que se encargarán de medir las concentraciones, en el ambiente, de contaminantes clave en la determinación del índice de la calidad del aire. Este índice se calcula para cinco de los contaminantes críticos: dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y partículas suspendidas. Una vez obtenido, se representa con una escala que va de 0 a 500, donde el valor de 100 se asigna al valor indicado por la Norma Oficial Mexicana para cada contaminante.

Utilizando sensores con comunicación RF LoRa se elimina la necesidad de cableado. Además, la vida útil de las baterías de los sensores puede llegar a durar hasta 5 años. Si se utilizara una red 3G para esta aplicación específica, necesitaría una batería relativamente grande, que es más costosa.

⁵⁸ M. Knoll, P. Breitegger, and A. Bergmann, "Low-Power Wide-Area technologies as building block for smart sensors in air quality measurements," *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 135, no. 6, pp. 416–422, 2018.

Conclusiones

Conclusiones

En este proyecto se desarrolló un gateway LoRa de bajo costo que realiza, con éxito, la recolección de datos entre una red inalámbrica de dispositivos terminales conectados y la red de Internet Cloudino Server. A este gateway se le ha nombrado Wireless LGWC debido a que su enlace con Cloudino es a través de WiFi.

En general, los dispositivos que usan un gateway como proxy, necesitan dos protocolos: Uno para conectar los dispositivos terminales al gateway y otro para conectarse del gateway al servidor remoto de alguna plataforma IoT. Este proyecto empleó LoRa y WiFi, respectivamente.

Además, se necesitan otros dos protocolos más, uno para cada una de estas tecnologías de comunicación por radiofrecuencia. Para el caso de los dispositivos terminales que se comunican por LoRa al Wireless LGWC, hacen uso del protocolo basado en diccionario implementado en este mismo proyecto y, para el caso WiFi, el protocolo es TCP/IP.

En cuanto al protocolo basado en diccionario, se resolvió que este protocolo no se adecuaba de la mejor manera a las necesidades y condiciones del LGWC. La razón es que la comunicación está completamente referenciada por medio del índice del diccionario. La estandarización que propone el protocolo se confina en un conjunto de objetos. Es esta la razón por lo que la implementación del diccionario, en este proyecto, solo contiene un índice, el cual se usa en la transmisión de mensajes de la capa de percepción al Wireless LGWC.

Durante la fase de desarrollo, cuando se alcanzó un mejor dominio del protocolo basado en diccionario, se comprendió esta situación. Sin embargo, se decidió continuar con el trabajo tal cual estaba planeado. También se cuenta con una comprensión más madura sobre los protocolos MAC basados en la capa física LoRa, por lo que es muy posible que se considere el remplazo del del protocolo basado en diccionario, por uno más idóneo para la transmisión de datos y controlar las propiedades de LoRa para eficientar su desempeño.

Los resultados del funcionamiento del Wireless LGWC permiten abrir las posibilidades de continuar con su desarrollo. Este proyecto, sienta la base

tecnológica de la ingeniería para continuar con las mejoras y nuevas funcionalidades presentadas en las siguientes etapas propuestas en la sección 4.2.



Bibliografía



Bibliografía

A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 4, 2015.

B. Kang and H. Choo, "An experimental study of a reliable IoT gateway," *ICT Express*, vol. 4, 2017.

E. Ruano, "LoRa protocol Evaluations , limitations and practical test," , 2016.

F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, "Understanding the Limits of LoRaWAN," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 9, 2017.

F. Sasián, D. Gachet, M. Suffo, and R. Therón, "Preface," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics) 2017*, vol. 10268 LNCS, 2017.

F. Sasián, R. Theron, and D. Gachet, "Protocolo para comunicación inalámbrica en instalaciones de energías renovables," *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 13, no. 3, 2016.

G. Paul, "El espectro radioeléctrico en México. Estudio y acciones," IFT (INSTITUTO FEDERAL DE TELECOMUNICACIONES).

H. A. A. Al-Kashoash and A. H. Kemp, "Comparison of 6LoWPAN and LPWAN for the Internet of Things," *Aust. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 13, no. 4, 2016.

H. Kopetz, *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Springer, Wien. 2011.

Honghao Gao, Yuyu Yin Xiaoxian Yang, Huaikou Miao (Eds.), "Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities,". 13th EAI International Conference, TridentCom 2018, Shanghai, China, December 1-3, Springer, 2018.

IEEE 802.15.4-2006., "IEEE 802.15 WPAN Task Group 4 (TG4).".

Industrial Ethernet Book, "IIoT: Combining the Best of OT and IT," *Industrial Ethernet Book Issue 95 / 14*.

i-SCOOP, "IT and OT convergence – two worlds converging in Industrial IoT."

J. De Carvalho Silva, J. J. P. C. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic, and A. L. L. Aquino, "LoRaWAN - A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities," *2017 2nd Int. Multidiscip. Conf. Comput. Energy Sci. Split. 2017*, no. August, 2017.

J. Nordlöf and P. Lagusson, "A Study of Low-Power Wide-Area Networks and an In-Depth Study of the LoRaWAN Standard,". 2017.

J. P. A. Jantsch, *Fog Computing in the Internet of Things*. 2018.

L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, 2010.

L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, 2010.

L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures," vol. 159, 2015.

LoRa Alliance, "LoRaWAN® 1.1 Regional Parameters", LoRa™ Alliance, no. 1.1, 2017.

LoRa Alliance, "LoRaWAN® Specification v1.1," LoRa™ Alliance, 2017.

M. Knoll, P. Breitegger, and A. Bergmann, "Low-Power Wide-Area technologies as building block for smart sensors in air quality measurements," *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 135, no. 6, 2018.

N. G. P. M. Nico, "Development of Low-cost LoRaWAN Gateway for Private Deployments," no. November, 2017.

Olivier Bernard Andre Seller, "Wireless communication method," US20160094269A1, 2014.

P. Marwedel, *Embedded System Design*. 2nd Edition. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2011.

P. P. Ray, "A survey of IoT cloud platforms," *Futur. Comput. Informatics J.*, vol. 1, no. 1–2, 2017.

R. Henriksson, "Indoor positioning in LoRaWAN networks - Evaluation of RSS positioning in LoRaWAN networks using commercially available hardware.", 2016.

R. Petrolo, R. Morabito, V. Loscri, and N. Mitton, "The design of the gateway for the Cloud of Things," *Ann. des Telecommun. Telecommun.*, vol. 72, no. 1–2, 2017.

Richard Zurawski, *Networked Embedded Systems*, 2nd Editio. CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.

S. K. Datta, C. Bonnet, and N. Nikaiein, "An IoT gateway centric architecture to provide novel M2M services," *2014 IEEE World Forum Internet Things, WF-IoT*, 2014.

S. Park, K. Hwang, H. Kim, and B. Shim, "Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering," vol. 448, no. November, 2017.

S. Tyagi, "Internet of Things using LPWAN," no. January, 2019.

T. Noergaard, *Embedded Systems Architecture: A Comprehensive Guide for Engineers and Programmers. Elsevier Science., 2012.*

The Working Group for WLAN Standards, "IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks."

W. Ayoub, A. E. Samhat, F. Nouvel, M. Mroue, and J. C. Prévotet, "Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 2, 2019.

Z. Mahmood, *Fog computing: Concepts, frameworks and technologies*. 2018.



Anexos



Anexos

Anexo I

Diagramas y esquemáticos de cada uno de los componentes electrónicos utilizados para el desarrollo del gateway LoRa simple y de bajo costo que enlaza una red inalámbrica de dispositivos finales M2M con la Plataforma Cloudino. Asimismo, para habilitar una tecnología IoT accesible y hecha en México, con la finalidad de mejorar la calidad de vida de los mexicanos.

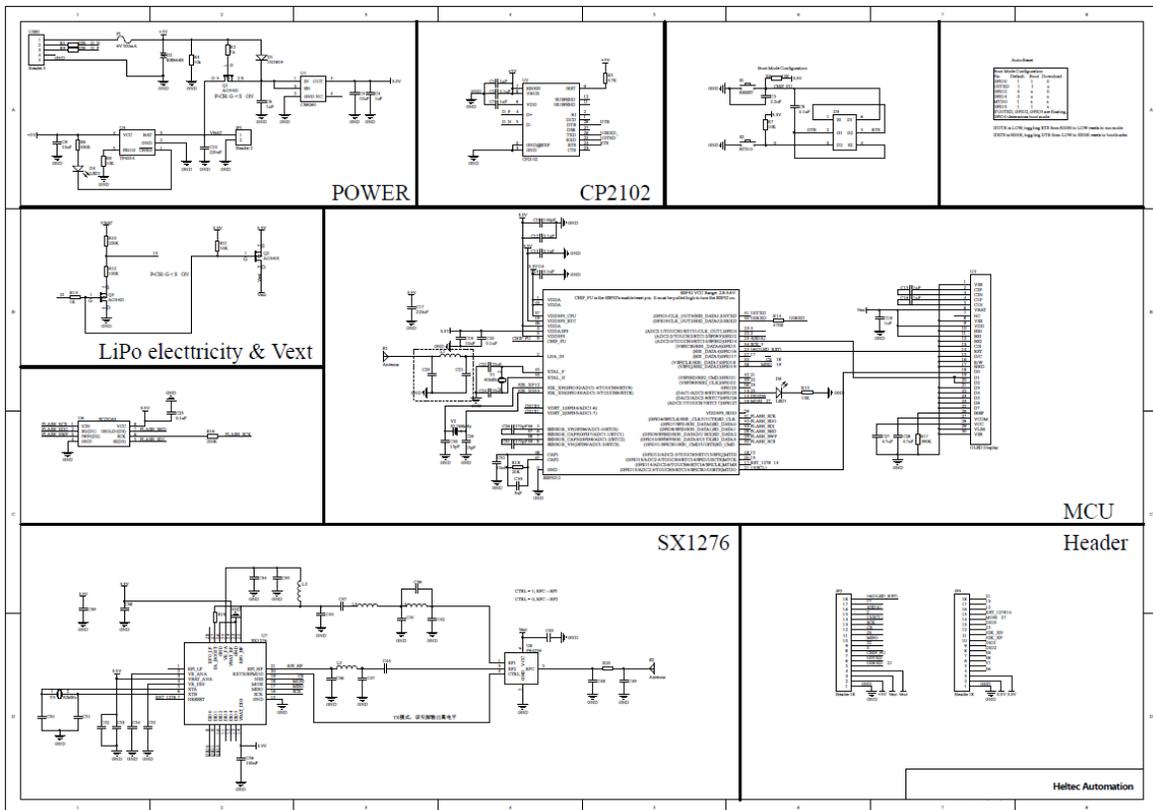


Figura 26. Diagrama Esquemático Heltec WiFi LoRa 32 V2. Cortesía Heltec Automation. Cortesía Heltec Automation.

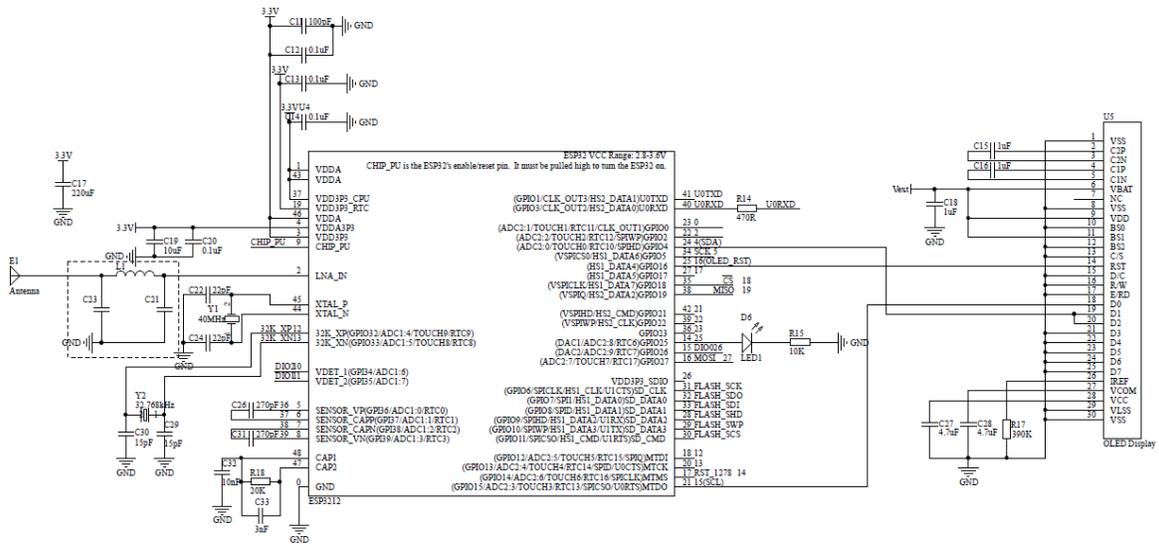


Figura 27. Diagrama del chip ESP32. Cortesía Heltec Automation.

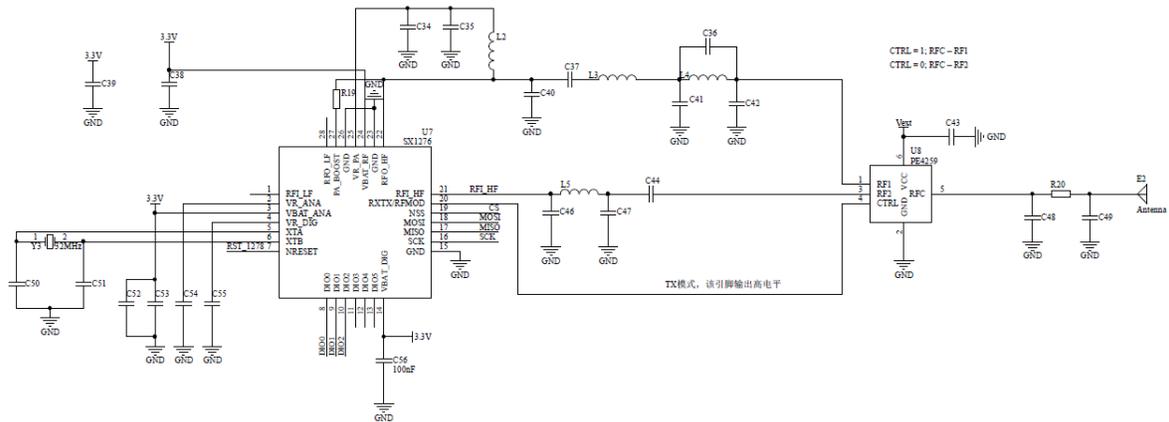


Figura 28. Diagrama esquemático del chip SX1276. Cortesía Heltec Automation.

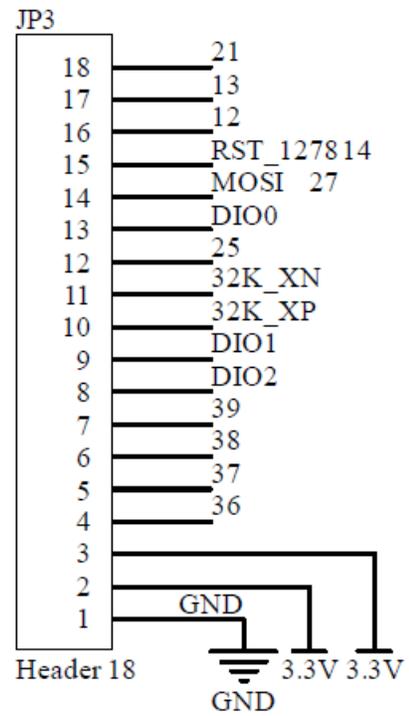
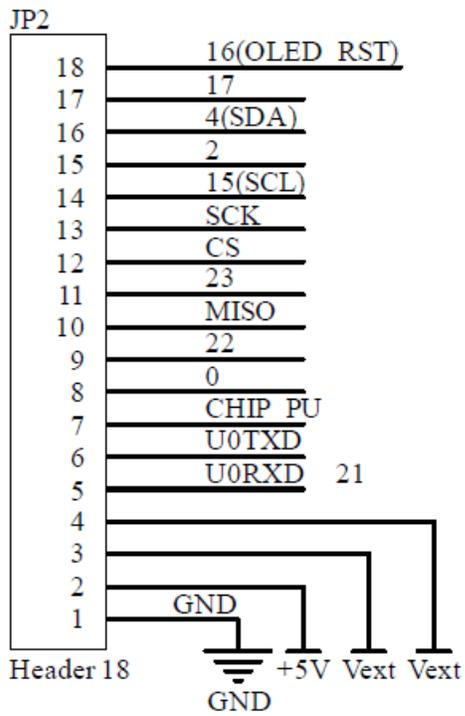


Figura 29. Header. Pines de la Heltec WiFi LoRa 32 V2. Cortesía Heltec Automation.

WiFi LoRa 32 V2 Pinout Diagram

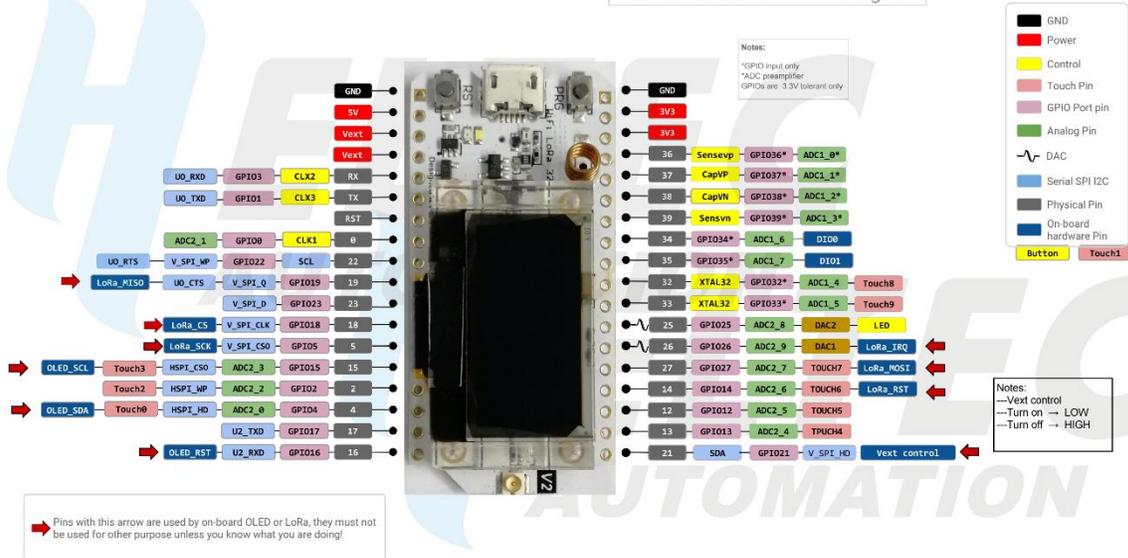


Figura 30. Diagrama pinout Heltec WiFi LoRa 32 V2. Cortesía Heltec Automation.

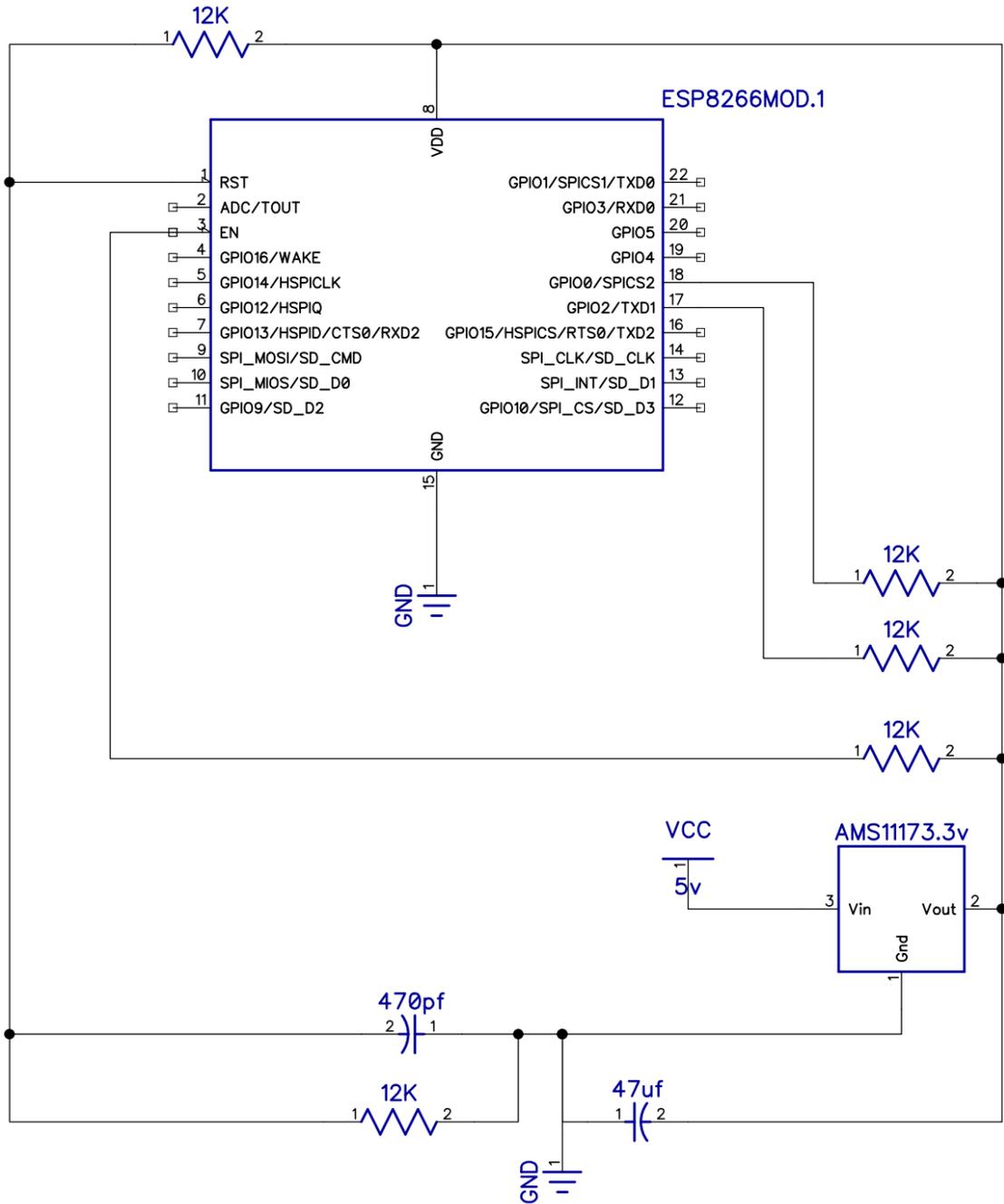


Figura 31. Diagrama Esquemático Cloudino WiFi Connector. Cortesía Infotec.

